

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERÍA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
COMUNICACIONES MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL
ESTÁNDAR IEEE 802.15.4**

MARÍA BELÉN TITUAÑA ANAGUANO

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2010

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado: “IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE COMUNICACIONES MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4”, fue realizado en su totalidad por la señorita María Belén Tituaña Anaguano, bajo nuestra dirección.

Ing. Román Lara
DIRECTOR

Ing. Fabián Sáenz
CODIRECTOR

RESUMEN

Se presenta la implementación de un prototipo de comunicación mediante la utilización del estándar IEEE 802.15.4 y se pretende comprobar que el prototipo cumpla con las principales características técnicas especificadas por el estándar, como son; bajo consumo, robustez ante interferencia y su alcance en exteriores e interiores.

Los módulos RF XBee diseñados para operar dentro del protocolo ZigBee son empleados en el proyecto porque permiten desarrollar todas las pruebas que se han planteado y su configuración es sencilla mediante software X-CTU.

Se realizan 3 pruebas sobre el prototipo de comunicaciones, la prueba de consumo de energía permite concluir que en modo hibernar la batería tiene un tiempo de utilidad de 19 horas con un consumo de corriente de 10 mA, en modo activo y transmitiendo datos es de 7 horas con un consumo de corriente de 24 mA. En la prueba de Radiofrecuencia se determina que el prototipo es robusto porque ante la presencia de aparatos que funcionan en la misma frecuencia de 2,4 GHz, eligen como canal de operación el más adecuado (en el que exista menos interferencia). Finalmente con la prueba de propagación se determina que la máxima distancia de trabajo a la que puede funcionar nuestro prototipo en interiores es de 16 metros que depende de la estructura de la edificación (madera, cemento, mixta) y 60 metros en exteriores (en línea de vista y sin obstrucciones).

DEDICATORIA

A la persona que más amo en la vida, al hermoso ángel que Dios me dio y que es mi mayor bendición... a mi mamita por todo el amor que cada día me entrega, por ser mi amiga, mi apoyo, mi fuerza, mi ejemplo, la razón por la que cada día quiero ser mejor.

A mi padre y hermano, por ser la base de fortaleza de mi familia y poner alegría a cada minuto de mi vida.

A una persona muy especial, que con su amor me ayuda a crecer, que admiro por la valentía de su corazón y que me ha permitido conocer a personas únicas que me han brindado su cariño.

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgencita del Quinche por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, por escuchar mis oraciones y jamás abandonarme en los momentos difíciles.

A mis padres, por la confianza que me han brindado, a quienes debo este triunfo profesional, por todo su trabajo y dedicación para darme una formación académica. A mi hermano, por su cariño y porque siempre me ha apoyado.

A mis amigos, que siempre me han acompañado y con los cuales he contado desde que los conocí, con los que compartí grandes momentos y a los que quiero mucho. A una persona única que me dio ánimos cada día y de forma incondicional estuvo a mi lado apoyándome y dándome fuerza.

Un agradecimiento especial a mis tutores que me asesoraron, porque cada una de sus valiosas aportaciones sirvió para finalizar este proyecto y me hicieron crecer como persona y como profesional.

PRÓLOGO

El presente proyecto abarca los fundamentos teóricos y recalca al estándar IEEE 802.15.4 como una alternativa interesante en aquellos ámbitos donde el consumo de energía es más importante que la capacidad de transmisión. Además de manera práctica presenta características de esta tecnología que incentivarán el uso del estándar en el desarrollo de nuevos proyectos con aplicaciones en diversas áreas impulsando el crecimiento tecnológico de nuestro país.

Inicialmente se realiza la presentación del proyecto, en el que sobresalen los objetivos que se esperan e interesa alcanzar con el desarrollo del trabajo. El segundo capítulo constituye el fundamento teórico de las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN), detallando su definición y una breve clasificación de este tipo de redes.

A lo largo del tercer capítulo se realiza el estudio del estándar IEEE 802.15.4; su arquitectura definiendo su capa física, control de acceso, red y aplicación. Además se presenta una comparación técnica con otras tecnologías WPAN y los principales mercados y aplicaciones de ZigBee.

En el cuarto capítulo se explica la implementación del prototipo de comunicaciones. Los materiales utilizados y métodos, configuración de los equipos, los escenarios de pruebas y resultados obtenidos con respecto al consumo de energía, propagación y radiofrecuencia.

Finalmente en el quinto capítulo se encuentran detalladas las conclusiones y recomendaciones que se determinan con el desarrollo del proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I	1
PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES.....	1
1.3 MOTIVACIÓN	2
1.4 IMPORTANCIA	3
1.5 JUSTIFICACIÓN	3
1.6 OBJETIVOS	4
1.6.1 General.....	4
1.6.2 Específicos.....	4
1.7 ESTADO DEL ARTE DE IEEE 802.15.4 ZIGBEE EN EL ECUADOR.....	4
CAPITULO II	6
FUNDAMENTO TEÓRICO	6
2.1 REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA PERSONAL (WPAN)	6
2.2 DEFINICIÓN DE LAS REDES WPAN.....	8
2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES WPAN.....	10
2.3.1 Grupo de trabajo 802.15.1.....	11
2.3.2 Grupo de trabajo 802.15.2.....	14
2.3.3 Grupo de trabajo 802.15.3.....	15
2.3.4 Grupo de trabajo 802.15.4.....	18
2.4 MODELO ISO-OSI vs. MODELO 802.15.....	19
CAPITULO III	21
ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA INALÁMBRICA IEEE 802.15.4/ZIGBEE	21
3.1 INTRODUCCIÓN	21
3.2 MISIÓN DE LA ALIANZA ZIGBEE.....	22
3.3 PROPÓSITO DE ZIGBEE	22
3.4 MOTIVACIÓN PARA LA CREACIÓN DEL ESTANDAR	23
3.5 ORIGEN DEL NOMBRE ZIGBEE	23
3.6 ESTÁNDAR ZIGBEE	23
3.6.1 Características Generales	24
3.6.2 Funciones del estándar ZigBee	25
3.7 STACK ZIGBEE	25
3.8 APPLICATION LAYER (APL).....	27
3.8.1 Application Framework (AF).....	27
3.8.2 Application Supports (APS).....	27

3.8.3	ZigBee Device Object (ZDO)	28
3.9	NETWORK LAYER (NWK)	28
3.9.1	Tipos de dispositivos	29
3.9.2	Arquitectura de la red	29
3.9.3	Topologías de Red	30
3.9.4	Ruteo de la Red	33
3.10	MAC (MEDIUM ACCESS CONTROL)	37
3.10.1	Modos de operación en ZigBee/ IEEE 802.15.4	38
3.10.2	Estructura de superframes	38
3.10.3	Mecanismos de acceso al medio	42
3.10.4	Separación entre tramas	42
3.10.5	Sondeo de Canales	43
3.10.6	Creación de una red	44
3.10.7	Estructura de las tramas MAC	49
3.11	CAPA FÍSICA	53
3.11.1	Características de la capa física	54
3.11.2	Paquete de la Capa Física	55
3.11.3	Canales IEEE 802.15.4	56
3.11.4	Modulación	58
3.11.5	Sensibilidad y potencia	59
3.11.6	Interferencia para otros dispositivos	59
3.12	TIPOS DE TRÁFICO	60
3.12.1	Datos periódicos	60
3.12.2	Datos intermitentes	60
3.12.3	Datos repetitivos de baja velocidad	60
3.13	SEGURIDAD	61
3.14	COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ESTÁNDARES	63
3.14.1	Comparación con Bluetooth	63
3.14.2	Comparación con Wi-Fi	65
3.14.3	Comparación con otras tecnologías Wireless	67
3.15	MERCADOS Y APLICACIONES ZIGBEE	67
3.15.1	Automación residencial y comercial	68
3.15.2	Control Industrial	70
3.15.3	Salud Personal	70
3.15.4	Periféricos para PC	71
3.15.5	Otros	71
CAPITULO IV		72
IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE COMUNICACIONES BASADO EN EL ESTANDAR IEEE 802.15.4/ZIGBEE		72
4.1	MATERIALES UTILIZADOS Y MÉTODOS	72
4.1.1	Descripción de los módulos RF ZigBee	72

4.1.2	Red ZigBee.....	78
4.1.3	Análisis del Software	92
4.2	IMPLEMENTACION DEL PROTOTIPO	97
4.2.1	Comandos de referencia	97
4.2.2	Diagrama	103
4.2.3	Elementos	103
4.2.4	Configuración del módulo RF XBee.....	104
4.2.5	Comunicación de los módulos	114
4.3	ESCENARIOS Y PRUEBAS	123
4.3.1	Suministro de Voltaje.....	123
4.3.2	Consumo de Energía	123
4.3.3	Radiofrecuencia.....	134
4.3.4	Propagación	141
4.4	RESULTADOS.....	142
4.4.1	Prueba de Suministro de Voltaje	142
4.4.2	Prueba de Consumo de Energía	144
4.4.3	Prueba de Radiofrecuencia.....	146
4.4.4	Prueba de Propagación	147
 CAPITULO V		148
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		148
5.1	CONCLUSIONES	148
5.2	RECOMEDACIONES	150
 ANEXO 1.....		151
MANUAL DE LOS MÓDULOS XBEE/XBEE PRO OEM RF		151
 ANEXO 2.....		198
MANUAL DEL SOFTWARE X-CTU		198
 ANEXO 3.....		216
ESQUEMA DEL CIRCUITO DE LAS TARJETAS XBEE		216
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		219

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO II

Tabla. 2. 1. Grupos de Trabajo WPAN	10
Tabla. 2. 2. Comparación de los estándares	11
Tabla. 2. 3. Características del IEEE 802.15.4.	19
Tabla. 2. 4. Modelo ISO-OSI vs. Modelo 802.15.	20

CAPITULO III

Tabla. 3. 1. Parámetros técnicos según las frecuencias	53
Tabla. 3. 2. Frecuencias de canales IEEE 802.15.4.....	58
Tabla. 3. 3. Modulación.....	59
Tabla. 3. 4. Comparación de ZigBee con Bluetooth	64
Tabla. 3. 5. Comparación de ZigBee con Wi-Fi.....	66

CAPITULO IV

Tabla. 4. 1. Especificaciones técnicas de los módulos	74
Tabla. 4. 2. Descripción de pines de los módulos XBee	76
Tabla. 4. 3. Canales de frecuencia disponibles en los módulos XBee	97
Tabla. 4. 4. Descripción del parámetro ID en los módulos XBee	106
Tabla. 4. 5. Descripción del parámetro SM (Sleep Mode).....	123
Tabla. 4. 6. Descripción del parámetro SC (Scan Channel) en los módulos XBee.....	135
Tabla. 4. 7. Valores de voltaje medidos en el Coordinador XBee	143
Tabla. 4. 8. Valores de voltaje medidos en el Nodo XBee.....	143
Tabla. 4. 9. Valores de corriente medidos en el Coordinador XBee	143
Tabla. 4. 10. Valores de corriente medidos en el Nodo XBee	143
Tabla. 4. 11. Duración de batería medida en el nodo en estado dormido.....	144
Tabla. 4. 12. Duración de batería medida en el nodo en modo activo y transmitiendo datos.....	144
Tabla. 4. 13. Potencia de señal recibida en el coordinador (pruebas interior).....	147
Tabla. 4. 14. Potencia de señal recibida en el coordinador (pruebas exterior).....	147

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

Figura. 2. 1. WPAN (Wireless Personal Area Network).....	9
Figura. 2. 2. Interconexión de dispositivos.....	12
Figura. 2. 3. Dispositivos electrónicos de consumo UWB.....	16

CAPITULO III

Figura. 3. 1. La insignia de la Alianza ZigBee	21
Figura. 3. 2. Stack de protocolos ZigBee	26
Figura. 3. 3. Red típica de ZigBee	30
Figura. 3. 4. Topología en estrella	31
Figura. 3. 5. Topología Cluster-Tree	32
Figura. 3. 6. Topología Mesh	33
Figura. 3. 7. Esquema de selección de cabecera de cluster	35
Figura. 3. 8. Enlace entre canal y nodo miembro	36
Figura. 3. 9. Partes de una superframe	38
Figura. 3. 10. Partes del periodo activo de una superframe	39
Figura. 3. 11. Parámetros que definen una superframe	40
Figura. 3. 12. Transferencia de datos en modo beacon-habilitado	47
Figura. 3. 13. Transferencia de datos en modo beacon-no habilitado	47
Figura. 3. 14. Transferencia de datos en modo beacon-habilitado	48
Figura. 3. 15. Transferencia de datos en modo beacon-no habilitado	48
Figura. 3. 16. Formato en detalle de la trama MAC	49
Figura. 3. 17. Formato general de la trama Beacon.....	51
Figura. 3. 18. Formato general de la trama ACK	52
Figura. 3. 19. Formato general de la trama de comandos.....	52
Figura. 3. 20. Estructura del paquete de capa física	56
Figura. 3. 21. Estructura de canales de IEEE 802.15.4	57
Figura. 3. 22. Comparación de ZigBee con otras tecnologías Wireless	67
Figura. 3. 23. Aéreas de aplicación de las tecnologías Wireless	67
Figura. 3. 24. Aéreas de aplicación de ZigBee	68
Figura. 3. 25. Automatización del hogar	69
Figura. 3. 26. Aplicaciones de ZigBee en la Salud.....	70

CAPITULO IV

Figura. 4. 1. Módulos XBee: Coordinador y Dispositivo final	72
Figura. 4. 2. Conexiones mínimas requeridas para el XBee.....	77

Figura. 4. 3. Diagrama de flujo de datos del sistema en un entorno de interfaz UART.....	86
Figura. 4. 4. Paquetes de datos UART 0x1F (número decimal 31), transmitido a través del módulo de RF.	86
Figura. 4. 5. Secuencia Modo de Transmisión	89
Figura. 4. 6. Opciones de modos Sleep	90
Figura. 4. 7. Función PC Settings del Software X-CTU	93
Figura. 4. 8. Respuesta satisfactoria del COM	93
Figura. 4. 9. Función Range Test del Software X-CTU	94
Figura. 4. 10. Función Terminal del Software X-CTU	95
Figura. 4. 11. Función Modem Configuration del Software X-CTU	96
Figura. 4. 12. Frecuencias de los módulos XBee	99
Figura. 4. 13. Diagrama del prototipo de comunicación	103
Figura. 4. 14. Valores de default del Coordinador XBee	104
Figura. 4. 15. Valores de default del Coordinador XBee	105
Figura. 4. 16. Valores de default del Nodo XBee	105
Figura. 4. 17. Valores de default del Nodo XBee	106
Figura. 4. 18. Configuración de parámetros en el coordinador XBee para la asociación manual	107
Figura. 4. 19. Nuevos valores de los parámetros en el coordinador para la asociación manual	108
Figura. 4. 20. Configuración de parámetros en el nodo XBee para la asociación manual	109
Figura. 4. 21. Valores de los parámetros en el nodo XBee asignados por el coordinador en la asociación manual.....	110
Figura. 4. 22. Configuración de parámetros en el coordinador XBee para la asociación automática.....	111
Figura. 4. 23. Nuevos valores de los parámetros en el coordinador para la asociación automática.....	112
Figura. 4. 24. Configuración de parámetros en el nodo XBee para la asociación automática.....	113
Figura. 4. 25. Valores de los parámetros en el nodo XBee asignados por el coordinador en la asociación automática	114
Figura. 4. 26. Prototipo de comunicación.....	115
Figura. 4. 27. Acceso a HyperTerminal.....	115
Figura. 4. 28. Creación de nueva conexión para el usuario coordinador	116
Figura. 4. 29. Selección del puerto para la conexión del usuario coordinador.....	116
Figura. 4. 30. Parámetros por default del puerto COM en la conexión del usuario Coordinador	117
Figura. 4. 31. Configuración del puerto COM de la conexión del usuario coordinador para establecer la comunicación	117
Figura. 4. 32. Interfaz de usuario coordinador	118
Figura. 4. 33. Creación de nueva conexión para el usuario nodo.....	118
Figura. 4. 34. Selección del puerto para la conexión del usuario nodo.....	119
Figura. 4. 35. Parámetros por default del puerto COM en la conexión del usuario nodo .	119

Figura. 4. 36. Configuración del puerto COM de la conexión del usuario nodo para establecer la comunicación.....	120
Figura. 4. 37. Interfaz de usuario nodo.....	120
Figura. 4. 38. Configuraciones adicionales del HyperTerminal.....	121
Figura. 4. 39. Activación del Eco de los caracteres escritos en las conexiones de HyperTerminal para los dos usuarios (coordinador y nodo).....	121
Figura. 4. 40. Comunicación desde la PC del usuario coordinador	122
Figura. 4. 41. Comunicación desde la PC del usuario nodo.....	122
Figura. 4. 42. Configuración de los modos de sleep para bajo consumo de energía en el nodo XBee.....	124
Figura. 4. 43. Configuración del modo de hibernar en el nodo XBee.....	124
Figura. 4. 44. Modo de hibernar activo en el nodo XBee.....	125
Figura. 4. 45. Consumo de corriente del nodo XBee en modo siempre dormido h=0.....	126
Figura. 4. 46. Voltaje en las borneras del nodo en modo siempre dormido h=0.....	126
Figura. 4. 47. Voltaje en el integrado (pines de VCC y GND) del nodo XBee en modo siempre dormido h=0.....	127
Figura. 4. 48. Consumo de corriente del nodo XBee en modo siempre dormido h=19....	127
Figura. 4. 49. Voltaje en las borneras del nodo XBee en modo siempre dormido h=19..	128
Figura. 4. 50. Voltaje en el integrado (pines de VCC y GND) del nodo XBee en modo siempre dormido h=19.....	128
Figura. 4. 51. Loop físico colocado en el nodo para ejecutar pruebas	129
Figura. 4. 52. Activación de la opción de Loop Back en el coordinado para que se transmitan datos de forma permanente.....	129
Figura. 4. 53. Nodo XBee despierto	130
Figura. 4. 54. Consumo de corriente del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=0.....	130
Figura. 4. 55. Voltaje en las borneras del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=0.....	131
Figura. 4. 56. Voltaje en el integrado (pines de VCC y GND) del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=0.....	131
Figura. 4. 57. Cantidad de paquetes enviados por el coordinador h=0	132
Figura. 4. 58. Consumo de corriente del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=7.....	132
Figura. 4. 59. Voltaje en las borneras del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=7.....	133
Figura. 4. 60. Voltaje en el integrado (pines de VCC y GND) del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=7.....	133
Figura. 4. 61. Cantidad de paquetes enviados por el coordinador h=7	134
Figura. 4. 62. Módulos ZigBee PRO: Coordinador y Dispositivo final.....	136
Figura. 4. 63. Módulos ZigBee PRO y Módulos ZigBee.....	136
Figura. 4. 64. Configuración del SC (Scan Channels) en el coordinador para que escanee únicamente 4 canales.....	137
Figura. 4. 65. El nodo se asocia luego de que el coordinado ha elegido el canal de operación CH=10.....	138

Figura. 4. 66. Configuración del SC (Scan Channels) en el coordinador para que escanee únicamente 3 canales.....	139
Figura. 4. 67. El nodo se asocia luego de que el coordinado ha elegido el canal de operación CH=17.....	139
Figura. 4. 68. Configuración del SC (Scan Channels) en el coordinador para que escanee únicamente 2 canales.....	140
Figura. 4. 69. Prueba de alcance en interiores	141
Figura. 4. 70. Prueba de alcance en exteriores	142
Figura. 4. 71. Paquetes perdidos en la comunicación cuando la batería se encuentra agotada.....	145
Figura. 4. 72. El nodo se asocia luego de que el coordinado ha elegido el canal de operación CH=15.....	146

GLOSARIO

ACK	Acknowledgment
ACL	Asynchronous Connectionless
AES	Advanced Encryption Standard
AF	Application Framework
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AODV	Ad Hoc On-Demand distance Vector
APL	Application Layer
APS	Applications Supports
APSDE	APS Data Entity
APSDE-SAP	APSDE Service Access Point
APSME	APS Management Entity
APSME-SAP	APSME Service Access Point
BI	Beacon Interval
BO	Beacon Order
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Contention Free Period
CH	Cluster Head
CID	Cluster Identifier
CON REQ	Connection Request
CON RES	Connection Response
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
DH	Destination Address High
DL	Destination Address Low
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DSSS	Direct Secuence Spread Spectrum

ED	Energy Detection
EDGE	Enhanced Data rates for GSM of Evolution
EDR	Enhanced Data Rate
FCC	Federal Communications Commission
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full function device
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GND	Electrical ground
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General Packet Radio Service
GTS	Guaranteed Time Slot
HDTV	High-Definition Television
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEEE-SA	IEEE Standard Association
IFS	Inter Frame Spacing
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
IS-95	Interim Standard 95
ISM	Industrial Scientific Medical
Kbps	Kilobytes per second
LLC	Logical Link Control
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
LS REP	Link State Report
LQI	Link Quality Indication
MAC	Medium Access Control
MCPS	MAC Common Part Sublayer
MCPS-SAP	MAC Common Part Sublayer-Service Access Point
MIC	Message Integrity Code
MLME	MAC Layer Management Entity
MLME-SAP	MAC Layer Management Entity-Service Access Point
MPDU	Mac Protocol Data Unit
MSDU	Mac Service Data Unit
NI	Node Identifier
NJ	Node Join Time

NWY	Network Layer
OSI	Open Systems Interconnection
O-QPSK	Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying
PAN	Personal Area Network
PC	Personal Computer
PDA	Personal Digital Assistants
PHR	Phy Header
PHY	Physical Layer
PL	Power Level
POS	Personal Operating Space
PPDU	Phy Protocol Data Unit
PSDU	Phy Service Data Unit
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
RREP	Route Reply
RREQ	Route Request
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SAP	Service Access Point
SC	Scan Channels
SD	Scan Duration
SD	Superframe Duration
SCO	Synchronous Connection Oriented
SH	Serial Number High
SHR	Synchronization Header
SIG	Bluetooth Special Interest Group
SL	Serial Number Low
SM	Sleep Mode
SO	macSuperframeOrder
TDD	Time Division Duplex
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWB	Ultra Wideband

VCC	Collector Common Voltage
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Networks
Wi-Fi	Wireless Fidelity
ZDO	ZigBee Device Object

CAPITULO I

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1 INTRODUCCIÓN

En el proyecto se presenta la implementación de un prototipo de comunicaciones basado en el estándar IEEE 802.15.4/ZigBee mediante el empleo de módulos Zigbee en la banda de frecuencia 2.4 GHz (mundial), que cumplen con las características del estándar de baja tasa de transferencia, bajo costo y bajo consumo de energía. El prototipo de comunicaciones se formará con un módulo coordinador y un módulo nodo, la comunicación se visualizará mediante un emulador de terminal (Hyperterminal). Las configuraciones realizadas en los módulos se pueden modificar y visualizar mediante un software libre y con interfaz gráfica. Las pruebas desarrolladas en campo utilizando características específicas de los módulos permiten determinar su funcionamiento y desempeño real.

1.2 ANTECEDENTES

Las tecnologías inalámbricas están revolucionando el mundo de los servicios y redes de telecomunicación. En la actualidad existe una avalancha de dispositivos y posibilidades que dispone el usuario para hacer más cercanas y, sobretodo, cómodas (sin cables, sin procedimientos complejos) actividades tan cotidianas como charlar con la familia, transmitir datos, controlar remotamente dispositivos en el hogar, etc.

Han aparecido toda una serie de estándares y tecnologías inalámbricas con múltiples aplicaciones, como son las redes PAN (*Personal Area Network*). Este tipo de redes se orientan a la interconexión de dispositivos a corta distancia. La principal diferencia entre una red personal y una red local se encuentra en la naturaleza de su utilización. Mientras que una red local busca la interconexión de distintos usuarios que puedan compartir recursos, las redes personales se construyen alrededor de un único usuario que comparte su información. [1]

Ha surgido una nueva tecnología inalámbrica, de corto alcance, denominada ZigBee (antes conocida como *Home RF Lite*), para la que se prevé un gran futuro. ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (*Wireless Personal Area Network*, WPAN).

Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. En principio, el ámbito donde se prevé que esta tecnología cobre más fuerza es en domótica. La razón de ello son diversas características que lo diferencian de otras tecnologías: su bajo consumo, su topología de red en malla y su fácil integración. El desarrollo de la tecnología se centra en la sencillez y el bajo costo más que otras redes inalámbricas semejantes de la familia WPAN, como por ejemplo Bluetooth. [2]

Por primera vez, las compañías tienen un estándar basado en una plataforma inalámbrica óptima para sus necesidades de monitorización remota y control de aplicaciones incluyendo simplicidad, confiabilidad, bajo costo y baja potencia. Previsiblemente, los módulos ZigBee serán los transmisores inalámbricos más baratos jamás producidos de forma masiva, e incorporarán una antena integrada, control de frecuencia y una pequeña batería.

1.3 MOTIVACIÓN

La motivación principal del proyecto es que mediante la implementación del prototipo de comunicación se investigará la tecnología inalámbrica 802.15.4/Zigbee que es poco estudiada y desarrollada en nuestro país pero que el mundo crece día a día y abarca más campos de aplicación. Además será posible presentar el fundamento teórico, características y ventajas únicas de 802.15.4/Zigbee lo que fomentará el uso y aplicación en nuestro medio.

1.4 IMPORTANCIA

La tecnología Zigbee está diseñada con el objetivo de ser más simple y barata que otras WPANs tales como Bluetooth, y se está apuntando su uso en aplicaciones de bajas tasas de datos y bajo consumo eléctrico. A la vez que ofrece a los consumidores flexibilidad, movilidad, y facilidad con toda una variedad de herramientas de seguridad.

Bluetooth y Wi-Fi simplemente consumen mucha energía respecto a ZigBee y los anchos de banda son demasiado para las transmisiones máquina-máquina que este pretende como por ejemplo que el equipo de música ordene a las luces atenuarse si la música que suena es romántica, o que la casa informe si se tiene un e-mail nuevo desde la última vez que se reviso el correo (la casa identificará al usuario porque trae un teléfono celular).

Si se analiza la competencia y se ve sólo un poco el pasado más reciente este estándar tiene todas las posibilidades de convertirse en ubicuo: es barato, es un estándar abierto y usa el espectro de frecuencias no regulado. [3]

Zigbee es promovido por importantes empresas alrededor del mundo tales como: Honeywell, Mitsubishi Electric, Motorola, Philips y Samsung, que trabajan para crear un sistema estándar de comunicaciones, vía radio y bidireccional, para usarlo dentro de dispositivos de domótica, automatización de edificios (inmótica), control industrial, periféricos de PC y sensores médicos.

La importancia del estudio de Zigbee radica en que las comunicaciones intra-hogar estarán dominadas por este estándar. Con respecto a Bluetooth, ZigBee tiene una ventaja fundamental a nivel de mercado y es que el IEEE se está encargando de su estandarización para que cualquier fabricante pueda utilizarlo siendo compatible con otros fabricantes.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto presenta un estudio a fondo del estándar IEEE 802.15.4/ZigBee. Al tratar el estudio se abarca los fundamentos teóricos y se recalca al estándar como una

alternativa interesante en aquellos ámbitos donde el consumo de energía es más importante que la capacidad de transmisión. Además de manera práctica presenta características de esta tecnología que incentivarán el uso del estándar en el desarrollo de nuevos proyectos con aplicaciones en diversas áreas impulsando el crecimiento tecnológico de nuestro país.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 General

- Implementar un prototipo de comunicaciones mediante la utilización del estándar IEEE 802.15.4.

1.6.2 Específicos

- Realizar una síntesis de los fundamentos del estándar IEEE 802.15.4, sus características y los componentes técnicos.
- Presentar los escenarios de aplicación de 802.15.4 Zigbee en el mundo real.
- Comparar al estándar IEEE 802.15.4 con otros estándares inalámbricos recalcando sus ventajas y desventajas.
- Investigar el funcionamiento de Hardware y Software empleado en la implementación del prototipo.
- Realizar la implementación, pruebas del prototipo y análisis los resultados obtenidos.

1.7 ESTADO DEL ARTE DE IEEE 802.15.4 ZIGBEE EN EL ECUADOR

En nuestro país es poco conocida esta nueva tecnología pero es de especial empleo para el desarrollo de aplicaciones como proyectos de grado universitario. Cada uno de los proyectos aporta soluciones interesantes que abrirán más el camino para la inserción de esta tecnología en nuestro medio.

En [4] y [5] se desarrollan aplicaciones en el área de las telecomunicaciones, usando a ZigBee como alternativa para prestar servicios de red eliminando el cableado. Esta tecnología WPAN junto al empleo de sensores se usa en la medición automatizada desarrollando aplicaciones para la monitorización y control de temperatura, humedad, resultados que son mostrados en [6], [7], [8] y [9].

En [10], [11] y [12] se muestra a ZigBee como la opción más óptima para aplicaciones de Domótica e integran sistemas automáticos en el hogar que permiten controlar remotamente electrodomésticos, iluminación, el medio ambiente, gestión energética, seguridad. En [13] se presenta un trabajo desarrollado en el área de Automatización de edificios, con ZigBee se realiza aplicaciones de control de acceso, sistemas de seguridad y control de iluminación, ventilación en edificios.

Finalmente, esta tecnología se usa en Control industrial realizando el rastreo de equipos, control de equipos, manejo de energía, como se presenta en [14].

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA PERSONAL (WPAN)

Las comunicaciones inalámbricas experimentaron un crecimiento muy importante dentro de la última década (GSM, IS-95, GPRS y EDGE, UMTS, y IMT-2000). Estas tecnologías permitieron una altísima transferencia de datos dentro de las soluciones de sistemas o redes inalámbricas.

La ventaja de las comunicaciones inalámbricas es que con la terminal la persona se puede mover por toda el área de cobertura, lo que no ocurre con las redes de comunicaciones fijas; esto permite el desarrollo de diferentes soluciones PAN y que cambian el concepto de los espacios personales. [15]

Las redes para espacios personales continúan desarrollándose hacia el concepto de redes dinámicas, el cual nos permite una fácil comunicación con los dispositivos que van adheridos a nuestro cuerpo o a nuestra indumentaria, ya sea que estemos en movimiento o no, dentro del área de cobertura de nuestra red.

PAN prevé el acercamiento de un paradigma de redes, la cual atrae el interés a los investigadores, y las industrias que quieren aprender más acerca de las soluciones avanzadas para redes, tecnologías de radio, altas transferencias de bits, nuevos patrones para celulares, y un soporte de *software* más sofisticado. Las tecnologías de redes inalámbricas personales requieren un extenso trabajo de investigación dado que son tecnologías en desarrollo y en constante cambio.

La PAN debe proporcionar una conectividad usuario a usuario, comunicaciones seguras, y QoS que garanticen a los usuarios. El sistema tendrá que soportar diferentes

aplicaciones y distintos escenarios de operación, y así poder abarcar una gran variedad de dispositivos. Este tipo de redes tendrán repercusiones tecnológicas y económicas muy importantes debido a su alta eficiencia y a los objetos hacia los que está orientada.

En 1999 el IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) creó el grupo de trabajo IEEE 802.15, dedicado específicamente al estudio de redes de área personal.

Las redes inalámbricas de área personal WPAN por sus siglas en inglés *Wireless Personal Area Network* son redes que comúnmente cubren distancias del orden de los 10 metros como máximo, normalmente utilizadas para conectar varios dispositivos portátiles personales sin la necesidad de utilizar cables. [16]

La concepción de estas redes surge como una consecuencia natural del proceso evolutivo en términos de acercar la red al usuario y de integrar todos los servicios en base a conseguir una automatización total del entorno de forma que se obtenga un esquema de comunicaciones y de monitorización completo en base a la misma infraestructura, aquí aparece el concepto de convergencia real entre informática, comunicaciones y control, que extiende el concepto de computación distribuida al usuario y modifica drásticamente el concepto tradicional de interface entre usuario y equipo comunicador/computador.

La tecnología WPAN es adecuada para el uso con dispositivos móviles pequeños, que funcionan con baterías, tales como teléfonos celulares, asistentes personales PDAs o cámaras digitales.

El nivel de excelencia de este tipo de red se debe a su potencial en términos de automatizar/virtualizar de manera global, completa y en base a la convergencia el entorno de la persona, de forma que el usuario pueda acceder a cualquier servicio que conforma ese entorno virtual de una manera transparente, es decir, sin la necesidad de conmutar de red/operador e incluso de equipo: se tiene así un concepto tecnológico universal y ubicuo que es lo que confiere ese enorme potencial.

De una forma resumida y no por orden de importancia, los retos de las WPANs aparecen en términos de: [17]

- Conseguir equipos con potencia extremadamente baja para evitar tener que recargar frecuentemente la batería.
- Deben ser de poco peso debido a que los equipos son portátiles y deben poder llevarse sin ningún esfuerzo para que la WPAN sea fiel a su concepción.
- Conseguir bajos costos por temas de mercado.
- Resolver el problema de las interferencias: la banda ISM (*Industrial Scientific Medical*) de 2,4 GHz donde funcionan las redes de área personal, actualmente es la banda utilizada por gran cantidad de equipos debido a que no se necesita licencia de operación para trabajar en esa banda.
- Conseguir interoperabilidad entre los diferentes equipos que aparecen en la red.
- Creación de contenidos.

2.2 DEFINICIÓN DE LAS REDES WPAN

Tradicionalmente se han utilizado cables de propósito específico para interconectar aparatos personales. Por lo que fue indispensable el desarrollo de soluciones para la interconexión de aparatos de forma inalámbrica.

Es importante que dicha solución inalámbrica no tenga un impacto importante en cuanto a la forma original, peso, requerimientos de energía, costos, facilidad de uso, etc.

Es así como nació la necesidad de crear una forma eficiente, rápida y confiable de hacer transiciones de información de forma inalámbrica. Dichas soluciones se basan en el concepto de WPAN “red inalámbrica de área personal” como se observa en la fig. 2.1.



Figura. 2. 1. WPAN (*Wireless Personal Area Network*)

La característica principal de este tipo de redes es que enfocan sus sistemas de comunicaciones a un área típica de 10 metros a la redonda que envuelve a una persona o a algún dispositivo ya sea que esté en movimiento o no. [18] Las redes inalámbricas de espacio personal son una forma de conectar varios dispositivos (ordenadores, internet, PDA, impresoras, fax etc.) que se encuentran a pocos metros de distancia entre sí. Este tipo de tecnología también procura hacer un uso eficiente de recursos, por lo que se han diseñado protocolos simples y lo más óptimos para cada necesidad de comunicación y aplicación.

En WPAN, el usuario es relacionado con los dispositivos electrónicos de su posesión, o en su proximidad en vez de a un lugar geométrico en particular o en alguna localidad de red. El término red de área personal (PAN) se concibió para describir estos diferentes tipos de conexión de red. La versión inalámbrica o desconectada de dicho concepto es el concepto de WPAN.

Una WPAN puede entenderse como una cápsula personal de comunicación alrededor de una persona. Dentro de dicha cápsula, que se mueve en la misma forma en que lo hace una persona, los dispositivos personales se pueden conectar entre ellos.

2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES WPAN

Existen principalmente cuatro grupos de trabajo para la tecnología WPAN, en la tabla 2.1 y 2.2 se muestra cada uno de ellos con características e intereses específicos que generan estándares que satisfacen necesidades específicas de comunicación. [19]

- El grupo de trabajo 802.15.1 ha realizado un estándar basado en las especificaciones de la fundación Bluetooth. Este grupo de trabajo publicó el estándar IEEE 802.15.1 el 14 junio de 2002.
- El grupo de trabajo 802.15.2 está desarrollando un modelo de coexistencia entre las WLAN y WPAN, así como de los aparatos que las envuelven.
- El grupo de trabajo 802.15.3. Está trabajando para establecer los estatus y publicar un estándar nuevo (publicado en junio de 2003) de alta velocidad (20 Mbps o mayores) para WPANs. Además de ofrecer una alta velocidad de transmisión, este nuevo estándar se está diseñando para consumir poca energía y ofrecer soluciones a bajos costos así como aplicaciones multimedia.
- El grupo de trabajo T4 para el desarrollo IEEE 802.15.4, investiga y desarrolla soluciones que requieren una baja transmisión de datos y con ello una duración en las baterías de meses e incluso de años así como una complejidad relativamente baja. Dicho grupo de trabajo ha publicado el estándar que lleva su nombre; IEEE 802.15.4.

Tabla. 2. 1. Grupos de Trabajo WPAN

Tecnología	Rango de datos	Potencia de salida	Rango (metros)	Banda de frecuencia	Técnica de modulación	Canales
802.15.1	1-2 Mbps	100 mW	Hasta 100	2.4 GHz	GFSK	78
802.15.3	11, 22, 33, 44 o 55 Mbps	6 mW	20	2.4 GHz	QPSK DQPSK	3 o 4
802.15.3a	100-500 Mbps	1 mW	10	3.1-10.6 GHz	(por definir)	(por definir)
802.15.4	20, 40 o 250 kbps	1 mW	De 10 a 20	2.4 GHz	BPSK	26

Tabla. 2. 2. Comparación de los estándares

Tecnología	Complejidad	Costo	Eficiencia	Compatibilidad	Convivencia
802.15.1	Media-Baja	Bajo	Mediana	Muy buena	WLAN, Wi-Fi
802.15.3	Alta	Medio	Alta	Muy buena	WLAN, Wi-Fi
802.15.3a	Alta	Bajo-Medio	Muy alta	Por definir	Por definir
802.15.4	Muy baja	Muy bajo	Muy alta	Muy buena	WLAN, Wi-Fi

2.3.1 Grupo de trabajo 802.15.1

El grupo de trabajo IEEE 802.15.1 [16] [20] fue aprobado como un nuevo estándar por la IEEE *Standard Association* (IEEE-SA) el 15 de abril de 2002 y se lo publicó el 14 de junio del mismo año. En noviembre de 2004 el SIG aprobó lo que será *Bluetooth 2.0 EDR (Enhanced Data Rate)*, el cual presenta una velocidad de transmisión de 3 Mbps y un alcance de hasta 100 metros.

Bluetooth es el nombre común de la especificación industrial IEEE 802.15.1, que define un estándar global de comunicación inalámbrica. El principal mercado es la transferencia de datos y voz entre dispositivos y computadoras personales como se observa en la figura. 2.2.; es una tecnología de radiofrecuencia (RF) que trabaja en la banda de 2.4 GHz y utiliza salto de frecuencia para expansión del espectro.

Bluetooth intenta proveer ventajas sobre otras tecnologías inalámbricas similares tales como IEEE 802.11 y *HomeRF*, claros competidores en aplicaciones que requieren transmisión de datos.

IrDA es una tecnología muy popular para conectar periféricos, pero es limitada severamente a conexiones de cortas distancias en rangos de un metro por la línea de vista requerida para la comunicación.

principales fabricantes de los sectores de las telecomunicaciones y la informática, tales como: Ericsson, Nokia, Toshiba, IBM, Intel y otros.

- **Características generales de Bluetooth**

Sus principales características son:

- Opera en la banda de 2,4 GHz con una tasa binaria máxima de 720 kbps.
- Utiliza expansión del espectro con saltos en frecuencia (*Frequency Hopping*), lo cual especifica 1600 saltos por segundo entre 79 frecuencias.
- Utiliza modulación GFSK (modulación FSK con un filtrado gaussiano).
- Usa duplexación en el tiempo TDD.
- Soporta hasta ocho dispositivos en una *piconet* (un maestro y siete esclavos).
- Tiene dos tipos de transferencia de datos entre dispositivos: los orientados a conexión de tipo síncrono (SCO, *Synchronous Connection Oriented*) y los no orientados a conexión de tipo asíncrono (ACL, *Asynchronous Connectionless*).
- Las *piconets* pueden combinarse para formar lo que se denominan *scatternets*.
- La potencia de transmisión está comprendida entre 0 dBm (dispositivos de Clase 3) y 20 dBm (dispositivos de Clase 1).
- El control de potencia es obligatorio para los dispositivos de Clase 1, y opcional para el resto.
- Presenta un canal asíncrono, fundamentalmente utilizado para transmisión de datos.
- Canales síncronos, fundamentalmente utilizados para servicios que requieran calidad, sobre todo para servicios de voz.
- Tiene combinación de canales uno síncrono y otro asíncrono (Formato de paquete DV), formato de paquete DV: cada paquete tiene una parte de voz que no lleva corrección de errores y una de datos que sí lleva.

Bluetooth fue diseñado para operar en un entorno de radio frecuencia ruidoso y para ello utiliza un esquema de reconocimiento rápido y saltos de frecuencia para garantizar la robustez del enlace.

Este sistema opera en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, libre para ISM (Industrial, Científica, Médica); exactamente comenzando en 2.402 GHz y acabando en 2.4835 GHz. Con canales RF de $f = 2402 + k$ MHz siendo $k = 0.78$.

El espacio entre canales es de 1 MHz, no obstante es necesario tener unos márgenes de protección respecto al ancho de banda de trabajo, así pues, el límite superior de protección es de 2 MHz y un límite inferior es de 3,5 MHz.

La distancia nominal del enlace está comprendida entre 10 cm y 10 m, pero se puede aumentar a más de 100 m elevando la potencia de transmisión.

La modulación que emplea Bluetooth es GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*). Este tipo de modulación permite un bajo coste.

2.3.2 Grupo de trabajo 802.15.2

El IEEE 802.15.2 [16] [20] es acerca de la coexistencia de sistemas inalámbricos trabajando en bandas de frecuencia que no necesitan licencia. Es una interrelación entre los estándares IEEE 802.11b y IEEE 802.15. Como ambos estándares operan en la misma banda, hay interferencia mutua entre los dos sistemas que pueden producir degradación en el rendimiento de los dispositivos. Existen muchos factores que producen interferencia como son: la cantidad de datos que fluye en cada una de las dos redes, los niveles de potencia de los dispositivos y los diferentes tipos de información con diferentes niveles de sensibilidad. Las metas de este grupo de trabajo son:

- Cuantificar los efectos de la interferencia entre dispositivos WPAN y WLAN.
- Establecer mecanismos de coexistencia entre una WPAN y WLAN.

Estos mecanismos pueden ser categorizados como: colaborativos y no colaborativos. Con lo que se evalúa la degradación en la sensibilidad de recepción y la reducción de la velocidad efectiva ante la interferencia.

-
- Colaborativos: en este caso las colisiones pueden ser evitadas si los sistemas inalámbricos son capaces de compartir información en tiempo real acerca del estado de su transmisión (velocidad de transmisión, latencia, potencia). Puede existir intercambio de información entre las dos redes inalámbricas (por ejemplo, cuando el mismo equipo es 802.15.1 y 802.11b)
 - No colaborativos: en este caso las colisiones pueden ser completamente evitadas mediante técnica de censado (mirar antes de cruzar). Con lo que se evalúa la degradación en la sensibilidad de recepción y la reducción de la velocidad efectiva ante la interferencia.

2.3.3 Grupo de trabajo 802.15.3

El estándar IEEE 802.15.3 [16] [20] [21] surgió de la necesidad de formar WPAN que fuera capaz de transmitir datos de manera rápida y eficiente.

Es así, que la IEEE autoriza en diciembre de 1999 la creación del grupo de trabajo IEEE 802.15.3 quien fue el encargado de publicar en Agosto de 2003 el primer borrador de dicho estándar, en el que se especifican (como en todos los estándares de la familia 802.11, 802.15, 802.16, etc.) los requerimientos en la capa física (PHY) y para el control de acceso a medios (MAC).

• Características

- El grupo de trabajo IEEE 802.15.3 se preocupó en desarrollar un estándar que fuera barato en su implementación y en sus costos de operación, por lo que este estándar es poco complejo.
- Trabaja en la banda libre ISM de los 2,4 GHz, en la misma banda libre que el 802.11, pero pueden coexistir en un mismo ambiente debido a que los sistemas 802.15.3 causan menos interferencia pues ocupan un ancho de banda menor y transmiten con menos potencia.
- Los rangos de velocidades de transmisión definidos para este estándar son: 11, 22, 33, 44 y 55 Mbps.

- Los canales tienen un ancho de banda de 15 MHz.
- La potencia de transmisión de datos es aproximadamente de 8 dBm, para un rango aproximado de 30 a 50 metros.

- **El estándar IEEE 802.15.3a ó UWB**

UWB (*Ultra Wideband* o banda ultra ancha) [16] [21] es una tecnología inalámbrica para la transmisión de información entre dispositivos electrónicos de consumo, periféricos de PC y dispositivos móviles, dentro de un ámbito determinado y limitado, a muy alta velocidad y con un consumo reducido de energía, estos dispositivos se observan en la figura. 2.3. UWB promete revolucionar las redes caseras en los hogares, teniendo aplicaciones tales como bajar imágenes de una cámara digital hacia una computadora, distribuir señales de alta densidad de televisión (HDTV) de un receptor a múltiples aparatos de televisión a lo largo de una casa, conectar impresoras a una computadora, remplazar cualquier cable de información (no de energía) en el perímetro de un cuarto de una casa, oficina, escuela, hospital, industria, etc.

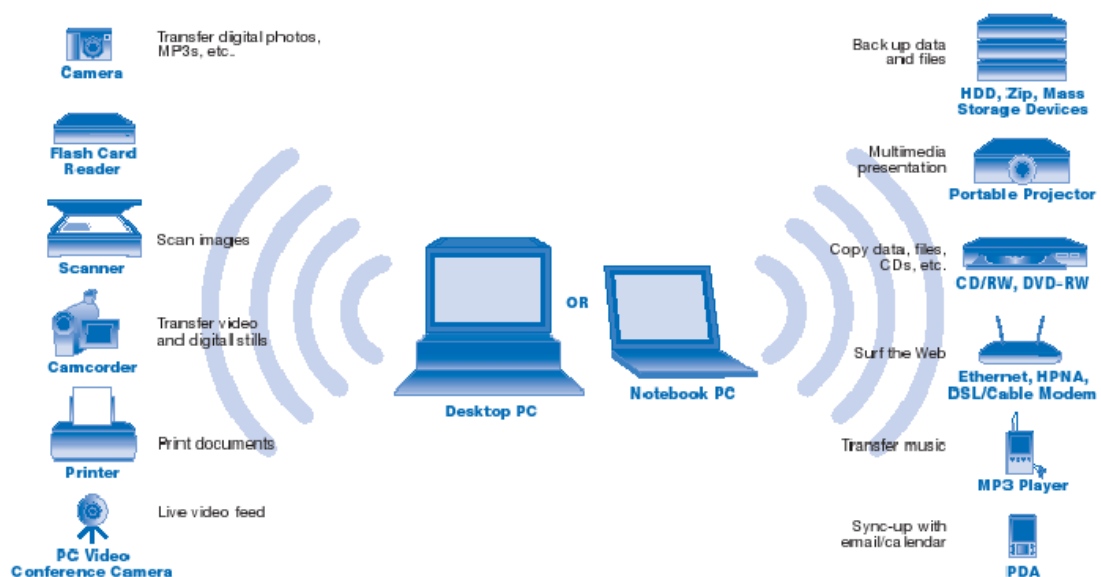


Figura. 2. 3. Dispositivos electrónicos de consumo UWB

De esta forma UWB se establece como una solución ideal para la transferencia inalámbrica de contenido multimedia a alta velocidad. Esta tecnología usa banda ancha del espectro de frecuencia de radio para transmitir datos dentro de un alcance limitado (dentro de hogares domésticos o en una pequeña oficina) y permite mayores cantidades de información.

UWB tiene su correspondiente estandarización internacional bajo la norma IEEE 802.15.3a la cual es la tecnología de radiofrecuencia con velocidad mínima de 110 Mbps a 10 metros y una máxima de 480 Mbps a distancias inferiores a un metro.

El sistema está diseñado para ser aplicado de manera similar a *Bluetooth* como tecnología PAN. A diferencia de los sistemas inalámbricos de datos existentes, UWB es un sistema de espectro abierto, siendo que los datos son codificados en pulsaciones emitidas a través de una amplia gama de frecuencias. Con ello se pretende cubrir la demanda de comunicaciones de banda ancha en tiempo real para aplicaciones dentro del hogar como videos o *streaming* de audio. UWB no es un desarrollo surgido de la noche a la mañana, lejos de eso tan solo se lo limito a aplicaciones militares, pero con el tiempo su uso ya es de explotación comercial.

Las ventajas de las UWB son muchas. Por ejemplo, los dispositivos que trabajen con UWB pueden hacerlo en ambientes ruidosos, la resistencia de estas señales radica en su gran ancho de banda ya que en caso de ruido sólo se afecta una parte de la señal y como los niveles de potencia son tan bajos no causan interferencia a otros dispositivos que operen dentro del mismo rango de frecuencias.

- **El estándar IEEE 802.15.3b**

El IEEE 802.15.3b [16][20] está trabajando en una enmienda de la 802.15.3 para mejorar la implementación y la interoperabilidad del MAC (*Medium Access Control*). Esto incluirá las optimizaciones menores con la preservación de la compatibilidad con versiones anteriores. Además, esta enmienda corregirá errores y aclarará las ambigüedades.

- **El estándar IEEE 802.15.3c**

Este grupo de trabajo [16] se formó en marzo de 2005 y trabaja en el desarrollo de una PHY alternativa basada en ondas milimétricas para el estándar 802.15.3.

Esta WPAN operará en la nueva banda no regulada que se extiende en el rango de 57-64 GHz, que además no ha sido utilizada hasta la fecha, definida por FCC 47 CFR 15.255. Permitirá una coexistencia muy alta con todos los sistemas de microondas en la familia 802.15.

Además, exhibirá tasas de transmisión muy elevadas, de más de 2 Gbps, de forma que aplicaciones tales como acceso a Internet de banda ancha y *streaming* (televisión digital, cine en casa, etc.) en tiempo real y proporcionará un bus de datos inalámbrico como alternativa a los cables. También se ofrecerán tasas de transferencia alternativas por encima de 3 Gbps.

2.3.4 Grupo de trabajo 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 [16] define las características de la capa física y de la capa de control de acceso al medio (MAC) para redes inalámbricas de área personales (WPAN, *Wireless Personal Area Networks*) de baja tasa de transmisión. Las ventajas de utilizar el estándar IEEE 802.15.4 es que permite la utilización de dispositivos de fácil instalación que proveen transmisiones confiables a distancias cortas a un precio muy bajo. Por otro lado, el estándar IEEE 802.15.4 permite proporcionar un tiempo de vida razonable al utilizar fuentes de energía limitada (por ejemplo, las baterías alcalinas) y al mismo tiempo proporciona una pila de protocolo que es simple y sencilla.

- **Características**

Las características generales del estándar de comunicación IEEE 802.15.4 se muestran en la tabla 2.3 y son:

- Tasas de transferencias de 250Kb/S, 40Kb/S y 20Kb/S.

- Manejo de redes en estrella y malla (*peer-to-peer*).
- Direccionamiento corto con 16 bits y extendido con 64 bits.
- Garantía del manejo de las ranuras de tiempo (GTS, *guaranteed time slot*).
- Detección de los niveles de energía recibidos (ED, *energy detection*).
- Indicadores de calidad en el enlace así como de conmutación de canales para recibir paquetes (LQI, *link quality indication*).
- Acceso al canal por CSMACA (CCA, *clear channel assessment*).

Tabla. 2. 3. Características del IEEE 802.15.4.

Propiedad	Rango
Rango de transmisión de datos	868 MHz: 20 kbps; 915 MHz: 40 kbps; 2.4 GHz: 250 kbps.
Alcance	10 – 20 m
Latencia	Debajo de los 15 ms
Canales	868/915 MHz: 11 canales 2.4 GHz: 16 canales
Bandas de frecuencia	Dos PHY: 868/915 MHz y 2.4 GHz
Direccionamiento	Cortos de 8 bits o 64 bits IEEE
Canal de acceso	CSMA-CA y CSMA-CA ranurado
Temperatura	El rango de temperatura industrial: -40° a +85 ° C

2.4 MODELO ISO-OSI vs. MODELO 802.15

Dado que las redes actuales funcionales de comunicación tienen como modelo de referencia al ISO-OSI es prudente ver en la tabla 2.4 la relación por capas o niveles de comunicación que este tiene con el modelo IEEE 802 [16].

Tabla. 2. 4. Modelo ISO-OSI vs. Modelo 802.15.

	Modelo ISO-OSI	Modelo IEEE 802.15
7	Capa de aplicación	Capas superiores
6	Capa de presentación	
5	Capa de sesión	
4	Capa de transporte	
3	Capa de red	
2	Capa de enlace de datos (DLL)	Control de enlace lógico (LLC)
1		Control de acceso a medios (MAC)
	Capa física	Capa física (PHY)

CAPITULO III

ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA INALÁMBRICA IEEE 802.15.4/ZIGBEE

3.1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, hemos vivido una gran expansión de dispositivos de control remoto en nuestra vida diaria. Hace unos años, los mandos de TV por infrarrojos eran los únicos dispositivos de control remoto en nuestros hogares. Ahora nos quedamos sin dedos de la mano para contar todo lo que podemos controlar remotamente en nuestra casa: la TV, cadena de música, aire acondicionado, DVD, video, cámara digital, Home Cinema, Satélite, abrir las puertas del coche, el mando del garaje, la alarma, etc. Para interactuar remotamente con todos estos dispositivos, necesitamos trabajar con un solo estándar para poder tenerlos todos bajo una misma red, específicamente en nuestro hogar. Uno de los estándares más prometedores es IEEE 802.15.4. [16] [22] [23]

802.15.4 es una tecnología inalámbrica de bajo consumo, baja tasa de transmisión y coste reducido. El estándar define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (*low-rate wireless personal area network*, LR-WPAN). El estándar ha sido definido por la *ZigBee Alliance* cuya insignia se observa en la fig. 3.1.



Figura. 3. 1. La insignia de la Alianza ZigBee

La alianza ZigBee es un consorcio no lucrativo de más de 100 compañías, incluyendo *Invensys*, *Mitsubishi Electric*, y *Motorola*. La alianza ZigBee es una asociación de compañías que trabajan en forma conjunta para posibilitar productos confiables,

económicos, de bajo consumo, interconectados mediante red inalámbrica, de monitoreo y control, basados en un estándar global abierto. Los miembros de la alianza ZigBee son proveedores y fabricantes de tecnología del mundo entero. [24]

El enfoque principal fue desarrollar dispositivos para aplicaciones diferentes, las cuales proveerán al usuario soluciones inalámbricas que son rentables, fáciles de utilizar, altamente confiables y seguras.

La alianza ZigBee recurrió el estándar IEEE 802.15.4 como base para desarrollar las capas inferiores del protocolo ZigBee, permitiendo utilizar una topología de red tan variada como el número de aplicaciones que pueden llegar a ser imaginadas e incluye características de seguridad mediante algoritmos empotrados.

3.2 MISIÓN DE LA ALIANZA ZIGBEE

La misión de la Alianza ZigBee es ofrecer al consumidor máxima flexibilidad, movilidad y facilidad de uso mediante la construcción de la inteligencia wireless incorporada en los dispositivos cotidianos. [25]

La tecnología ZigBee será incorporada en una amplia gama de productos y aplicaciones orientadas a los consumidores en diversas áreas: comercial, industrial y gobierno en mercados de todo el mundo.

Por primera vez, las empresas tendrán un estándar inalámbrico para optimizar necesidades únicas de monitoreo remoto y aplicaciones de control, incluyendo sencillez, fiabilidad, bajo costo y baja potencia.

3.3 PROPÓSITO DE ZIGBEE

El propósito de ZigBee es crear un lenguaje wireless global, es decir dar voz a los dispositivos que nos rodean y usamos en la vida cotidiana y permitir que se comuniquen de forma segura, con baja tasa de transferencia y maximización de la vida útil de sus baterías.

3.4 MOTIVACIÓN PARA LA CREACIÓN DEL ESTANDAR

Nace para brindar una solución para comunicaciones inalámbricas de bajo coste y consumo, solucionando los problemas de interoperabilidad y duración de la batería.

3.5 ORIGEN DEL NOMBRE ZIGBEE

ZigBee debe su nombre a que el sistema de comunicación empleado es muy parecido al movimiento en zigzag que utilizan las abejas para comunicarse. La técnica que las abejas utilizan para comunicar una nueva fuente de alimento usa un sistema silencioso pero poderoso de comunicación. La supervivencia, éxito, y futuro de la colonia dependen de la comunicación continua entre cada miembro. [26]

A través del movimiento zigzag comparten la información de situación, distancia, y dirección del alimento recientemente descubierto con sus compañeras. Es decir, ZigBee trata de emular la coordinación de la comunicación y actividad de distintos individuos para poder actuar en conjunto para tareas más complejas. Al ver que este estándar guarda similitud con una colonia de abejas se decidió bautizar a esta tecnología como ZIGBEE, *Zig* por la manera que usan las abejas para comunicarse entre si y *Bee* por abeja.

3.6 ESTÁNDAR ZIGBEE

El término ZigBee describe un protocolo inalámbrico normalizado para la conexión de una Red de Área Personal Inalámbrico o WPAN.

ZigBee es diferente de los otros estándares inalámbricos, ha sido diseñado para soportar un diverso mercado de aplicaciones con una conectividad más sofisticada que los anteriores sistemas inalámbricos. El estándar enfoca un segmento del mercado no atendido por los estándares existentes, con baja tasa de transmisión de datos, bajo ciclo de servicio de conectividad y bajo costo.

La razón de promover un nuevo estándar, es para permitir la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por compañías diferentes. ZigBee es un estándar donde el estándar

IEEE 802.15.4 solo contempla la capa PHY (*Physical Layer*) y MAC (*Medium Access Control*); la capa NWY (*Network Layer*) y APS (*Application Layer*) han sido establecidas por la Alianza ZigBee.

3.6.1 Características Generales

El protocolo ZigBee/ IEEE 802.15.4 ofrece las siguientes características:

- Doble capa física (2.4 GHz y 868/915 MHz).
- Velocidad de datos 250 kbps (2.4 GHz), 40 kbps (915 MHz) y 20 kbps (868 MHz).
- Bajo consumo de energía y optimización debido a su bajo ciclo de trabajo (1%).
- El método de acceso al canal es CSMA/CA.
- Baja tasa en la transmisión de datos para dispositivos como sensores debido a su bajo ciclo de trabajo.
- Múltiples topologías: *star*, *cluster tree*, *mesh*.
- GTS (*Guaranteed Time Slots*) opcional para aplicaciones que requieren baja latencia.
- Rango: 10 a 75 m
- Bajo costo en los dispositivos, la instalación y el mantenimiento.
- Los dispositivos ZigBee extenderán la vida de las baterías, las mismas que no necesitarán recarga sino hasta varios años después. La simplicidad de ZigBee permite la creación de redes que requieren poco mantenimiento.
- Redes de alta densidad de nodos. ZigBee permite que las redes manejen hasta 2^{16} dispositivos. Este atributo es fundamental para la creación de series masivas de sensores y redes de mando.
- Presenta un *stack* de protocolos simple. Se estima que el *stack* de ZigBee es aproximadamente $\frac{1}{4}$ del *stack* de protocolos de *Bluetooth* u 802.11. Siendo esta simplicidad esencial para el costo, interoperabilidad, y mantenimiento.
- Implementación global. La capa física del IEEE 802.15.4 adoptada por ZigBee se ha diseñado para la banda de 868 MHz en Europa, la banda de 915 MHz en Norte América, Australia, etc.; y la banda de 2.4 GHz que es reconocida como una banda global aceptada en casi todos los países.

3.6.2 Funciones del estándar ZigBee

- **Búsqueda de red (*Network Scan*)**, Es la capacidad de un dispositivo de sondear canales dentro de su rango de comunicaciones. Este rango es llamado a menudo POS (*Personal Operating Space*).
- **Creación de una red PAN (*Creating*)**, Es la capacidad de construir una red sobre canales sin utilizar, en el POS.
- **Descubrimiento de dispositivos (*Device Discovery*)**, Es la capacidad de identificar los dispositivos en una PAN.
- **Descubrimiento de servicio (*Service Discovery*)**, Es la capacidad de determinar que características o servicios son soportados en los dispositivos dentro de una red.
- **Unión (*Binding*)**, Es la capacidad de comunicarse a nivel de capa aplicación con otros dispositivos en la red.
- **Asociación y Disociación de dispositivos (*Joining and leaving a network*)**, Es la habilidad de ganar nuevos miembros para la red y el proceso para que los miembros dejen la red.
- **Configuración de un nuevo dispositivo (*Configuring a new device*)**, La habilidad de configurar el *stack* para operaciones requeridas.
- **Direccionamiento (*Addressing*)**, La habilidad de un coordinador ZigBee para asignar direcciones a dispositivos nuevos en la red.
- **Sincronización en una red (*Synchronization within a network*)**, La habilidad de un dispositivo para lograr la sincronización con otro dispositivo a través del envío de tramas *beacon* o mediante poleo (*polling*).
- **Seguridad (*Security*)**, Aplicando seguridad a las tramas transmitidas y retirando la seguridad a las tramas recibidas.
- **Asignación de ruta (*Routing*)**, Enrutamiento de tramas a sus direcciones establecidas.

3.7 STACK ZIGBEE

La arquitectura ZigBee está basada en el modelo de referencia OSI (*Open Systems Interconnection*), definiendo solamente aquellas capas relevantes para lograr la funcionalidad deseada y garantizar la compatibilidad entre los dispositivos. Es una pila de

protocolos que permite la comunicación de forma sencilla entre múltiples dispositivos. Las capas básicas, física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) están definidas por el estándar IEEE 802.15.4, LR-WPAN (*Low Rate – Wireless Personal Area Network*). Este estándar fue diseñado pensando en la sencillez de la implementación y el bajo consumo, sin perder potencia ni posibilidades.

El estándar ZigBee amplía el estándar IEEE 802.15.4 aportando una capa de red (NWK) que gestiona las tareas de enrutado y de mantenimiento de los nodos de la red; y un entorno de aplicación que proporciona una subcapa de aplicación (APS) que establece una interfaz para la capa de red, y los objetos de los dispositivos tanto de ZigBee como del diseñador.

Así pues, los estándares IEEE 802.15.4 y ZigBee se complementan proporcionando una pila completa de protocolos como se muestra en la fig. 3.2 y que permiten la comunicaciones entre multitud de dispositivos de una forma eficiente y sencilla.

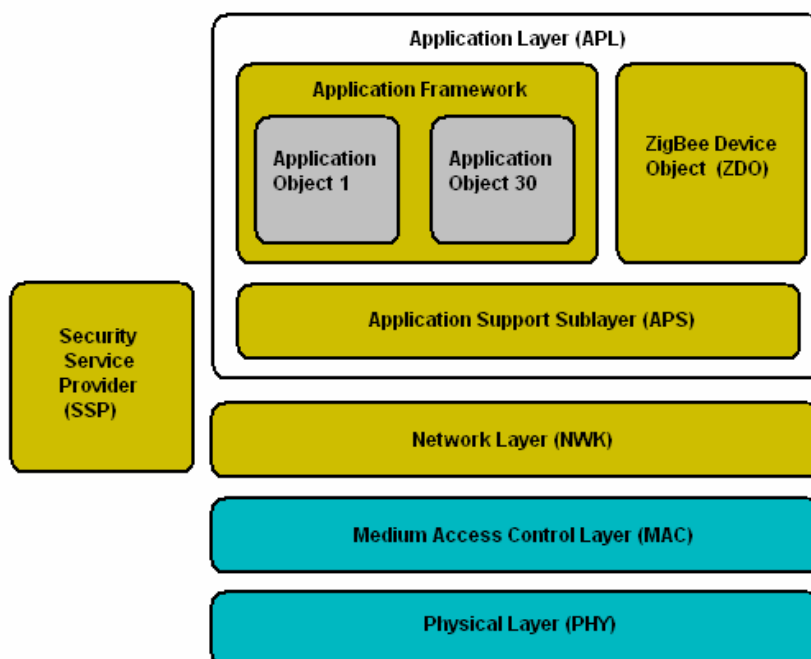


Figura. 3. 2. Stack de protocolos ZigBee

3.8 APPLICATION LAYER (APL)

La capa de aplicación ZigBee consiste en la subcapa *Applications Supports (APS)*, *ZigBee Device Object (ZDO)* y la *Application Object* (objeto de aplicación) definidos por el fabricante. [22]

3.8.1 *Application Framework (AF)*

Application Framework es el ambiente en el cual se encuentran los objetos aplicación, mismos que envían y reciben datos a través del *APSDE service access point (APSDE-SAP)*.

El entorno de aplicación (AF) y sus objetos tienen la responsabilidad de procesar los datos propios de la aplicación.

Un objeto aplicación está definido por el fabricante que implementa esta aplicación. El *stack* de protocolos ZigBee soporta hasta 30 objetos aplicación que pueden ser ejecutados al mismo tiempo.

3.8.2 *Application Supports (APS)*

APS provee un interfaz entre NWK y APL a través de servicios utilizados por ZDO y objetos aplicación. El servicio lo proveen dos entidades:

- *APS data entity (APSDE)* a través del *APSDE service access point (APSDE-SAP)*.
- *APS management entity (APSME)* a través del *APSME service access point (APSME-SAP)*.

La responsabilidad de la APS es brindar un conjunto general de servicios para el uso de las subcapas AF, incluyendo servicios para el mantenimiento de tablas para *'binding'*, que es la habilidad para relacionar dos dispositivos basados en sus servicios y necesidades, y el envío de mensajes entre ellos. Mejora la fiabilidad de la capa de red.

El APSDE provee el servicio de transmisión de datos entre dos o más dispositivos localizados en la misma red. El APSME provee servicios de descubrimiento y unión de dispositivos y mantiene actualizada una base de datos del manejo de objetos, conocido como el *APS information base* (AIB).

3.8.3 ZigBee Device Object (ZDO)

La función de esta subcapa es definir el rol del dispositivo dentro de la red (ya sea coordinador o de dispositivo final), iniciando o respondiendo a las peticiones y estableciendo una conexión segura entre los dispositivos de la red. Además, el ZDO identifica los dispositivos que se encuentran a un salto en la red (dispositivos vecinos) y los servicios que ofrecen.

3.9 NETWORK LAYER (NWK)

La capa de red se construye sobre las características de la capa MAC del estándar IEEE 802.15.4, para permitir una mayor cobertura de la red con lo que nuevas redes podrían ser adicionadas para consolidarse o dividirse según la aplicación que se requiera. El *stack* de protocolos de ZigBee es relativamente simple comparando con otros *stacks* de protocolos de comunicaciones.

A nivel de red, existen dos tipos de direcciones: direcciones cortas (16 bits) y direcciones largas o direcciones IEEE (64 bits). Cada dispositivo debe tener asignada una dirección IEEE única. No puede haber dos dispositivos que cumplan con la especificación ZigBee y que posean la misma dirección IEEE.

Así, esta dirección es asignada en el momento de la fabricación del dispositivo. Por contra, la dirección corta es asignada por la capa de red de forma dinámica. Dentro de una red ZigBee no puede haber más de un dispositivo con igual dirección corta.

3.9.1 Tipos de dispositivos

- **Full function device (FFD)**

Es un dispositivo que posee una funcionalidad completa y se apoya en las funciones y características del estándar IEEE 802.15.4. Un FFD puede soportar los siguiente modos de operación: [22]

- Un coordinador PAN: es el principal controlador de la PAN, este dispositivo identifica a su propia red a la cual otros dispositivos pueden asociarse, proveyéndoles una sincronización global.
- Un simple dispositivo: es un dispositivo que puede actuar como ruteador o como dispositivo final.

- **Reduced function device (RFD)**

Un RFD es un dispositivo que opera con la mínima implementación del protocolo IEEE 802.15.4 con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. [22] Estos dispositivos no tienen la necesidad de enviar grandes cantidades de información ya que solo está previsto para aplicaciones extremadamente simples. Además solo pueden asociarse a un FFD a la vez. Además:

- FFD requiere 16 KB a 20 KB de memoria.
- RDF requiere 12 KB a 16 KB de memoria.

3.9.2 Arquitectura de la red

La arquitectura de la red en ZigBee define tres topologías de red. Una red típica de ZigBee se observa en la fig. 3.3. El máximo número de dispositivos que se puede tener es de 2^{64} (más del que probablemente necesite), y se puede configurar una red con un máximo de 65.000 (2^{16}) dispositivos. La formación y la asociación de la red están basadas en algunas suposiciones.

Los dispositivos son preprogramados para su función de red. Los dispositivos finales siempre trataran de asociarse a una red existente. Los coordinadores siempre trataran de encontrar un canal sin usar en la red. Los dispositivos descubren otros dispositivos y se asociaran a la red para proveer servicios complementarios. Por ejemplo, un dispositivo de control de luz ZigBee descubrirá solamente una red ZigBee de alumbrado, porque esto es lo que comprende. Sin embargo, los dispositivos pueden ser programados para funcionar en diferentes tipos de red.

- Red + identificador del dispositivo (topología de estrella).
- Identificador de origen/destino (topología *peer-peer* o *mesh*).
- *Cluster tree* origen/destino + identificador del dispositivo (topología *cluster tree*).

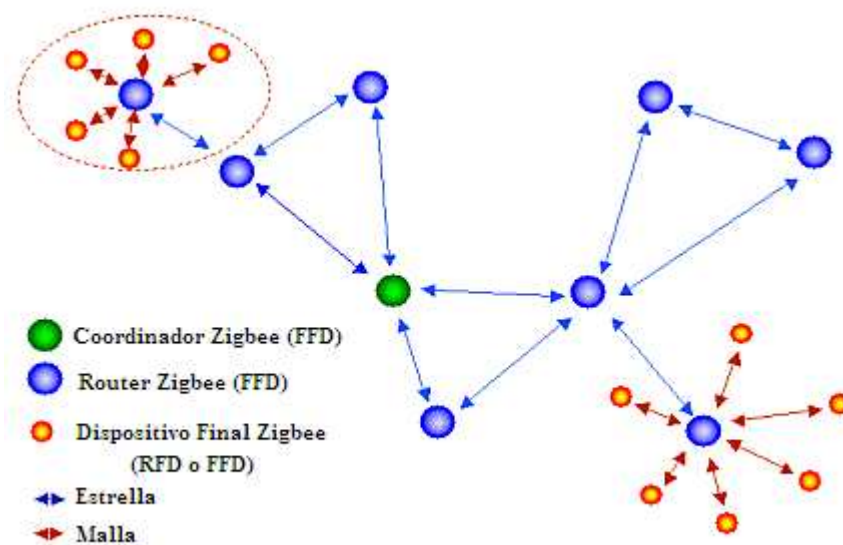


Figura. 3. 3. Red típica de ZigBee

3.9.3 Topologías de Red

Antes de describir los distintos tipos de redes ZigBee es necesario definir los 3 tipos distintos de dispositivos que la componen. Estos son: [22]

- Coordinador. Este dispositivo inicializa y controla la red. También se encarga de gestionar las tareas de seguridad. Para poder formar una red ZigBee debe existir un coordinador.
- Router. Estos dispositivos son los encargados de extender la cobertura de la red, gestionando nuevos caminos en el caso de que la red experimente congestión o se produzca la caída de algún nodo. Pueden conectarse directamente al coordinador o a otros routers. Gestionan dispositivos hijo.
- Dispositivo final. Este tipo de dispositivo puede enviar y recibir datos pero no realizar tareas de encaminamiento. Deben estar conectados a un router o al coordinador y no admiten dispositivos hijo.

Las especificaciones de este estándar permiten tres diferentes topologías de red que pueden ser implementadas dependiendo de la aplicación y estas son:

- **Topología en estrella**

Este tipo de redes se componen por un FFD funcionando como coordinador y varios FFD o RFD funcionando como dispositivos finales como se observa en la fig. 3.4. Todos los dispositivos finales están directamente conectados al coordinador, que es el encargado de haber iniciado la red eligiendo un identificador de red y de gestionarla. En una red tipo estrella todas las comunicaciones entre dos dispositivos finales deben pasar antes por el coordinador, es decir debe enviar su información al coordinador PAN, el cual enviará esta información al dispositivo correspondiente. [22]

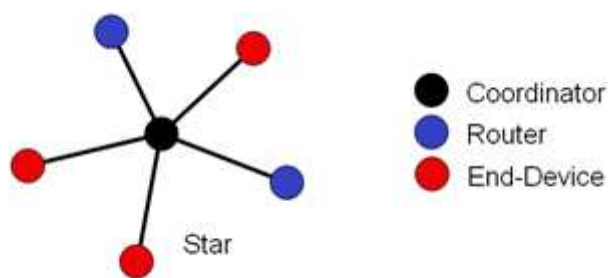


Figura. 3. 4. Topología en estrella

- **Topología *cluster tree***

En esta topología de red se tiene la asociación de varias redes como se observa en la fig. 3.5 y en donde el coordinador PAN forma el primer cluster y se establece a si mismo como *Cluster Head* (CH) con su respectivo *Cluster Identifier* (CID) igual a cero, elije un identificador PAN y envía tramas *beacons* a todos los dispositivos vecinos.

Los mensajes enviados por un dispositivo final serán procesados por el coordinador o por un router intermedio dependiendo del destinatario. Los routers desempeñan dos funciones. La primera es incrementar el número de nodos que se pueden asociar a la red. La segunda extender el rango físico de la red de manera que no todos los dispositivos tengan que estar en el rango del coordinador. [22]

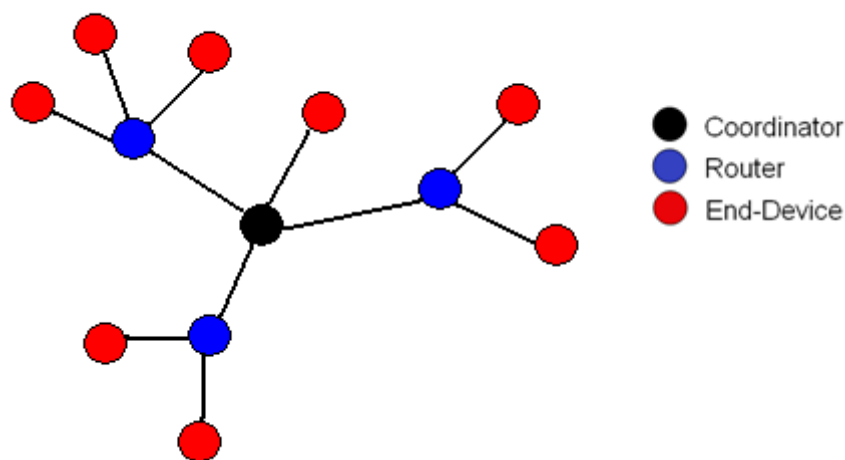


Figura. 3. 5. Topología Cluster-Tree

- **Topología *mesh***

En esta configuración hay conectividad total de todos los FFDs que conforman la red con el FFD que actúa como coordinador PAN como se observa en la fig. 3.6.

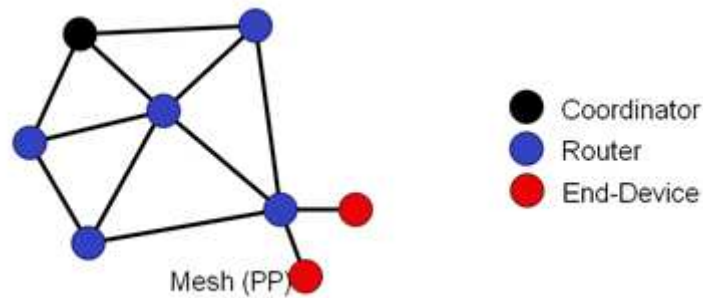


Figura. 3. 6. Topología Mesh

Los RFDs pueden también participar en la red pero hay solamente conectividad con los FFD y no pueden participar en enrutamiento. Las ventajas de esta topología son la baja latencia y la alta confiabilidad. A cambio, se requiere mayor memoria de programa y datos en un dispositivo para soportarlo. [22]

3.9.4 Ruteo de la Red

La capa red utilizar tres algoritmos de ruteo:

- **Algoritmo de ruteo AODV (*Ad Hoc On-Demand distance Vector*)**

Una de las características que defiende AODV es el uso de tablas de encaminamiento en cada nodo para evitar transportar información de rutas en los paquetes. Cada destino de la tabla de encaminamiento lleva asociado un número de secuencia y un temporizador o *lifetime*.

Este número permite distinguir entre información nueva e información antigua, de tal manera que se evita la transmisión de rutas antiguas o caducadas por la red. La función del temporizador es evitar que los papeles recorran indefinidamente por la red si no han encontrado su destino.

AODV no mantiene rutas para cada nodo de la red. Estas rutas son descubiertas según se vayan necesitando. AOVD es capaz de proveer transmisión *unicast*, *multicast* y

broadcast. Los descubrimientos de rutas son siempre bajo demanda y siguen un ciclo de petición/respuesta de ruta. Las peticiones son enviadas usando un paquete especial denominado RREQ (*Route Request*).

A su vez, las repuestas son enviadas en un paquete denominado RREP (*Route Reply*). A continuación se resume la secuencia de pasos para descubrir una ruta:

- Cuando un nodo desea conocer una ruta hacia un nodo destino, envía por *broadcast* un RREQ.
- Cualquier nodo que conozca una ruta hacia el destino solicitado (incluido el propio destino) puede contestar enviando una RREP.
- Esta información viaja de vuelta hasta el nodo que originó el RREQ y sirve para actualizar las rutas de los nodos que lo necesiten.
- La información recibida por el nodo destino del RREP se almacena en su tabla de enrutamiento.
- Ahora, el nodo ya podría encaminar su paquete de datos, pues ya conoce un camino hacia su destino.

- **Algoritmo *Cluster Tree***

Cluster-tree es un protocolo de enlace lógico a nivel de capa red.

- **Proceso de selección de *Cluster-tree* (CH)**

Después de que un nodo se enciende, sondea los canales en busca de mensajes *HELLO* provenientes de otros nodos. Si no obtiene ningún mensaje en un determinado tiempo entonces se considera como CH (*Cluster Head*), y envía mensajes *HELLO* a sus vecinos.

El nuevo CH espera la respuesta de sus vecinos durante un tiempo determinado, si no ha recibido ningún mensaje de *Connection Request* (CON REQ) regresa a ser un nodo común y vuelve a escuchar, proceso que se puede observar en la figura. 3.7.

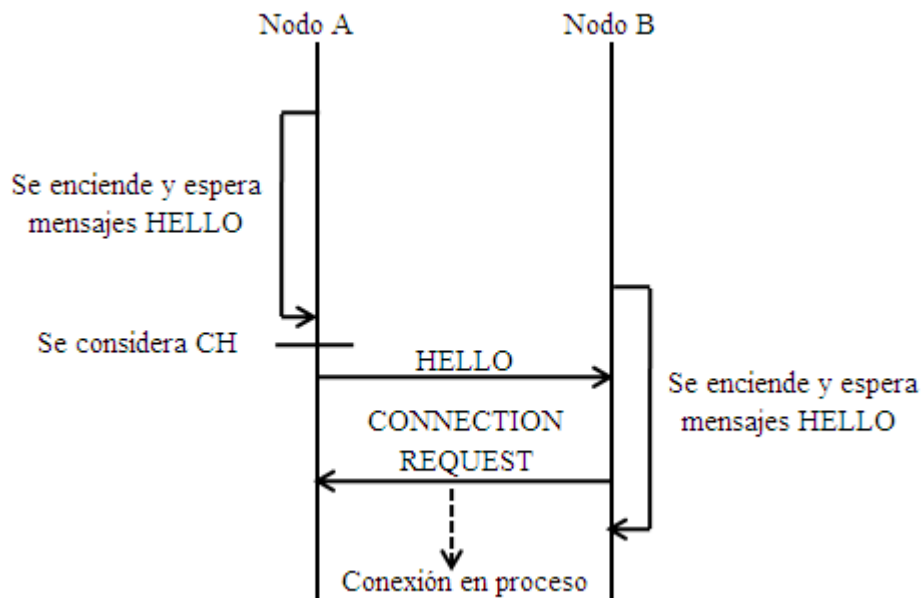


Figura. 3. 7. Esquema de selección de cabecera de cluster

– Red Cluster tree simple

Después de que un nodo es seleccionado como CH, envía periódicamente mensajes *HELLO* que contienen la dirección MAC del CH y el indicador de nodo 0 (*Identifier*, ID 0) que lo caracteriza ante todos los nodos restantes como CH. El nodo que recibe el mensaje *HELLO* envía un CON REQ al CH.

Cuando el CH recibe el CON REQ éste le responde al nodo con un mensaje *Connection Response* (CON RES) el cual contiene el ID que el CH le asigna al nodo (ID que corresponde a la dirección corta de la capa MAC).

El nodo que recibe este ID envía a la CH un ACK, confirmando el éxito del envío. Este proceso se lo puede ver en la figura. 3.8.

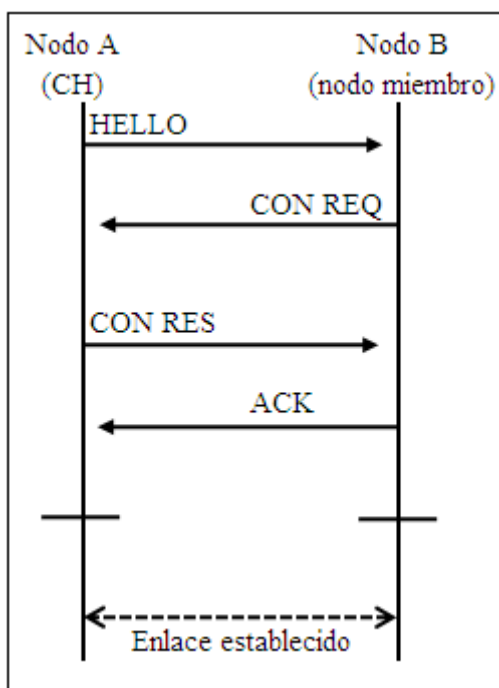


Figura. 3. 8. Enlace entre canal y nodo miembro

Si todos los nodos están localizados dentro del rango del CH, y a un salto de él (los fabricantes pueden limitar las características de los dispositivos para que soporten solo un salto) la topología formada se denomina *star*. En este caso el número máximo de nodos es de 245 incluyendo el CH.

La lista de dispositivos vecinos que contiene el CH es actualizada periódicamente con ayuda de mensajes *HELLO*. Si un dispositivo entra en la red y no se actualiza hasta un cierto tiempo límite, es eliminado.

Si la topología de red cambia entonces es requerido que el CH envíe a los nodos en mensaje *Topology Update* para que se reporten al CH y así actualizar las listas de ruteo, procedimiento igual se sigue si algún miembro por alguna circunstancia deshabilita su comunicación, el CH sabrá la presencia de estos problemas gracias al envío periódico de LS REP (*Link State Report*) que los dispositivos realizan. Cuando el CH tiene problemas los mensajes *HELLO* cesan entonces los nodos saben que han perdido a su CH, con lo que

el *cluster* debe ser configurado eligiendo a un nuevo CH con el procedimiento visto anteriormente.

- **Algoritmo GRAd**

Este es un algoritmo de asignación de rutas totalmente dinámico, siendo también un esquema de descubrimiento bajo demanda. La asignación de rutas en GRAd depende de la disponibilidad de rutas redundantes, desde el nodo origen hacia el nodo destino para así optimizar la funcionalidad de red obteniendo latencias bajas. Para reducir el tráfico de la red una vez llegado el mensaje al destino, GRAd suprime la proliferación del mensaje devolviendo un ACK.

3.10 MAC (*MEDIUM ACCESS CONTROL*)

La subcapa MAC del protocolo IEEE 802.15.4 provee un interfaz entre la capa física y las capas superiores de los LR-WPANs. Presenta las siguientes características:

- Asociación/disociación
- Acuse de recibo (ACK)
- Mecanismos de acceso al canal
- Validación de trama
- Control de garantía de ranuras de tiempo (*Slot Time*)
- Control de guías (*Beacon*)
- Sondeo de canal (*Scan*)

MAC proporciona dos tipos de servicios hacia las capas superiores, a través de dos Puntos de Acceso a Servicios (*Service Access Point*, SAPs):

- A los servicios de datos MAC se acceden por medio de la parte común de la subcapa MCPS-SAP (*MAC Common Part Sublayer-Service Access Point*).
- Al manejo de servicios MAC se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades MLME-SAP (*MAC Layer Management Entity-Service Access Point*).

Se caracteriza por una baja complejidad; el administrador de servicios MAC tiene 26 primitivas, que comparadas con 802.15.1 (*Bluetooth*), que tiene alrededor de 131 primitivas para 32 tipo de eventos, al MAC de 802.15.4 es muy simple, haciéndolo muy versátil para las aplicaciones hacia las que fue orientado, aunque se pague el costo de tener un instrumento con características menores a las de 802.15.1.

3.10.1 Modos de operación en ZigBee/ IEEE 802.15.4

- **Modo *Beacon*-habilitado**

Cuando el coordinador PAN selecciona el modo de *beacon*-habilitado, usa la estructura de *superframe* para manejar la comunicación entre dispositivos. El formato de la *superframe* está definido por el coordinador PAN, y dicho formato se lo envía periódicamente dentro de una trama *beacon* al resto de dispositivos.

- **Modo *Beacon*-no habilitado**

Cuando el coordinador PAN selecciona el modo de *beacon*-no habilitado los dispositivos simplemente pueden enviar sus datos mediante el mecanismo CSMA/CA no ranurado. En este tipo de modo no se utilizan supertramas.

3.10.2 Estructura de *superframes*

La supertrama está limitada por dos tramas *beacon* y tiene un periodo activo y uno inactivo, esto se puede observar en la fig. 3.9.

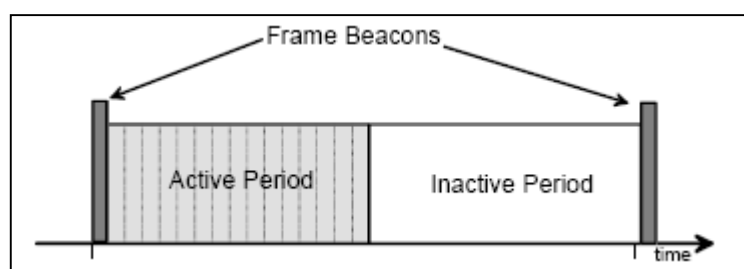


Figura. 3. 9. Partes de una *superframe*

La porción activa, independiente de la duración de cada *superframe* siempre está dividida en 16 *slots*, y todos los *slots* tienen igual duración.

La parte activa de la *superframe* mostrada en la figura 3.10 está compuesta por tres partes: Beacon, acceso con contención (*Contention Access Period CAP*), período libre de contención (*Contention Free Period CFP*).

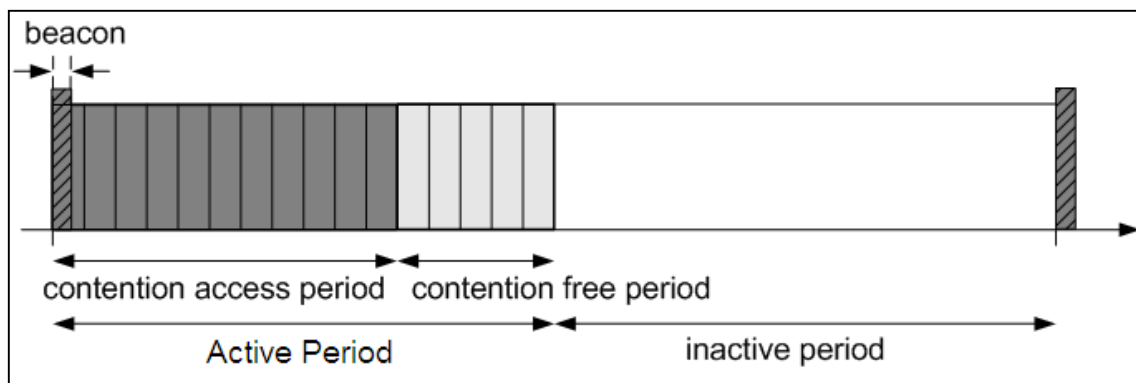


Figura. 3. 10. Partes del periodo activo de una *superframe*

- **Beacon**

La trama *beacon* es transmitida sin necesidad de CSMA y ocupa el *slot* 0. Además contiene información referente al formato de la *superframe*.

- ***Contention Access Period (CAP)***

El CAP comienza inmediatamente después de la trama *beacon* y termina antes del inicio del CFP (si éste existe). Todas las transmisiones durante el CAP son hechas usando el mecanismo de acceso al canal denominado CSMA/CA ranurado. Sin embargo, las tramas ACK y los datos que siguen a una trama ACK de una petición de datos son transmitidos sin contención. Un dispositivo que no puede contemplar su transmisión y ya se ha llegado al final del CAP, debe postergar su transmisión hasta el CAP de la próxima *superframe*.

- **Contention Free Period (CFP)**

El CFP consiste en *Guaranteed Time Slots* (GTSs) que son asignados por el coordinador PAN para aplicaciones que requieren baja latencia, un ancho de banda específico y QoS (*Quality of Service*).

El coordinador PAN puede asignar hasta un máximo de 7 GTSs y cada GTS solo puede ocupar un solo *slots*. Los GTSs solo son usados para comunicaciones entre el coordinador PAN y un dispositivo.

En ambas configuraciones (solamente CAP o CAP/CFP), la *superframe* puede tener un periodo inactivo durante el cual el coordinador PAN no interactúa con los dispositivos y entra en un modo de bajo consumo de energía (*sleep*). En estos periodos de inactividad los dispositivos ahorran energía y eso les permite extender su tiempo de vida.

La estructura de la *superframe* está definida por dos parámetros según muestra la figura. 3.11.

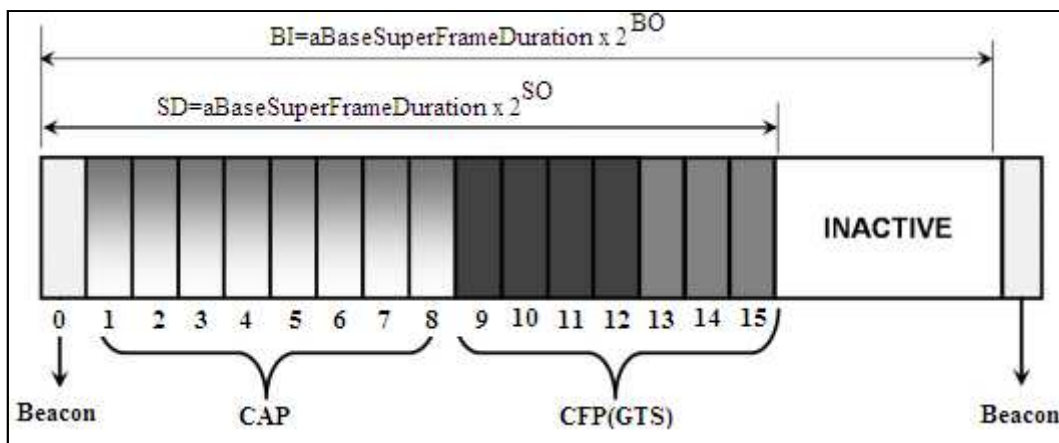


Figura. 3. 11. Parámetros que definen una *superframe*

- *macBeaconOrder* (BO): esta característica describe el intervalo en el cual el coordinador debe enviar tramas *beacon*. Dicho intervalo se denomina BI (*Beacon Interval*). El estándar IEEE 802.15.4 define que $0 \leq BO \leq 14$. [22]

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \text{ símbolos}$$

- *macSuperframeOrder* (SO): esta característica describe el largo de la porción activa de la *superframe*, la cual incluye la trama *beacon* inicial. La duración de esta porción se denomina SD (*Superframe Duration*). El estándar IEEE 802.15.4 define que $0 \leq SO \leq BO$. [22]

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \text{ símbolos}$$

El estándar IEEE 802.15.4 define que:

$$aBaseSuperframesDuration = aBaseSlotDuration * aNumSuperframeSlots$$

Donde:

$$aBaseSlotDuration = 60 \text{ símbolos}$$

$$aNumSuperframeSlots = 16 \text{ slots}$$

Por lo tanto:

$$aBaseSuperframesDuration = 960$$

Con lo que se tiene:

$$BI = 960 * 2^{BO} \text{ Símbolos}$$

$$SD = 960 * 2^{SO} \text{ Símbolos}$$

$$0 \leq BO \leq 14$$

$$0 \leq SO \leq BO$$

Como se dijo anteriormente, el *beacon* inicial de una *superframe*, es transmitida por el coordinador PAN en intervalos definidos.

Estos intervalos pueden ser:

Desde 15 ms hasta 245 s en 2.4 GHz

Desde 96 ms hasta 1573 s en 915 GHz

Desde 192 ms hasta 3146 s en 868 GHz

3.10.3 Mecanismos de acceso al medio

El estándar 802.15.4 define dos versiones del mecanismo CSMA/CA:

- El CSMA/CA ranurado, usado en el modo de operación *beacon*-habilitado.
- El CSMA/CA no ranurado, usado en el modo de operación *beacon*-no habilitado.

En ambos casos, el dispositivo escucha el canal, si éste está ocupado, entonces el algoritmo CSMA/CA le asigna un número de periodos de *backoff* (cada periodo igual a 20 símbolos) que deberá esperar antes de sondear nuevamente el canal.

En CSMA/CA ranurado, cada dispositivo debe esperar para sondear el canal y esto debe coincidir con el comienzo de un nuevo *slot* de la *superframe*.

En CSMA/CA no ranurado esto no sucede pues no se utilizan *superframes*.

3.10.4 Separación entre tramas

El periodo IFS (*Inter Frame Spacing*) define la cantidad de tiempo que separa dos tramas consecutivas. La subcapa MAC necesita una cantidad de tiempo para procesar los datos recibidos por la capa física.

El largo del IFS depende del tamaño de la trama emitida. Las tramas de tamaño menor a 18 *bytes* estarán seguidas de un periodo IFS igual a 12 símbolos, mientras que las tramas mayores a 18 *bytes* estarán seguidas por un periodo IFS igual a 40 símbolos.

3.10.5 Sondeo de Canales

El sondeo de canales es utilizado para identificar la existencia de redes PAN antes de la asociación o para crear una nueva PAN. El estándar define cuatro tipos de sondeo de canal. [22]

- **Sondeo de canal ED (*Energy Detection*)**

Mediante este procedimiento, y a petición de las capas superiores, la capa MAC mide la energía de un canal o lista de canales determinados. Para ello realiza una detección de energía de canal (ED) para cada uno de los canales elegidos. Mediante este procedimiento el coordinador puede elegir, entre varios, canales aquel con menos tráfico (canal apropiado) e iniciar la red PAN en él.

- **Sondeo de canal activo**

Un FFD realiza un sondeo activo del canal para localizar alguna trama *beacon* transmitida por un coordinador dentro de su rango de operación. Este sondeo es iniciado por el dispositivo mismo enviando tramas de petición de *beacon*. Este sondeo puede ser usado por:

- Un futuro coordinador para seleccionar un identificador PAN antes de formar una nueva red.
- Un dispositivo que desee asociarse a una red.

- **Sondeo de canal pasivo**

Este sondeo permite a un dispositivo localizar alguna trama *beacon* transmitida por un coordinador pero sin que el dispositivo envíe tramas de petición de *beacon*. Este tipo de sondeo puede ser usado por un dispositivo previo a la asociación.

- **Sondeo de canal *Orphan***

Un sondeo *Orphan* permite a un dispositivo intentar relocalizar a su coordinador después de una pérdida de sincronización. Por cada canal, se envía tramas de notificación de *orphan* en donde solo su coordinador podrá responder.

3.10.6 Creación de una red

Una PAN puede ser creada solamente por un dispositivo FFD después de realizar un sondeo del canal (ED o activo), procedimiento en el cual el dispositivo ha elegido un canal y un identificador PAN.

Una vez creada la PAN, el coordinador genera y envía tramas *beacon* para manejar la asociación y disociación de otros dispositivos proveyendo servicios de sincronización permitiendo la asignación y el manejo de GTSs.

- **Generación de *beacon***

A un FFD le está permitido generar y enviar tramas *beacon* solo si previamente cumple al menos una de las siguientes condiciones:

- El FFD es el coordinador PAN de una red.
- El FFD es un dispositivo asociado en una PAN previamente establecida.

- **Descubrimiento de un dispositivo**

Una vez que un FFD está satisfactoriamente asociado con una PAN, puede indicar su presencia mediante el envío de tramas *beacon* para informar a otros dispositivos su presencia.

- **Asociación de un dispositivo**

La asociación comienza con un sondeo activo o pasivo, luego de terminado el sondeo, el dispositivo selecciona el identificador PAN de la red a la que desea asociarse,

entonces envía un paquete de datos al correspondiente coordinador solicitando la asociación.

Si esta petición es recibida correctamente el coordinador envía una trama ACK, para así confirmar la asociación. Sin embargo, el ACK de una petición de asociación no quiere decir que el dispositivo fue asociado; en efecto el coordinador necesita tiempo para procesar la petición y determinar si los actuales recursos de la PAN son suficientes para permitir otra asociación.

Si los recursos disponibles son suficientes, el coordinador envía una trama de respuesta de asociación que contiene la nueva dirección del dispositivo dentro de la red y el estado del dispositivo asociado. Si los recursos no son suficientes para permitir la nueva asociación, el coordinador envía una trama de respuesta de asociación con el estado de fallo en la asociación.

- **Disociación de un dispositivo**

- **Coordinador inicia la disociación**

Si el coordinador quiere disociar a uno de sus dispositivos, le envía una trama con esta notificación; cuando el dispositivo recibe esta notificación envía un ACK confirmando su recepción, si el ACK no es recibido por el coordinador, éste considera que el dispositivo está disociado, y todas las referencias con respecto a él son borradas de la PAN.

- **Dispositivo inicia la disociación**

Si un dispositivo quiere dejar la red envía una notificación con este pedido al coordinador PAN.

Una vez que el coordinador recibe esta notificación envía un ACK al dispositivo confirmando su recepción. Si el ACK no es recibido por el dispositivo, este se considera disociado. Y todas las referencias acerca de la PAN serán removidas por el dispositivo.

- **Sincronización**

Se definen mecanismos para sincronizar el coordinador con sus dispositivos asociados, estos mecanismos de sincronización dependen del modo de operación de la PAN.

- **Sincronización en una red con modo *beacon*-habilitado**

Todos los dispositivos asociados deben recibir y descifrar las tramas *beacon* de su coordinador y así sincronizar sus transmisiones.

- **Sincronización en una red con modo *beacon*-no habilitado**

En este modo de *beacon*-no habilitado, la sincronización es ejecutada mediante sondeo al coordinador por datos.

- **Sincronización de dispositivos *orphaned***

Un dispositivo declara que ha llegado a ser *orphan* si ha fallado un número predeterminado de intentos por comunicarse con el coordinador.

Si un dispositivo llega a esta conclusión, realiza un sondeo de canal *orphan*, si este sondeo fue satisfactorio entonces la PAN fue localizada, y el dispositivo debe actualizar la información referente a su red.

Por otro lado, si el sondeo falla las capas superiores deben decidir si se realizará un nuevo sondeo o si el dispositivo intenta re-asociarse a la red.

- **Transmisión y recepción de datos**

- **Transmisión de datos**

Transferencia de datos al coordinador

En el caso de una red que utilice *beacon*-habilitado, el dispositivo busca el *beacon* o baliza para sincronizarse a la estructura de la supertrama. Luego utiliza el método CSMA/CA ranurado para transmitir la información. Este proceso se observa en la fig. 3.12.

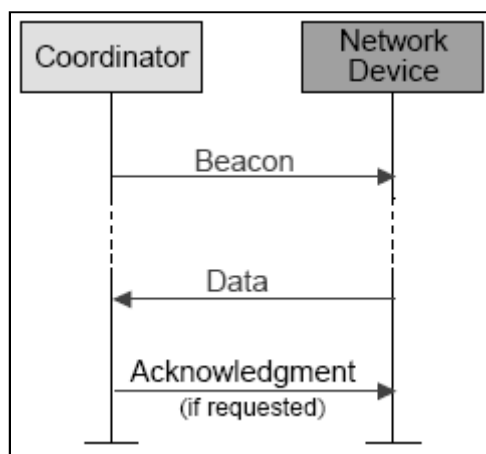


Figura. 3. 12. Transferencia de datos en modo beacon-habilitado

Para una red que no utilice beacon- habilitado, el dispositivo utiliza el método CSMA/CA no ranurado para transmitir la información. Se observa el proceso en la fig. 3.13.

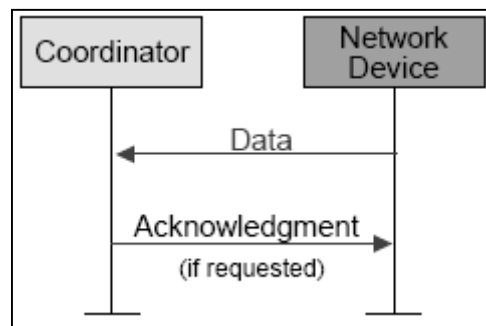


Figura. 3. 13. Transferencia de datos en modo beacon-no habilitado

Transferencia de datos desde el coordinador

En una red beacon- habilitado (con balizas), el coordinador indica en el beacon que existen datos pendientes. El dispositivo periódicamente escucha el beacon y transmite un comando de pedido MAC usando la técnica CSMA/CA ranurado, si es necesario. El proceso se observa en la figura 3.14.

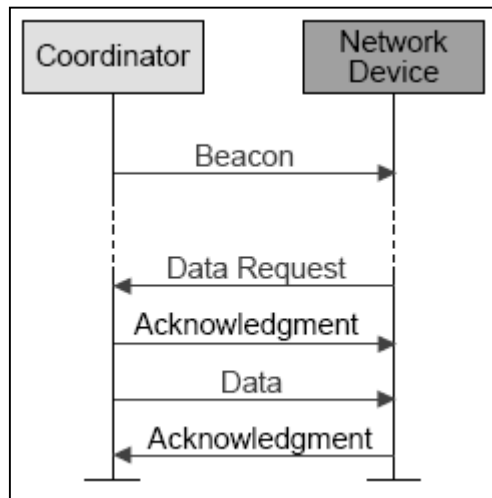


Figura. 3. 14. Transferencia de datos en modo beacon-habilitado

En una red sin beacon- habilitado, el dispositivo transmite un comando de pedido MAC usando CSMA/CA no ranurado. Si el coordinador tiene datos pendientes, transmite sus datos bajo la misma técnica. En caso de no tener datos, el coordinador envía una trama de datos con un payload de longitud cero, el proceso se observa en la figura 3.15.

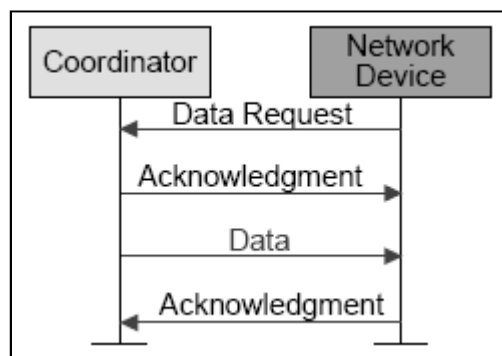


Figura. 3. 15. Transferencia de datos en modo beacon-no habilitado

– Recepción de datos

Cualquier dispositivo puede recibir transmisiones de otros dispositivos, pero solo aceptará las tramas que estén dirigidas a él.

Extracción de datos pendientes desde el coordinador

Este mecanismo de comunicación es llamado transmisión indirecta; un dispositivo dado se comunica con su coordinador por información pendiente.

En una PAN un dispositivo está enterado si tiene alguna trama pendiente al examinar el contenido de una trama *beacon* recibida. Si su dirección está en el campo de direcciones pendientes, el dispositivo envía una petición de datos al coordinador. Si esta petición es correctamente recibida por el coordinador, éste envía un ACK al dispositivo confirmando su recepción, entonces se prepara para recibir la información del coordinador.

3.10.7 Estructura de las tramas MAC

El formato general de las tramas MAC se diseñó para ser muy flexible y que se ajustara a las necesidades de las diferentes aplicaciones con diversas topologías de red, al mismo tiempo que se mantenga un protocolo simple. [23]

- *Data Frame*: usado para todas las transferencias de datos.
- *Acknowledgment Frame*: usado para confirmar la recepción exitosa de la trama.
- *MAC Command Frame*: usado para manejar todo el control de entidad MAC.
- *Beacon Frame*: usado por un coordinador para transmitir *beacons*.

- **Estructura de la trama de Datos (*Data Frame*)**

La estructura de la trama de datos provee hasta 104 bytes para información en el *payload*, utiliza un campo para secuencia de datos y control de errores FCS, como se observa en la figura 3.16.

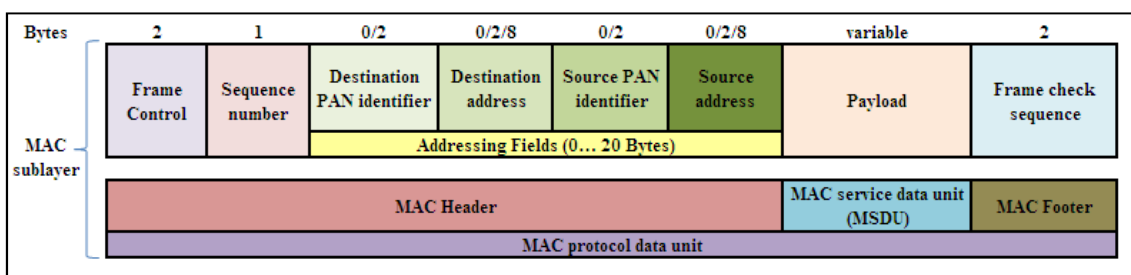


Figura. 3. 16. Formato en detalle de la trama MAC

MAC Header

- *Frame Control*: este campo contiene información que define el tipo de trama que se está transmitiendo.
- *Sequence Number*: este campo especifica el identificador de secuencia único de cada trama. Una transmisión se considera exitosa solo cuando la trama ACK contiene la misma secuencia de números que la secuencia anterior transmitida.
- *Destination PAN Identifier*: especifica el identificador único de la PAN a la que va dirigida la trama.
- *Destination Address*: especifica la dirección del dispositivo a las que va dirigida la trama.
- *Source PAN Identifier*: es el identificador único de la PAN que origina la trama.
- *Sources Address*: Especifica la dirección del dispositivo que origina la trama.

MAC Service Data Unit

Payload: es de longitud variable y contiene información según el tipo de trama. Además solo las tramas de datos y *beacon* contienen información proveniente de las capas superiores.

MAC Footer

FCS (Frame Check Sequence): este campo contiene el CRC (*Cyclic Redundancy Check*).

- **Estructura de la trama *Beacon (Beacon Frame)***

Cuando un beacon es difundido en la red, los dispositivos clientes podrán despertar, sólo si, escuchan su dirección, de lo contrario retornarán a su estado de reposo. Los *beacons* son importantes en las topologías malla y árbol para mantener a todos los nodos sincronizados sin requerir un consumo innecesario de batería al escuchar el canal por largos periodos de tiempo.

La estructura de la trama de *beacon* es como muestra la figura. 3.17 a continuación:

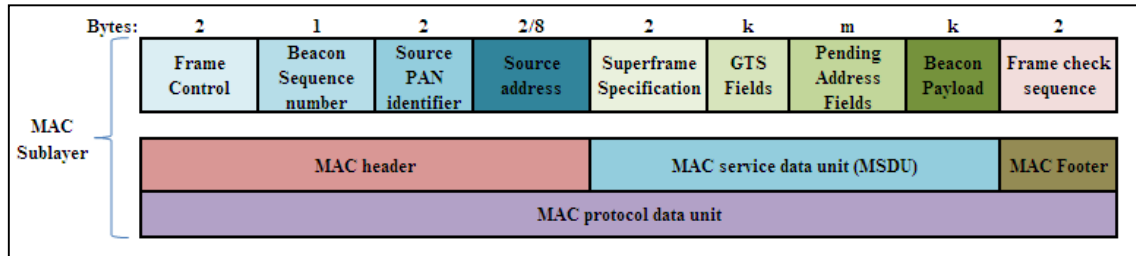


Figura. 3. 17. Formato general de la trama Beacon

El MAC *Header* y el MAC *Footer* son los mismos presentados en el formato general de la trama.

MAC Service Data Unit

- *Superframe Specification*: este campo especifica parámetros de la *superframe*.
- *GTS Fields*: contiene información acerca de los GTSs asignados por el coordinador.
- *Pending Address*: contiene información acerca de los dispositivos que tienen datos pendientes en el coordinador.
- *Beacon Payload*: contiene información proveniente de las capas superiores.

- **Estructura de la trama ACK (*Acknowledgment Frame*)**

Provee una realimentación desde el receptor al emisor para informar que el paquete ha sido recibido correctamente.

En el campo *Sequence Number* se tiene el valor del número de secuencia de la trama que ha sido recibida por el dispositivo.

Su estructura se muestra en la figura. 3.18.

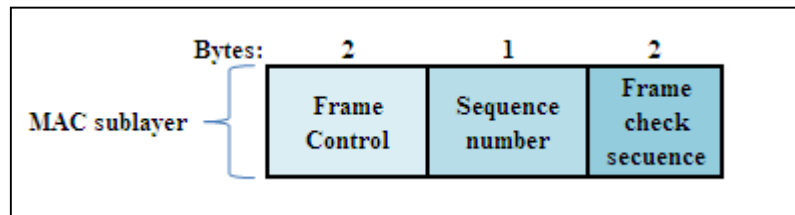


Figura. 3. 18. Formato general de la trama ACK

- **Estructura de la trama de comandos MAC (*MAC Command Frame*)**

La trama de Comandos MAC es un mecanismo para el control y configuración de los dispositivos.

Permite que un coordinador pueda configurar a los dispositivos individualmente sin importar lo grande que sea la red.

Su estructura se muestra en la figura. 3.19.

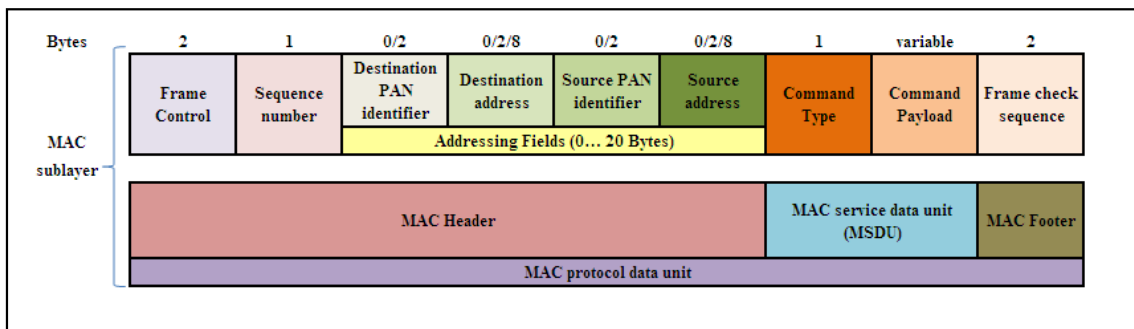


Figura. 3. 19. Formato general de la trama de comandos

- *Command Type*: este campo indica el tipo de comando que se ha generado.
- *Command Payload*: este campo contiene información referente al comando generado.

Independientemente del tipo de trama MAC que se envíe, esta trama no debe exceder los 127 Bytes de longitud.

3.11 CAPA FISICA

La capa física es la responsable de la transmisión y la recepción de datos en un canal de radio y acorde con las técnicas de modulación y *spreading*. La IEEE 802.15.4 ofrece tres bandas de frecuencia en las cuales operar: 2.4 GHz, 915 MHz y 868 MHz.

La frecuencia de 2.4 GHz, especifica la operación en la banda industrial, médica y científica (ISM), que prácticamente está disponible en todo el mundo, mientras que la frecuencia de 868 MHz opera en Europa y 915 MHz en Estados Unidos. El estándar IEEE 802.15.4 utiliza la técnica DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) para transmitir la información a través del medio. La disponibilidad internacional de la banda de los 2.4 GHz ofrece ventajas en términos de mercados más amplios y costos de manufactura más bajos, por otro lado las bandas de 868 MHz y 915 MHz ofrecen una alternativa a la congestión creciente y demás interferencias (hornos de microondas, etc.) asociadas a la banda de 2.4 GHz. Además, las velocidades de transmisión son de 250 kbps en la banda de 2.4 GHz, 40 kbps en la banda de 915 MHz y 20 kbps en la banda de 868 MHz. Este rango superior de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se atribuye principalmente a un mayor orden en la modulación, en la cual cada símbolo representa múltiples bits. Las características de cada frecuencia están resumidas en la tabla. 3.1. [23]

Tabla. 3. 1. Parámetros técnicos según las frecuencias

Banda de frecuencias (MHz)	Parámetros de datos	
	Velocidad de bits (kbps)	Modulación
868	20	BPSK
915	40	BPSK
2400	250	O-QPSK

Los diferentes rangos de transmisión se pueden explotar para lograr una variedad de aplicaciones con una variedad efectiva. Por ejemplo, la capa física a 868/915 MHz se puede ocupar para lograr mayor sensibilidad y mayores áreas de cobertura debido a que existe menores pérdidas de propagación, con lo que se reduce el número de nodos requeridos para cubrir un área geográfica, mientras que el rango superior de transmisión en la capa física a 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir mayor velocidad de transmisión.

3.11.1 Características de la capa física

- **Activación/desactivación del *transceiver***

El radio *transceiver* tiene tres modos de funcionamiento: transmisión, recepción y sleeping (descanso). Bajo petición de la capa MAC la capa física debe conmutar entre estos tres estados. El estándar exige que la conmutación entre transmisión y recepción, o viceversa, se haga en menos de 12 símbolos. Para el caso de 2,4 GHz y teniendo en cuenta que cada símbolo corresponde a 4 bits, se puede calcular el tiempo máximo de conmutación entre los estados de transmisión y recepción: [22]

12 símbolos = 48 bits

$$\frac{48 \text{ bits}}{250 \frac{\text{kbits}}{\text{s}}} = 192 \mu\text{s}$$

- **Detección de energía (ED) en el canal**

Es una estimación de la señal recibida, y ese valor es analizado con respecto a un valor umbral predeterminado (umbral ED). Esta medida es usada para la selección del canal, y por CCA (*Clear Channel Assessment*) para determinar si el canal está libre u ocupado. [22]

- **Indicador de calidad del enlace (LQI)**

LQI (*Link Quality Indication*) indica la medida de fuerza/calidad del paquete recibido, esta medida puede ser implementada usando detección de energía (ED).

- **Prueba de *clear channel* (CCA)**

CCA (*Clear Channel Assessment*). Esta operación es responsable de reportar el estado de actividad en el medio (libre u ocupado). El CCA tiene tres modos de operación:

- Modo de detección de energía

El CCA reporta que el canal está ocupado si el valor de la energía detectada está sobre el umbral ED.

- Modo de sondeo de *carrier*

El CCA reporta que el canal está ocupado solamente si detecta una señal con las técnicas de modulación y *spreading* establecidas por el IEEE 802.15.4, sea que esta señal esté sobre o debajo del umbral ED.

- Sondeo de *carrier* con detección de energía

Esta es una combinación de las técnicas ya mencionadas, el CCA reporta que el canal está ocupado solamente si detecta una señal con las técnicas de modulación y *spreading* establecidas por la IEEE 802.15.4, y que este valor de energía esté sobre el umbral ED.

- **Selección de la frecuencia del canal**

La IEEE 802.15.4 define 27 canales diferentes; por lo tanto, la capa física debe sintonizar al dispositivo dentro del canal a utilizarse. [22]

3.11.2 Paquete de la Capa Física

Cada paquete, o unidad de datos del protocolo PHY (PPDU), contiene un encabezado de sincronización, un encabezado de PHY para indicar la longitud del paquete, y la carga de información, o la unidad de secuencia PHY (PSDU).

La estructura de la trama de capa física es como lo muestra la figura. 3.20. a continuación: [22]

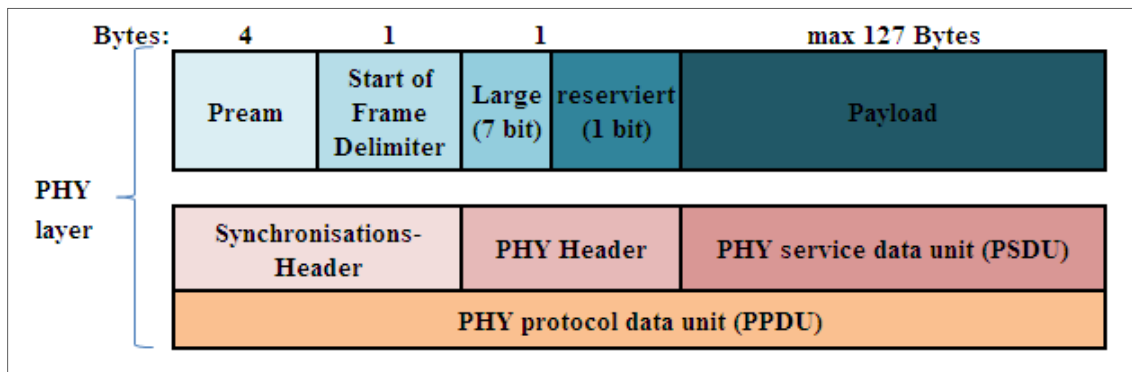


Figura. 3. 20. Estructura del paquete de capa física

- **Synchronization Header (SHR)**

Este campo es usado para la sincronización de la trama.

- **Phy Header (PHR)**

Especifica el largo de la PSDU.

- **Phy Service Data Unit (PSDU)**

En el campo de datos de la capa física se encapsula a la trama MAC cuyo valor máximo debe ser de 127 bytes. Así que el paquete de capa física será de 133 bytes. El tamaño típico de los paquetes para la mayoría de las aplicaciones caseras tales como el monitoreo y control de dispositivos de seguridad, iluminación, aire acondicionado, y otras aplicaciones va de 30 a 60 bytes, mientras que las aplicaciones más demandantes tales como juegos interactivos y periféricos de computadora, requerirán paquetes más largos. La duración máxima de paquetes es de 4.25 ms para la banda de los 2.4 GHz, y de 26.6 ms para la banda de los 915 MHz, y de 53.2 ms para la banda de 868 MHz. [23]

3.11.3 Canales IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 define 27 canales de frecuencia entre las tres bandas, como lo muestra la figura. 3.21. [23]

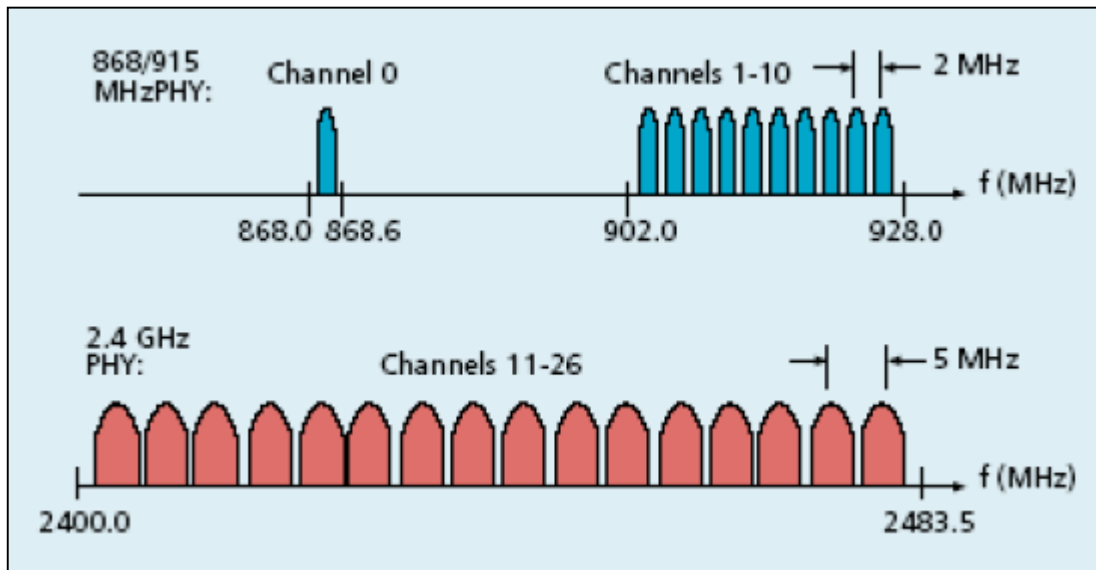


Figura. 3. 21. Estructura de canales de IEEE 802.15.4

- La banda 868 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz.
- La banda 915 MHz soporta diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz, con un espacio entre canales de 2 MHz.
- La banda de 2.4 GHz soporta 16 canales entre 2.4 y 2.4835 GHz, con un espacio entre canales de 5 MHz con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción.

Debido al soporte regional de la primera y segunda banda de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales.

Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia que se puede utilizar el mismo hardware para ambos y así reducir costos de manufactura.

En la tabla. 3.2. se muestra el cálculo de las frecuencias centrales de los diferentes canales.

Tabla. 3. 2. Frecuencias de canales IEEE 802.15.4

Número de Canales	Frecuencia central del canal (MHz)
k=0	868.3
k=1,2,... 10	$906 + 2(k-1)$
k=11,12,...26	$2405 + 5(k-11)$

Dado que el hogar es propenso a tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencias, así como una interferencia no intencionada de las diferentes aplicaciones, la capacidad de relocalización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de las redes inalámbricas dentro del hogar.

El estándar fue diseñado para implementar una selección dinámica de canales, a través de una selección específica de algoritmos la cual es responsabilidad de la capa de red. La capa MAC incluye funciones de búsqueda que sigue paso a paso a través de una lista de canales permitidos en busca de una señal de guía, mientras que la PHY contiene varias funciones de bajo nivel, tales como la detección de los niveles de energía recibidos, indicadores de calidad en el enlace así como de conmutación de canales, lo que permite asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Esas funciones son utilizadas por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar canales en respuesta a una pausa muy prolongada. [23]

3.11.4 Modulación

Si se emplean las frecuencias de 915 MHz y 868 MHz la señal es modulada con BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Mientras que a la frecuencia 2.4 GHz se emplea la técnica de modulación O-QPSK. Esto se resume en la tabla 3.3.

En términos de eficiencia (energía requerida por *bit*), la modulación ortogonal mejora su funcionamiento en 2 dB que BPSK. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, a las frecuencias 915 MHz y 868 MHz se tiene una ventaja de 6-8 dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas. [23]

Tabla. 3. 3. Modulación

Banda de frecuencia	Tasa de transferencia	Modulación
868 MHz	20 kbps	BPSK
915 MHz	40 kbps	BPSK
2,4 GHz	250 kbps	O-QPSK

3.11.5 Sensibilidad y potencia

Las especificaciones de sensibilidad de IEEE 802.15.4 especifican -85 dBm para la frecuencia de 2.4 GHz y de -92 dBm para las frecuencias de 868 y 915 MHz.

Dichos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias que se requieren debido a las imperfecciones en la fabricación, de la misma manera que permite implementar aplicaciones de bajo costo.

El estándar IEEE 802.15.4 especifica que cada dispositivo debe ser capaz de transmitir al menos a 1 mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación, la potencia de transmisión puede ser mayor o menor. [23]

Los dispositivos típicos (1mW) se espera que cubran un rango de entre 10 y 75 m; sin embargo, con una buena sensibilidad y un incremento moderado en la potencia de transmisión, se obtiene mayores coberturas.

Por ejemplo, una red con topología tipo estrella puede proporcionar una cobertura total para una casa. Para aplicaciones que requieran mayor tiempo de latencia, la topología tipo mesh ofrecen una alternativa atractiva con coberturas caseras dado que cada dispositivo solo necesita suficiente energía para comunicarse con su vecino más cercano.

3.11.6 Interferencia para otros dispositivos

Los dispositivos que operan en la banda de 2.4 GHz pueden recibir interferencias causadas por otros servicios que operan en dicha frecuencia.

Esta situación es aceptable en las aplicaciones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, pues éstas no requieren una alta calidad de servicio (QoS), y además se espera que realicen varios intentos para completar la transmisión de información. [23]

3.12 TIPOS DE TRÁFICO

Estos tipos de tráfico son atributos diferentes de la subcapa MAC, siendo esta lo suficiente flexible para manejar a cada uno de estos.

3.12.1 Datos periódicos

Este tipo de tráfico se maneja usando el modo de *beacon*-habilitado donde el sensor se despertará debido a la recepción de una trama *beacon* momento que se utilizará para verificar cualquier tipo de mensaje y luego volverá a dormir nuevamente. Este tipo de datos es necesario para aplicaciones donde se envían y/o reciben datos transcurrido un lapso constante de tiempo, como es el caso de sistemas de sensores (control de temperatura, humedad, consumo de energía, etc.) en los cuales se necesita medir de forma constante la variable a controlar.

3.12.2 Datos intermitentes

Esta información se maneja usando el modo de *beacon*-no habilitado. En este modo el dispositivo se comunicará con la red cuando necesite informar la cantidad de energía sobrante en el mismo. Es diseñado para aplicaciones que envían y reciben datos cuando son estimulados por una señal externa, como es el caso de un interruptor o conmutador.

3.12.3 Datos repetitivos de baja velocidad

Para estos datos de baja latencia se usa el modo de *beacon*-habilitado y se utilizan GTSs, que permiten que cada dispositivo transmita datos sin realizar contención. Útil para aplicaciones que requieren el reparto de ranuras o ‘slots’ de tiempo para controlar el acceso al medio, como por ejemplo para datos enviados por un ratón, teclado y otros dispositivos de un ordenador.

3.13 SEGURIDAD

Desde el punto de vista de la seguridad, las redes inalámbricas son altamente vulnerables debido a que no se requiere tener acceso a un medio cableado para participar en las comunicaciones. ZigBee/802.15.4 está orientado hacia un mercado en el que el bajo consumo y el bajo coste son requisitos esenciales. [22]

Debido a la restricción en lo que al coste se refiere, los dispositivos que trabajan con esta tecnología se enfrentan a una limitación computacional evidente. Esto quiere decir que los sistemas de seguridad son más difíciles de implementar en sistemas que trabajan bajo ZigBee/802.15.4. Además, a la hora de implementar mecanismos de seguridad para ZigBee/802.15.4 se ha tenido en cuenta que los dispositivos no tienen por qué tener acceso a una base de datos de forma continua. De esta forma, los distintos dispositivos deben ser capaces de gestionar los mecanismos de seguridad por sí mismos. Por último, es importante destacar que ZigBee/802.15.4 está orientado hacia el envío de pequeños paquetes de información, por lo que los mecanismos de seguridad utilizados no deberían aumentar en exceso el tamaño de la cabecera.

En los estándares ZigBee y 802.15.4 se definen mecanismos de seguridad para las capas MAC, de red y de aplicación. El mecanismo criptográfico utilizado se basa en el uso de claves simétricas. La clave en cuestión debe ser generada por las capas superiores. El mecanismo criptográfico debe ser capaz de asegurar:

- Confidencialidad de los datos o privacidad. Esto quiere decir que la información transmitida sólo debe llegar a los dispositivos asociados a la red.
- Autenticación de los datos. Se debe asegurar que la información recibida proviene de un dispositivo válido (en otras palabras, no ha habido intromisión en las comunicaciones).
- Detección de información duplicada. Los paquetes de información deben de ser recibidos únicamente una vez.

De acuerdo al estándar la clave utilizada puede ser conocida por los dos dispositivos que participan en la comunicación o por un grupo de dispositivos. Si utilizamos una única clave para un grupo de dispositivos ganamos en simplicidad pero, por contra, estamos desprotegidos ante el ataque de un dispositivo de la propia red.

ZigBee/802.15.4 usa el modo CCM*, una variante del modo CCM (*Counter with CBC-MAC*). CCM* usa bloques de encriptación basados en el algoritmo AES-128 (*Advanced Encryption Standard*). CCM* es un modo simétrico, lo que quiere decir que tanto el dispositivo que transmite como el que recibe usan la misma clave para descifrar el mensaje. En caso de que la seguridad esté habilitada, el coordinador es normalmente el que realiza las funciones de centro de seguridad, permitiendo o no la asociación de un nuevo dispositivo. El centro de seguridad debe actualizar periódicamente la clave utilizada, cambiándola por una nueva si lo estima necesario. Para ello, distribuye la nueva clave encriptada con la antigua. Después comunica a todos los dispositivos que a partir de ese momento deben usar la nueva clave.

El centro de seguridad, que como hemos dicho suele ser el coordinador pero que también puede ser un dispositivo expresamente dedicado a ello, realiza las siguientes funciones:

- Autenticar dispositivos que quieren unirse a la red.
- Generar y distribuir nuevas claves.
- Habilitar el uso de seguridad punto a punto entre dispositivos.

ZigBee/802.15.4 usa tres tipos de claves:

- Claves de enlace. Sirven para dotar de seguridad las comunicaciones punto a punto a nivel de aplicación. Sólo los dos dispositivos que participan en la comunicación conocen esta clave.

- Claves de red. Esta clave se usa para la seguridad a nivel de red. Todos los dispositivos dentro de una misma red deben compartir esta clave.
- Claves maestro. Esta clave es utilizada por dos dispositivos en el inicio de la comunicación para generar la clave de enlace. La clave maestro no se usa para encriptar tramas.

Se definen dos tipos de seguridad:

- Modo de seguridad estándar. En este modo la lista de dispositivos pertenecientes a la red y las diferentes claves pueden estar almacenadas dentro de cada uno de los distintos dispositivos. El centro de seguridad solamente se encarga de mantener una clave de red común y de controlar las políticas de admisión. Así, el centro de seguridad no necesita una gran memoria para almacenar los datos relacionados con la seguridad de la red.
- Modo de seguridad avanzado. En este caso el centro debe almacenar tanto las claves como el listado de dispositivos, así como de controlar las políticas de admisión. Conforme crezca el número de dispositivos asociados a la red, aumentarán los requerimientos de memoria del centro de seguridad.

Las diferentes capas añadirán una cabecera auxiliar en el caso de que utilicemos un modo seguro de transmisión. Además, se debe incluir un código de integridad (MIC o *Message Integrity Code*) a continuación de la carga útil.

3.14 COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ESTÁNDARES

3.14.1 Comparación con Bluetooth

En la tabla. 3.4. se presenta un cuadro comparativo entre las características técnicas de ZigBee y *Bluetooth*. [27]

Tabla. 3. 4. Comparación de ZigBee con Bluetooth

<i>ZigBee vs. Bluetooth</i>		
Parámetros	ZigBee	Bluetooth
Interfaz Aire	DSSS	FHSS
Rango	100 m	10 m
Vida de la Batería	años	meses
Velocidad de datos	250 kbps	1 Mbps
Dispositivos en la red	255	7

- **Interfaz de Aire**

Bluetooth emplea interfaz aire al método FHSS el cual es más seguro que DSSS empleado por ZigBee, debido a que los saltos de frecuencia realizados por la señal son de manera aleatoria.

- **FH o FHSS** (espectro extendido con salto de frecuencias): en este estándar, las frecuencias cambian alrededor de 1.600 veces por segundo. Este tipo de estándar posee un gran número de patrones de salto para que las redes que utilicen este espectro y se encuentren en un lugar cercano unas a otras, no tengan posibilidad de usar la misma frecuencia en forma simultánea.
- **DS o DSSS** (espectro extendido de frecuencia directa): este espectro divide una franja del ancho de banda en canales separados y no transmite durante un largo tiempo en una misma frecuencia del canal. Debido a que utiliza canales distintos en una misma zona, hay redes que pueden llegar a solaparse sin que las señales de unas y otras se interfieran.

Estas dos formas de transmisión de espectro extendido resisten las interferencias, ya que no hay una sola frecuencia en uso constante.

El salto de frecuencia puede ser también resistente a la posibilidad de que nos espíen, ya que los patrones de salto pueden evitar casi todos los analizadores de espectro.

- **Vida de la batería**

ZigBee al ser un estándar de bajo ciclo de trabajo emplea menos batería que *Bluetooth*. En términos exactos, ZigBee tiene un consumo de 30mA transmitiendo y de 3uA en reposo, frente a los 40mA transmitiendo y 0.2mA en reposo que tiene el Bluetooth.

Este menor consumo se debe a que el sistema ZigBee se queda la mayor parte del tiempo dormido, mientras que en una comunicación Bluetooth esto no se puede dar, y siempre se está transmitiendo y/o recibiendo.

- **Velocidad de datos**

ZigBee tiene una velocidad de hasta 250 kbps, mientras que en Bluetooth es de hasta 1 Mbps.

Debido a las velocidades de cada uno, uno es más apropiado que el otro para ciertas cosas. Por ejemplo, mientras que el Bluetooth se usa para aplicaciones como los teléfonos móviles y la informática casera, la velocidad del ZigBee se hace insuficiente para estas tareas, desviándolo a usos tales como la Domótica, los productos dependientes de la batería, los sensores médicos, y en artículos de juguetería, en los cuales la transferencia de datos es menor.

- **Dispositivos en la red**

Una red ZigBee puede constar de un máximo de 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos. En tanto que *Bluetooth* soporta un máximo de 7 dispositivos por red y una red extendida puede soportar hasta 8 subredes. En este punto ZigBee llega a ser totalmente superior a *Bluetooth*.

3.14.2 Comparación con Wi-Fi

En la tabla. 3.5. se presenta un cuadro comparativo entre las características técnicas de ZigBee y *WIFI*. [28]

Tabla. 3. 5. Comparación de ZigBee con Wi-Fi

Características	Wi-fi	ZigBee
Bandas de Frecuencias	2.4GHz	2.4GHz, 868 / 915 MHz
Tamaño de Pila	~ 1Mb	~ 20kb
Tasa de Transferencia	11Mbps	250kbps (2.4GHz) 40kbps (915MHz) 20kbps (868MHz)
Números de Canales	11 - - 14	16 (2.4GHz) 10 (915MHz) 1 (868MHz)
Tipos de Datos	Digital	Digital (Texto)
Rango de Nodos Internos	100m	10m - 100m
Números de Dispositivos	32	255 / 65535
Requisitos de Alimentación	Media - Horas de Batería	Muy Baja - Años de Batería
Introducción al Mercado	Alta	Baja
Arquitecturas	Estrella	Estrella, Árbol, Punto a Punto y Malla
Mejores de Aplicaciones	Edificio con Internet Adentro	Control de Bajo Costo y Monitoreo
Consumo de Potencia	400mA transmitiendo, 20mA en reposo	30mA transmitiendo, 3uA en reposo
Precio	Costoso	Bajo
Complejidad	Complejo	Simple

3.14.3 Comparación con otras tecnologías Wireless

En la figura 3.22. se observa una comparación de ZigBee con otras tecnologías wireless. [29]

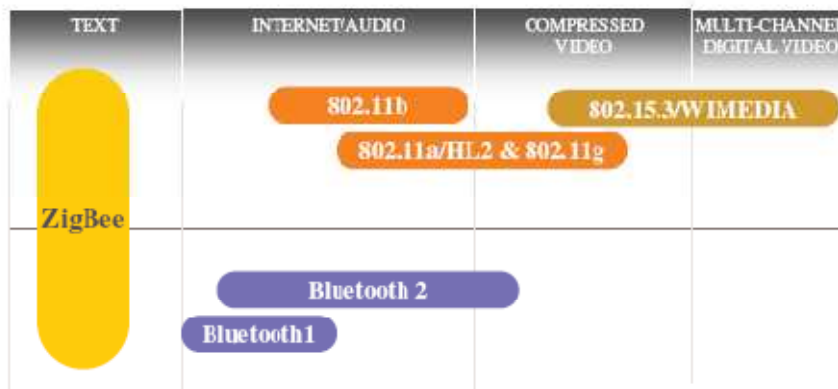


Figura. 3. 22. Comparación de ZigBee con otras tecnologías Wireless

3.15 MERCADOS Y APLICACIONES ZIGBEE

El mercado para las redes ZigBee [30] comprende una amplia variedad de aplicaciones como se muestra en la fig. 3.23. En la actualidad un gran número de las compañías que forman parte de la ZigBee Alliance se encuentran desarrollando productos que van desde electrodomésticos hasta teléfonos celulares, impulsando el área que más les interesa. [31]

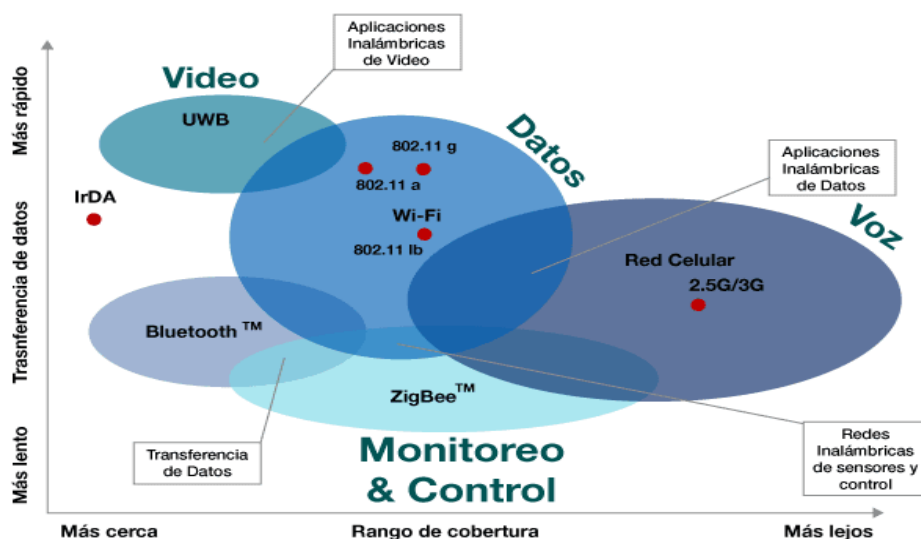


Figura. 3. 23. Áreas de aplicación de las tecnologías Wireless

En general, ZigBee resulta ideal para redes estáticas, escalables y con muchos dispositivos, pocos requisitos de ancho de banda y uso infrecuente, y dónde se requiera una duración muy prolongada de la batería. En ciertas condiciones y para determinadas aplicaciones puede ser una buena alternativa a otras tecnologías inalámbricas ya consolidadas en el mercado, como Wi-Fi y Bluetooth.

A continuación en la figura 3.24. algunas aplicaciones potenciales.



Figura. 3. 24. Áreas de aplicación de ZigBee

3.15.1 Automación residencial y comercial

La figura 3.25 muestra la automatización del hogar, en el que se puede implementar:

- El control remoto RF, fácil de usar, comunicación bidireccional, de más largo alcance, duración de la batería y que no requiere que exista línea con el equipo que se desee controlar. Ejemplo: control para equipos de cine en casa, decodificadores y otros equipos de audio.

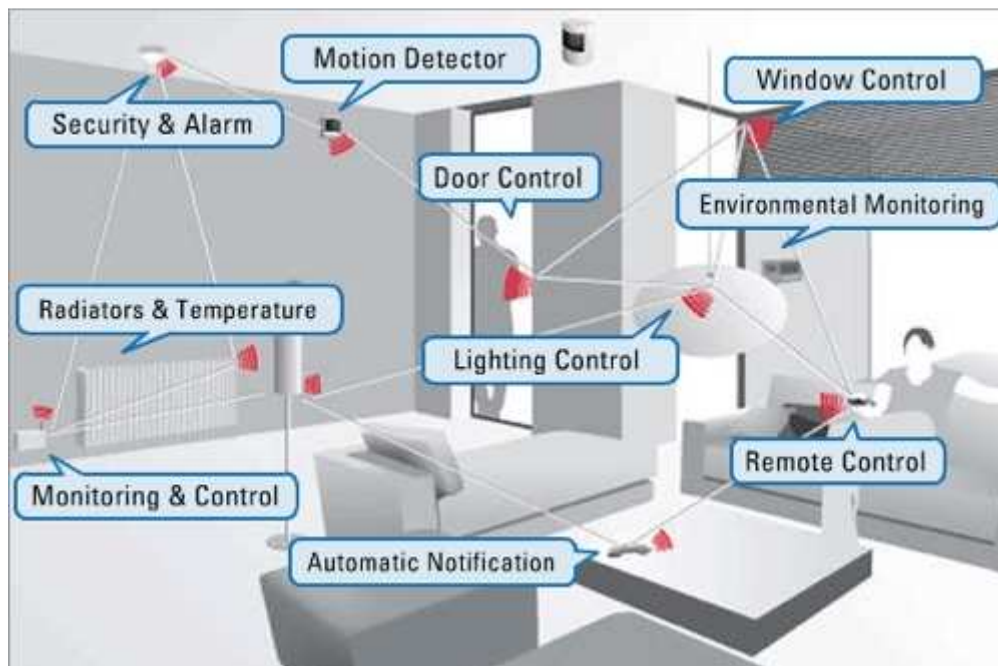


Figura. 3. 25. Automatización del hogar

- Control de electrodomésticos, iluminación, el medio ambiente, gestión energética, seguridad del hogar y la seguridad de lugares de trabajo.
- Iluminación: encendido/apagado luz, regulador de intensidad de la luz, selector de color de luz, sensor de luz, etc. Los interruptores podrían ser cambiados de un lugar a otro con plena libertad, pudiendo por ejemplo, prender o apagar las luces de tu casa a través de Internet o utilizando tu teléfono celular en cualquier momento.
- Sistemas de medición avanzada, medidores de agua, luz y gas que forman parte de una red con otros dispositivos como displays ubicados dentro de las casas, que pueden monitorear el consumo de energía y no sólo eso, sino que también pueden interactuar con electrodomésticos o cualquier otro sistema eléctrico como bombas de agua o calefacción, con la finalidad de aprovechar mejor la energía.
- Control de temperatura
- Control de acceso
- Ventilación
- Irrigación de jardines
- Detectores de humo

3.15.2 Control Industrial

- Manejo de carga
- Control de procesos
- Control de ambiente
- Control de procesos
- Detectores de H₂O: los sensores ZigBee pueden colocarse en lugares remotos (dentro de tanques de agua) y enviar periódicamente datos.
- Diagnóstico de Equipos

3.15.3 Salud Personal

El campo de la salud ofrece muchas oportunidades para las aplicaciones de la tecnología de sensores inalámbricos como se observa en la figura 3.26.

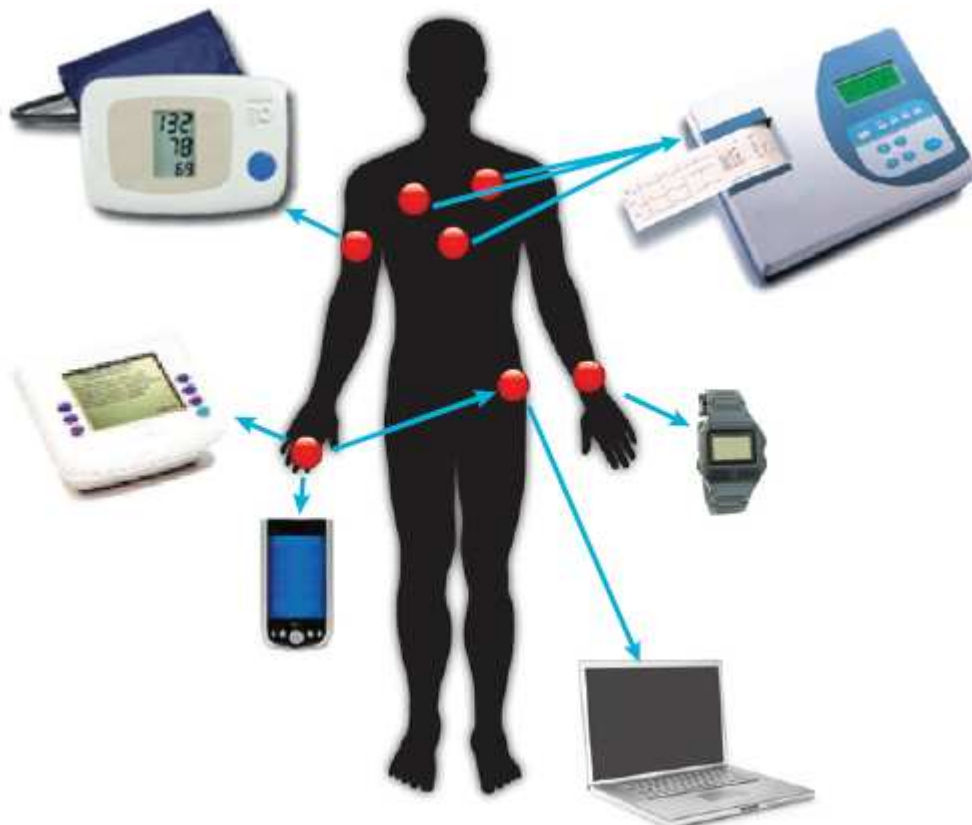


Figura. 3. 26. Aplicaciones de ZigBee en la Salud

- En el monitoreo de enfermedades crónicas se utiliza sensores que miden los signos vitales del paciente (por ejemplo, frecuencia cardiaca, temperatura) y los indicadores específicos de la enfermedad (por ejemplo, presión arterial, nivel de glucosa en la sangre, EKG) estos indicadores son monitoreados para determinar las anomalías y detectar tendencias. El seguimiento se realiza de forma periódica y la información es enviada a un servidor de base de datos, donde el doctor y los familiares pueden supervisar el progreso de la enfermedad.
- Medición periódica de los signos vitales que permiten el diagnóstico temprano y la alerta de posibles problemas en la salud.
- Permite realizar un seguimiento más estrecho de los efectos de la medicación haciendo que el tratamiento sea más personalizado al paciente.
- Detectar que la persona ha caído y emite una alarma, se transmitirá inalámbricamente la actividad del usuario en función de la posición del elemento sensor.
- Permite a un individuo dar la alarma pulsando un botón en el dispositivo que se encuentra en su muñeca. De forma inalámbrica se alerta a los recursos apropiados en situaciones de emergencia.
- El uso de sensores ZigBee reduce los costos de salud al eliminar la necesidad de hospitalización del paciente y promueve el cuidado personal y vida independiente.

3.15.4 Periféricos para PC

- Mouse
- Teclados
- Joystick

3.15.5 Otros

- Identificación vehicular, nodos ubicados en vehículos que permiten identificar al vehículo a distancia y descargar información que ha recopilado por un periodo de tiempo determinado
- Control de clima
- Predicción de terremotos

CAPITULO IV

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE COMUNICACIONES BASADO EN EL ESTANDAR IEEE 802.15.4/ZIGBEE

4.1 MATERIALES UTILIZADOS Y MÉTODOS

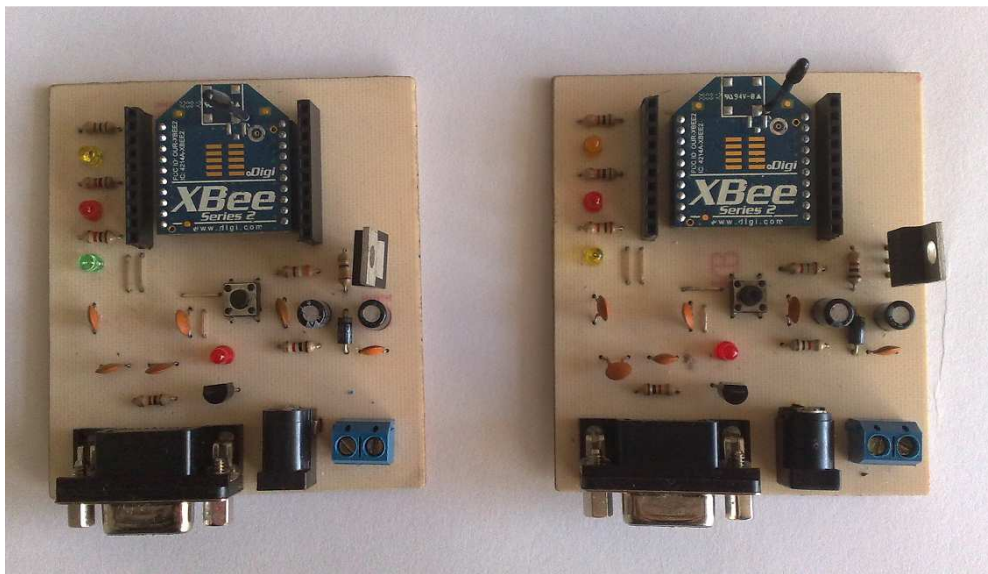


Figura. 4. 1. Módulos XBee: Coordinador y Dispositivo final

El capítulo describe brevemente el funcionamiento de los equipos que conforman el proyecto y los resultados obtenidos en las pruebas realizadas. Se realizaron pruebas a nivel eléctrico, formas de asociación, consumo de energía, radiofrecuencia y propagación.

4.1.1 Descripción de los módulos RF ZigBee

Los módulos RF XBee fueron diseñados para operar dentro del protocolo ZigBee y apoyar las necesidades únicas de bajo costo y bajo consumo de energía de redes inalámbricas de sensores. [32]

Los módulos requieren mínimo de energía y proporcionan una entrega fiable de datos entre los dispositivos remotos. Operan en la frecuencia de 2,4 GHz ISM.

- **Características principales**

Alto rendimiento y bajo costo

- Interiores/Urbano: hasta 100' (30 m)
- Exteriores/línea de visión: hasta 300' (100 m)
- Potencia de transmisión: 1 mW (0 dBm)
- Sensibilidad del receptor: -92 dBm

Bajo consumo

- Corriente de TX: 45 mA (@3.3 V)
- Corriente de RX: 50 mA (@3.3 V)
- Corriente modo inactivo: < 10 μ A

Fácil manejo de los módulos

- Se usa comandos AT para la configuración de parámetros de los módulos.
- Son de tamaño pequeño.
- Amplio conjunto de comandos para su configuración.
- Software libre X-CTU (software para pruebas y configuración).
- Soporte técnico gratuito.

Red y seguridad

- Usa DSSS (espectro ensanchado por secuencia directa)
- Cada canal de secuencia directa tiene más de 65.000 direcciones de red única disponibles.
- Soporta topologías punto-punto, punto-multipunto, igual a igual y malla.

- **Especificaciones**

Tabla. 4. 1. Especificaciones técnicas de los módulos

ESPECIFICACIÓN	XBEE	
RENDIMIENTO	Alcance en ambientes interiores/zonas urbanas	Hasta 100' (30 metros)
	Alcance de RF en Línea de Visión para ambientes exteriores	Hasta 300' (100 metros)
	Potencia de Transmisión	1mW (0 dBm)
	Velocidad de datos RF	250.000 bps
	Sensibilidad del receptor	-92 dBm (1% PER)
REQUERIMIENTO DE POTENCIA	Suministro De voltaje	2.8 – 3.4 V
	Corriente de Operación (transmisión)	45mA (@ 3.3 V)
	Corriente de Operación (recepción)	50mA (@ 3.3 V)
	Corriente modo inactivo	< 10 μ A
GENERAL	Banda de frecuencia de funcionamiento	ISM 2.4 GHz
	Dimensiones	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)
	Temperatura de funcionamiento	-40 a 85°C (industrial)
	Opciones de Antena	Lleva integrado, chip o conector U. FL
RED Y SEGURIDAD	Topologías de red compatibles	Punto a punto, punto a multipunto, de igual a igual (<i>Peer-to-peer</i>) y de malla
	Número de Canales (seleccionable por software)	16 Canales de Secuencia Directa
	Opciones de direccionamiento	PAN ID, Canal y direcciones

- **Consideraciones del montaje**

El módulo RF XBee fue diseñado para ser montado en un socket (hembra) y por lo tanto no requiere ninguna soldadura durante el montaje en la placa. Se dispone de placas de interface RS-232 que tienen un socket de 20-pines para recibir los módulos.

- **Descripción de la placa**

La unidad utilizada para la programación y pruebas de funcionamiento es una base con conversores RS232 a serial, que mantiene compatibilidad con los niveles de voltaje de funcionamiento de la línea de equipos XBee de MaxStream perteneciente a la compañía DIGI. Esta unidad trabaja con todos los módulos XBee incluyendo las Series 1 y series 2, en versión estándar y versión Pro. La unidad consta con sockets de fácil inserción para la conexión de los equipos XBee, permitiendo acceso directo a los pines de comunicación serial, programación, y adicionales. La unidad soporta comunicación DTR permitiendo la reprogramación y configuración de los equipos XBee, mediante cualquier emulador de terminal o el software X-CTU proporcionado por MaxStream para la configuración y prueba de radio módems.

Especificaciones técnicas:

- Voltaje de Funcionamiento: 5 – 12 Vdc
- Voltaje regulado: 3.3 Vdc +/- 10%
- Corriente de funcionamiento: 30 – 150 mA (depende del módulo XBee conectado)
- Interfaz Serial: RS232 estándar, con conector DB9 hembra.
- Velocidad máxima de transmisión: 250 Kbps.
- Equipos compatibles: XBee® & XBee-PRO® DigiMesh™ 2.4 RF Modules, XBee® & XBee-PRO® ZB ZigBee® PRO RF Modules
- Indicadores luminosos: RX, TX y RSSI (indicador de potencia de señal de recepción).
- Puertos de conexión: 2 sockets adicionales de 2.54 mm de espaciamiento para acceso a todos los pines del radio modem.
- Características adicionales: Botón de reset, alimentación mediante bornera y plug estándar de 5 mm, protección para conexión en contrafase.

- **Descripción de pines**

Tabla. 4. 2. Descripción de pines de los módulos XBee

PIN #	NOMBRE	DIRECCIÓN	DESCRIPCIÓN
1	VCC	-	Fuente de alimentación
2	DOUT	Salida	Datos salida UART
3	DIN / $\overline{\text{CONFIG}}$	Entrada	Datos entrada UART
4	DO8	Salida	Salida digital 8
5	$\overline{\text{RESET}}$	Entrada	Reinicio del módulo (el pulso de reinicio debe ser de al menos 200 ns)
6	PWM0/RSSI	Salida	Salida PWM 0 / Indicador de intensidad de señal Rx
7	[reservado]	-	No conectar
8	[reservado]	-	No conectar
9	$\overline{\text{DTR/SLEEP_RQ/DI8}}$	Entrada	Línea de control del pin <i>sleep</i> o entrada digital 8
10	GND	-	Tierra
11	AD4/DIO4	Entrada/Salida	Entrada analógica 4 o I/O digital 4
12	$\overline{\text{CTS/DIO7}}$	Entrada/Salida	Control de flujo listo para enviar o I/O digital 7
13	ON/ $\overline{\text{SLEEP}}$	Salida	Indicador del estado del módulo
14	VREF	Entrada	Voltaje de referencia para las entradas A/D
15	<i>Associate</i> /AD5/DIO5	Entrada/Salida	Indicador de asociación, entrada analógica 5 o I/O digital 5
16	$\overline{\text{RTS/AD6/DIO6}}$	Entrada/Salida	Control de flujo solicitud de transmisión, entrada analógica 6 o I/O Digital 6
17	AD3/DIO3	Entrada/Salida	Entrada analógica 3 o I/O Digital 3
18	AD2/DIO2	Entrada/Salida	Entrada analógica 2 o I/O Digital 2
19	AD1/DIO1	Entrada/Salida	Entrada analógica 1 o I/O Digital 2
20	AD0/DIO0	Entrada/Salida	Entrada analógica 0 o I/O Digital 0

Las señales en bajo se distinguen por la línea horizontal encima de su nombre.

Notas de diseño:

- Conexiones mínima: VCC, GND, DOUT y DIN.
- Conexiones mínimas para la actualización de firmware: VCC, GND, DIN, DOUT, RTS y DTR.
- La dirección de la señal se especifica con respecto al módulo.
- El módulo incluye una resistencia de *pull-up* adjunta a RESET.
- Los pines no utilizados deben dejarse desconectados.

La figura 4.2 muestra las conexiones mínimas que necesita el módulo XBee para poder ser utilizado.

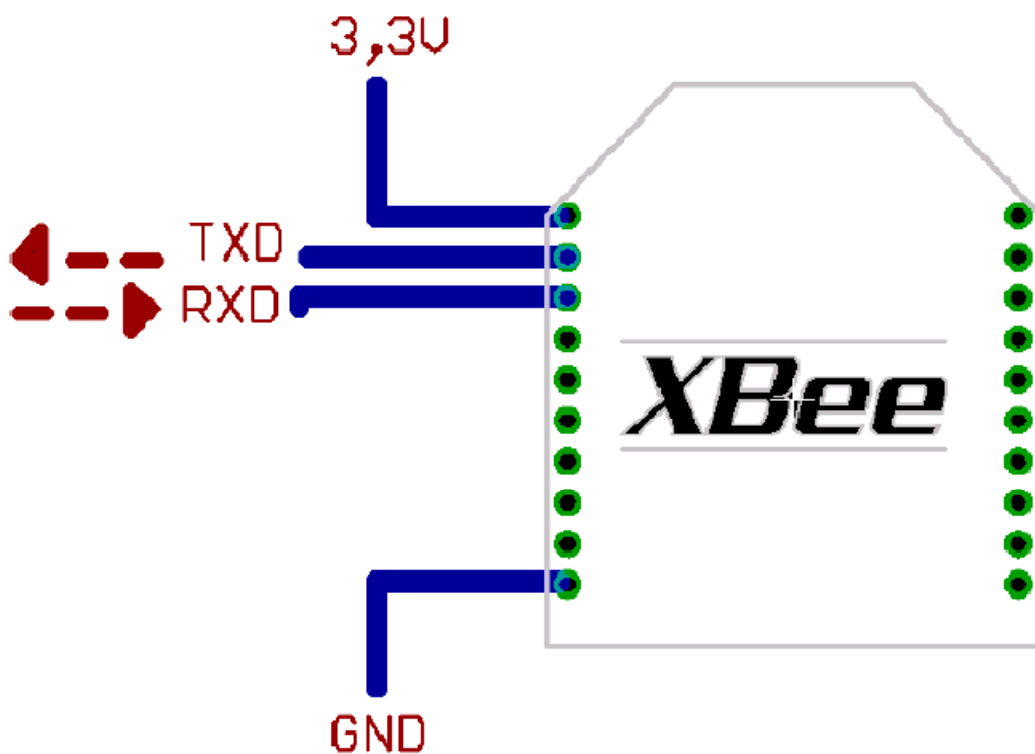


Figura. 4. 2. Conexiones mínimas requeridas para el XBee

El módulo requiere una alimentación desde 2.8 a 3.4 V, la conexión a tierra y las líneas de transmisión de datos por medio del UART (TXD y RXD) para comunicarse con un microcontrolador, o directamente a un puerto serial utilizando algún conversor adecuado para los niveles de voltaje.

4.1.2 Red ZigBee

- **Definiciones [32]**

Tipos de nodos ZigBee

– Coordinador

Es un nodo que tiene la función única de formar una red. El Coordinador es responsable de establecer el canal de funcionamiento y el PAN ID para toda la red. Una vez establecido, el Coordinador puede formar una red, permitiendo a routers y dispositivos finales asociarse a él. Cuando la red está formada, las funciones de Coordinador pueden ser las de un Router (que puede participar en el enrutamiento de paquetes y ser origen o destino para los paquetes de datos).

- ✓ Un coordinador por PAN.
- ✓ Establece/Organiza la PAN.
- ✓ Puede enrutar paquetes de datos a/desde otros nodos.
- ✓ Puede ser origen y destino de paquetes de datos.
- ✓ Es necesario que se conecte a la corriente eléctrica.

– Router

Crea/mantiene la información de la red y utiliza esta información para determinar la mejor ruta para un paquete de datos. Un Router debe unirse a una red antes de permitir que otros routers y dispositivos finales se unan a él.

Un Router puede participar en el enrutamiento de paquetes y está destinado a ser un nodo conectado a la corriente eléctrica.

- ✓ Varios routers pueden funcionar en una PAN.
- ✓ Puede enrutar paquetes de datos a/desde otros nodos.
- ✓ Puede ser origen y destino de paquetes de datos.

– ***End device***

Los dispositivos finales no tienen la capacidad de enrutamiento, deben siempre interactuar con su nodo principal (Router o Coordinador) con el fin de transmitir o recibir datos.

Un dispositivo final puede ser origen o destino de los paquetes de datos, pero no puede enrutarlos. Los dispositivos finales pueden ser alimentados por baterías y ofrecer operación de baja potencia.

- ✓ Varios dispositivos finales pueden operar en una PAN.
- ✓ Puede ser origen y destino de paquetes de datos.
- ✓ Todos los mensajes se transmiten a través de un Coordinador o Router.
- ✓ Tienen bajo consumo.

Protocolo ZigBee [32]

– **PAN**

Red de Área Personal. Una red de comunicación de datos que incluye un Coordinador y uno o más routers/dispositivos finales. La formación de la Red se rige por el ancho máximo de la red, máximo número de Routers y máximo número de dispositivos finales.

– **Asociación**

El proceso de un nodo para formar parte de una PAN ZigBee. Un nodo se convierte en parte de una red al unirse/asociarse a un coordinador o un router (que previamente se unió a la red). Durante el proceso de asociación, el nodo que permite la asociación (padre) asigna una dirección de 16-bit al nodo que se asocia (hijo).

– **Ancho máximo de la red**

El nivel de los descendientes de un coordinador. En una PAN MaxStream, el ancho máximo de la red es de 5.

– **Máximo número de Routers**

El número máximo de routers que puede unirse/asociarse a un nodo. El número máximo de routers en una PAN MaxStream es de 6.

– **Máximo número de dispositivos finales**

El número máximo de dispositivos finales que puede unirse a un nodo. El número máximo de dispositivos finales en una PAN MaxStream es de 14.

– **Dirección de red**

La dirección de 16-bit asignada a un nodo después de que se ha asociado a otro nodo (Coordinar).

– **Canal de funcionamiento**

La frecuencia seleccionada para comunicaciones de datos entre nodos. El canal de operación es seleccionado por el Coordinador en el encendido.

– **Escaneo de la energía**

Una exploración de los canales de RF que detecta la cantidad de energía presente en los canales seleccionados. El Coordinador utiliza la exploración de la energía para determinar del canal de funcionamiento más adecuado.

– **Solicitud de ruta**

Transmisión de Broadcast enviado por el coordinador o router en toda la red en un intento de establecer una ruta a un nodo de destino.

– **Respuesta de ruta**

La transmisión de unidifusión enviado de nuevo al autor de la solicitud de ruta. Se inicia con un nodo cuando recibe un paquete de petición de ruta y su dirección coincide con la dirección de destino en la solicitud de la ruta paquete.

– **Descubrimiento de ruta**

El proceso de establecer una ruta a un nodo de destino cuando no existe en la tabla de enrutamiento. Se basa en AODV (Ad-hoc On - demanda de enrutamiento por vector de distancia).

– **Pila ZigBee**

ZigBee es una especificación publicada para establecer protocolos de comunicación de alto nivel para su uso con módulos pequeños y de baja potencia. La pila ZigBee proporciona una capa de funcionalidad de la red en la parte superior de la especificación 802.15.4.

Por ejemplo, la malla y las capacidades de enrutamiento a disposición de ZigBee están ausentes en el protocolo 802.15.4.

• **Formación de la red [32]**

Un PAN ZigBee está formada por nodos asociados a un coordinador o previamente unidos a un router. Una vez el Coordinador define el canal de funcionamiento y PAN ID, puede permitir que routers y dispositivos finales se asocien a el. Cuando un nodo se une a una red, recibe una dirección de red de 16-bits.

Una vez que el router se ha incorporado a la red, también puede permitir que otros nodos se asocien a él. La asociación establece una relación padre/hijo entre dos nodos. El nodo que permite la unión es el padre y el nodo que se une es el hijo. La relación padre/hijo no es necesaria para el enrutamiento; sin embargo, es necesario para la formación de la red y la asignación de direcciones de red. Si un coordinador no existe, la red no puede ser formada. Un nodo no puede transmitir o recibir datos hasta que se una a un PAN.

Coordinador XBee

– Inicio de la red

Con el fin de formar una red, un coordinador debe seleccionar un canal de operación sin usar y el nombre de su red (PAN ID). Para ello, el Coordinador primero realiza una exploración de la energía en todos los canales como se especifica en su parámetro SC (*Scan Channels*-Escanear Canales).

El tiempo de exploración en cada canal está determinado por el parámetro SD (*Scan Duration*-Duración del Escaneado). Una vez que la exploración de energía se completa, un Active Scan (exploración activa) se expide.

El Active Scan devuelve una lista de los coordinadores y Routers descubiertos (hasta 5 resultados). La duración de la exploración activa (Active Scan) en cada canal es determinado también por el parámetro de SD. Un canal de operación desocupado se escoge para las operaciones de la PAN.

Si el parámetro ID (PAN ID) = 0, el Coordinador seleccionará un ID aleatorio para la PAN. De lo contrario, el Coordinador almacenada su parámetro de identificación.

Después de que el Coordinador se ha iniciado, permitirá que los nodos se asocien a él por un tiempo en función de su parámetro NJ (Node Join Time- Tiempo de Asociación Nodo).

El canal de operación y PAN ID se pueden leer con los comandos CH (canal de operación) y ID (ID PAN).

La dirección de 16 bits del Coordinador es siempre 0x0000.

– **Reiniciar coordinador**

Al reiniciar (Encender, FR (Reiniciar Software) o NR (Reiniciar Red)):

- ✓ Si un coordinador ha formado una red, se mantendrá la información del PAN ID y del canal de operación, así como una lista de sus nodos hijos. Sin embargo, si cualquiera de los parámetros SC (Escanear Canales) o ID (ID PAN) han cambiado y el Coordinador se reinicia, el Coordinador inicializa con el nuevo valor de SC y/o ID y se borrará la lista de nodos hijos.
- ✓ Si el Coordinador debe cambiar el canal de operación de una red establecida, puede alertar a todos los nodos de la red para dejar y reformar la red mediante el comando NR (Reiniciar Red) con un parámetro de '1'. Cuando se usa este comando, el coordinador envía un mensaje de broadcast en toda la red obligando a todos los nodos a desasociarse y reasociarse a un nuevo padre. El Coordinador, después de varios segundos, reinicia y permite la asociación de acuerdo a la configuración guardada. Una vez que el Coordinador inicializa, otros nodos pueden unirse a la PAN. Los otros nodos intentarán reunirse mediante el escaneo de todos los canales (según lo especificado por el parámetro SC) a un padre operando en el PAN ID (especificado por su parámetro ID). Esto reasignará una dirección de red de 16-bit a todos los nodos.

• **Red de comunicaciones ZigBee [32]**

Direccionamiento Zigbee

La dirección de red de 16-bit se asigna a un nodo cuando se asocia a una red. La dirección de red es única para cada nodo en la red. Sin embargo, las direcciones de red no son estáticas, pueden cambiar.

Las siguientes dos condiciones pueden hacer que un nodo reciba una nueva dirección de red:

- El dispositivo final no puede comunicarse con su padre.
- Un router o dispositivo final, envía un comando de notificación de que está huérfano para localizar a sus padres. Si el nodo principal no responde, el router o dispositivo final considera que no esta asociado y repite el proceso de unión a la red. Una vez que el nodo se une a la red, este y todos sus descendientes recibirán una nueva dirección de red.

Dado que todas las comunicaciones ZigBee usan direccionamiento de 16-bit, la dirección de 16 bit del nodo debe ser conocida antes de que las comunicaciones pueden tener lugar.

Direccionamiento Módulos XBee

Cada módulo de RF tiene una dirección única de 64 bits asignada de fábrica que se pueden leer usando los comandos SH (Número de serie High) y SL (Número de serie Low). Además, cada módulo puede almacenar una cadena de identificación usando el comando NI (Node Identifier-Identificador del Nodo).

Los módulos RF XBee pueden direccionarse utilizando su dirección de 64 bits (de fabrica), su cadena de identificación NI o ambas direcciones de red de 64 bits y de 16 bits. En el protocolo ZigBee, la dirección de red de 16-bits de un coordinador es siempre "0". Los nodos pueden direccionarse al Coordinador utilizando esta dirección.

– Direccionamiento 64 bits

Para enviar un paquete a un módulo RF utilizando su dirección de 64 bits (modo transparente): establezca los parámetros DH (Dirección de destino High) and DL (Dirección de destino Low) del nodo origen para que coincida con la dirección de 64 bits (parámetros SH (Número de Serie High) y SL (Número de Serie Low)) del nodo de destino.

Dado que el protocolo ZigBee se basa en direcciones de red de 16 bits para el enrutamiento, la dirección de 64 bits debe convertirse en una dirección de red de 16 bits antes de la transmisión de datos.

Si un módulo no sabe la dirección de red de 16 bits de una dirección dada de 64 bits, se transmitirá un broadcast mediante el comando Network Address Discovery (descubrir direcciones de red). El módulo con una correspondencia con la dirección de 64 bits transmitirá nuevamente su dirección de red de 16-bit.

Los módulos mantienen una tabla que puede almacenar hasta siete direcciones de 64 bits y sus correspondientes direcciones de red de 16-bits.

– **Direccionamiento Coordinador**

Un coordinador puede ser direccionado utilizando su dirección de 64 bits o cadena de direccionamiento NI. Como alternativa, debido a que el Coordinador ZigBee tiene una dirección de red de "0", se puede direccionar por dirección de red de 16-bit de la siguiente manera: establecer en el módulo de transmisión las direcciones de destino, como se muestra a continuación:

DL (Dirección de Destino Low) = 0

DH (Dirección de Destino High) = 0

• **Comunicación Serial [32]**

El módulo RF XBee posee una interfaz física de comunicaciones serial asincrónica para conectarse a un dispositivo. A través de su puerto serial, el módulo puede comunicarse con cualquier lógica y voltaje compatible con la UART.

– **Flujo de datos UART**

Los dispositivos que disponen de una interfaz UART se pueden conectar directamente a los pines del módulo de RF como se muestra en la siguiente figura 4.3.

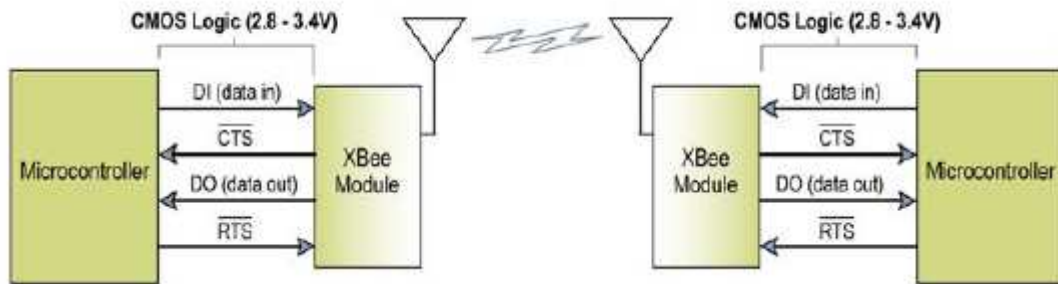


Figura. 4. 3. Diagrama de flujo de datos del sistema en un entorno de interfaz UART (Se distingue las señales Low con la línea horizontal sobre el nombre de la señal.)

DATOS SERIALES: Los datos ingresan al módulo UART a través del pin DI (pin 3) como una señal serial asíncrona. La señal debe estar en alto cuando no se están transmitiendo datos.

Cada byte de datos se compone de un bit de inicio (Low), 8 bits de datos (bit menos significativo primero) y un bit de parada (High). La siguiente figura 4.4 ilustra el patrón del bit serial de datos que pasan a través del módulo.

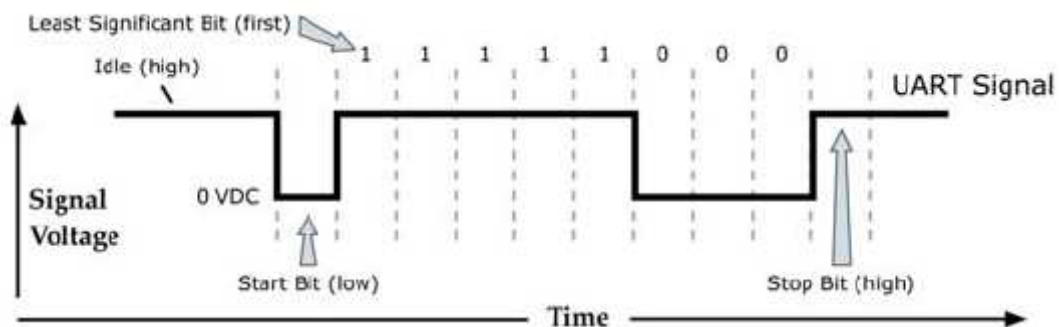


Figura. 4. 4. Paquetes de datos UART 0x1F (número decimal 31), transmitido a través del módulo de RF. Ejemplo de Formato de datos es 8-N-1 (bits - la paridad - # de bits de parada)

El módulo UART realiza las tareas, tales como sincronización y la comprobación de paridad, que se necesitan para la comunicación de datos. La comunicación serial dependerá de que los dos UARTs tengan la configuración compatible (velocidad, paridad, bits de inicio, bits de parada, bits de datos).

- **Operación del módulo de RF [32]**

Operación Transparente

Al funcionar en modo transparente, los módulos se configuran mediante los comandos AT. Los módulos actúan como reemplazo de la línea serial UART, todos los datos recibidos a través del pin DI se pone en cola para la transmisión de RF.

Los datos se envían a un módulo definido por los parámetros DH (Dirección High de destino) y DL (Dirección Low de destino).

Este modo está destinado principalmente a la comunicación punto a punto, donde no es necesario ningún tipo de control. También se usa para reemplazar alguna conexión serial por cable, ya que es la configuración más sencilla posible y no requiere una mayor configuración.

En este modo, la información es recibida por el pin 3 del módulo XBee, y guardada en el buffer de entrada. Dependiendo de cómo se configure el comando RO, se puede transmitir la información apenas llegue un carácter (RO=0) o después de un tiempo dado sin recibir ningún carácter serial por el pin 3.

En ese momento, se toma lo que se tenga en el buffer de entrada, se empaqueta, es decir, se integra a un paquete RF, y se transmite.

Otra condición que puede cumplirse para la transmisión es cuando el buffer de entrada se llena.

Modo Inactivo

Al no recibir o transmitir datos, el módulo RF se encuentra en modo de inactividad. Durante el modo de inactividad, el módulo RF también controla la validez de los datos RF. El módulo cambia a los otros modos de funcionamiento bajos las siguientes condiciones:

- Modo de transmisión (Los datos seriales en el buffer DI están listos para ser empaquetados).
- Modo de recepción (Se recibe datos RF válidos a través de la antena).
- Modo de espera (Solo dispositivos finales).
- Modo de comando (se ejecuta secuencia de modo de comando)

Modo de transmisión

Cuando los datos seriales se han recibido y están listos para su empaquetamiento, el módulo RF saldrá del modo inactivo y tratará de transmitir los datos. La dirección de destino determina que nodo(s) recibirán los datos.

Antes de la transmisión de los datos, el módulo se asegura que la dirección de red de 16-bits y la ruta del nodo de destino se han establecido.

Si no se conoce la dirección de red de 16-bit, se llevará a cabo el descubrimiento de la dirección de red (Network Address Discovery) con el propósito de establecer una ruta para el nodo de destino.

Los datos se transmitirán una vez establecida una ruta. Si el descubrimiento de rutas no logra establecer una ruta, el paquete será descartado.

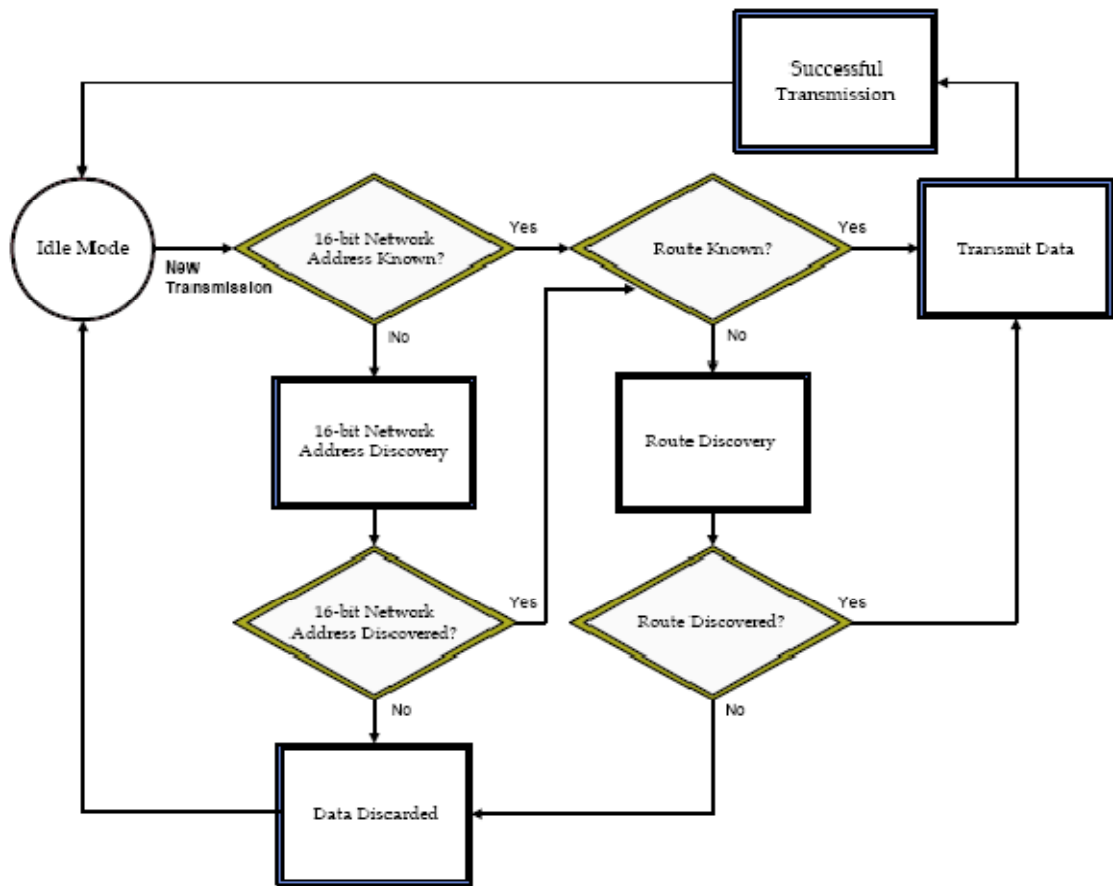


Figura. 4. 5. Secuencia Modo de Transmisión

Modo de recepción

Si un paquete RF válido es recibido y su dirección corresponde al parámetro MY (Dirección de origen 16-bit) del módulo RF, los datos se transfieren al buffer DO.

Modo sleep

Los modos de sleep se activan en el módulo de RF para entrar en estados de bajo consumo de energía cuando no estén en uso.

El comando SM se utiliza para establecer y leer los ajustes del modo de sleep. Las opciones de comandos SM varían en función del tipo de sistema de red. SM puede tomar los siguientes valores:

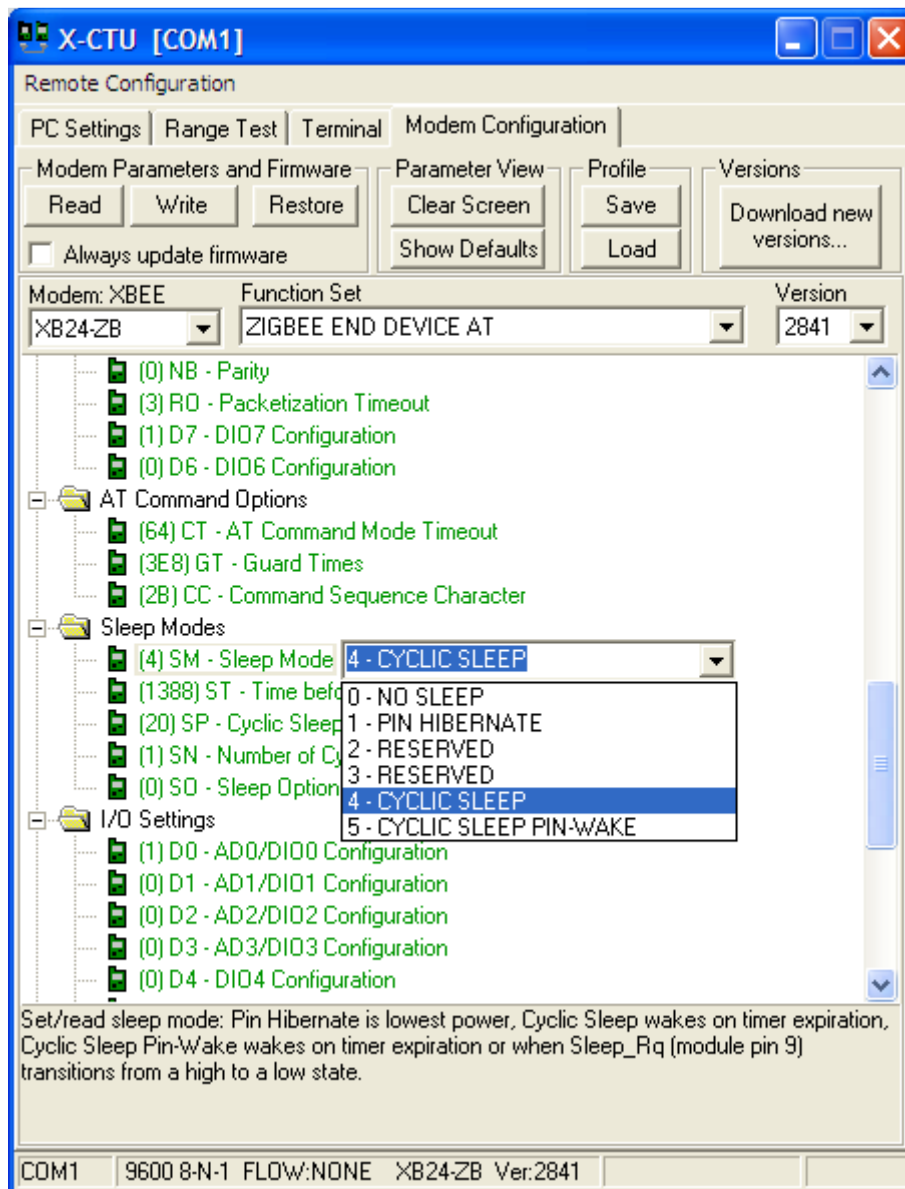


Figura. 4. 6. Opciones de modos Sleep

- En el nodo XBee el modo de espera (SM = 0) no se admite.
- **Modo de espera controlado por pin**
 - ✓ SM = 1
 - ✓ Existe un pin de control
 - ✓ Consumo de corriente <math><10 \mu\text{A}</math> (@ 3,0 VCC)
 - ✓ Se despierta en un tiempo de 13,2 mseg

Este modo es activado por nivel de tensión, cuando Sleep_RQ tiene una señal en alto, el módulo terminará cualquier actividad de transmitir, recibir o actividades de asociación y entra en modo inactivo y luego entrar en un estado de sueño. El módulo no responde a la actividad ya sea de serie o RF, mientras que el pin de sueño tenga una señal en bajo.

Para despertar a un módulo que esta dormido en modo de pin Hibernate, el Sleep_RQ debe tener una señal en bajo y está listo para transmitir o recibir cuando CTS esta en bajo.

– **Modo Cíclico de Sleep**

- ✓ SM = 4
- ✓ Típica Corriente: <math><50 \mu\text{A}</math> (cuando duerme)
- ✓ Se despierta en un tiempo de: 2 ms

El módulo está configurado para dormir y despertar una vez por ciclo. Los modos cíclicos del sueño permiten a los módulos la verificación periódica de los datos RF. Se despierta para verificar si existe datos RF y sino existen se vuelve a dormir pero si se transmiten datos el módulo permanecerá despierto para permitir la comunicación. Tener en cuenta que el CTS estará siempre en bajo cuando el nodo despierte para permitir la comunicación cuando este lo desee.

– **Modo Cíclico de Sleep con pin despertador**

Se configura SM=5, se usa este modo para despertar a un módulo que esta dormido a través de la interfaz de RF o por una señal en bajo en Sleep_RQ. Este modo funciona como el descrito anteriormente con la diferencia que tiene un pin que controla cuando despierta el nodo.

Cuando el módulo tiene una señal en bajo en Sleep_RQ despierta y conjuntamente con una señal en bajo en CTS y estará listo para transmitir y recibir. Sino detecta ninguna actividad el módulo volverá a dormir,

Modo de comando

Para modificar o leer los parámetros del módulo RF, el módulo primero debe entrar en modo de comando, un estado en el cual los caracteres seriales de entrada son interpretados como comandos.

4.1.3 Análisis del Software

El software requerido para la configuración de los equipos XBee es el X-CTU proporcionado por MaxStream que en el presente proyecto se utiliza para la reprogramación y prueba de radio módems. [33]

El instalador se lo puede descargar de la página <http://www.digi.com/> e instalarlo de una forma rápida y sencilla. [34]

A continuación se examinará brevemente cada función para entender mejor el programa y como usarlo. El X-CTU es una aplicación basada en Windows proporcionada por Digi. Este programa fue diseñado para interactuar con archivos de firmware encontrados en los productos RF de Digi y para proporcionar una fácil interfaz gráfica de usuario.

- **Configuración de PC (PC Settings)**

Permite a un cliente seleccionar el puerto COM y configurar este puerto para adaptarse a la configuración de las radios. Además permite configurar opciones más generales para los comandos AT, como el signo elegido para salir del modo de comandos, que por defecto corresponde al signo + (**2B en hexadecimal**).

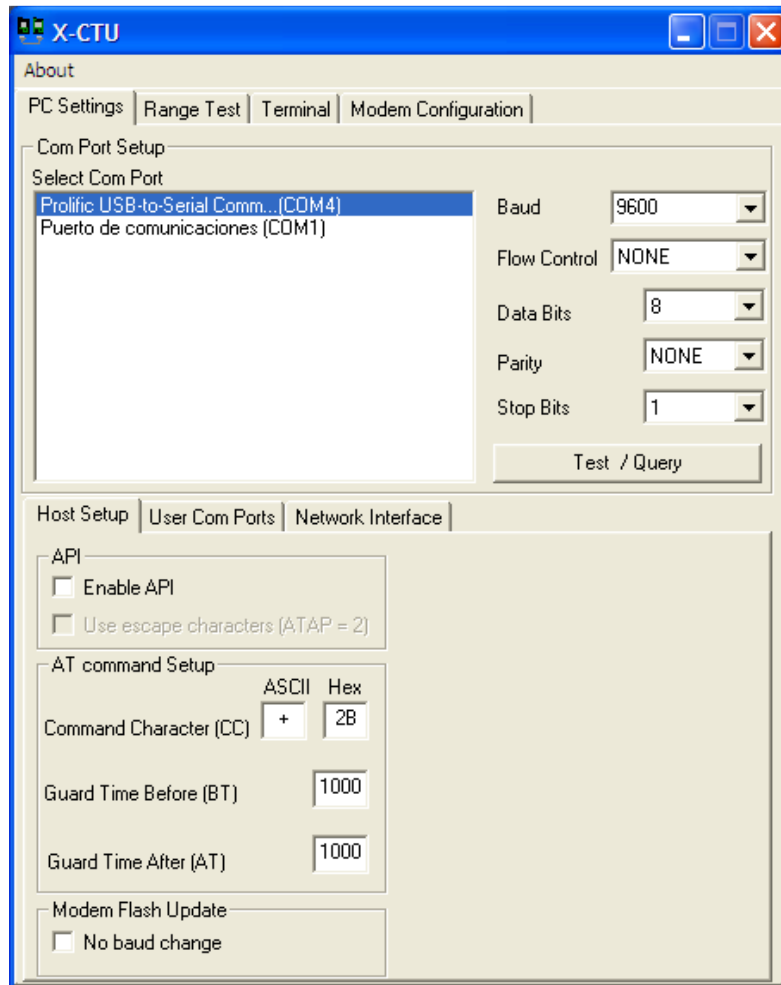


Figura. 4. 7. Función PC Settings del Software X-CTU

El botón de prueba/consulta se utiliza para probar el puerto COM seleccionado y la configuración de la PC. Si la configuración y el puerto COM son correctos, se recibe una respuesta similar a la que se muestra en la figura 4.8.

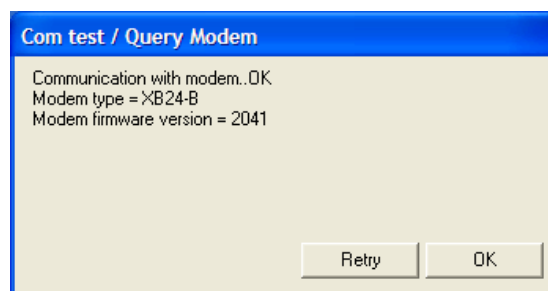


Figura. 4. 8. Respuesta satisfactoria del COM

- **Rango de prueba (Range Test)**

Permite a un cliente realizar una prueba de rango entre dos radios. Es posible enviar una cadena de datos de cualquier tipo para probar el rango de alcance de la señal. Esto genera automáticamente datos y los envía por el módulo, de tal forma que permite verificar cuales datos llegan buenos y cuales no y a partir de esa estadística determinar el rango o alcance de la señal.

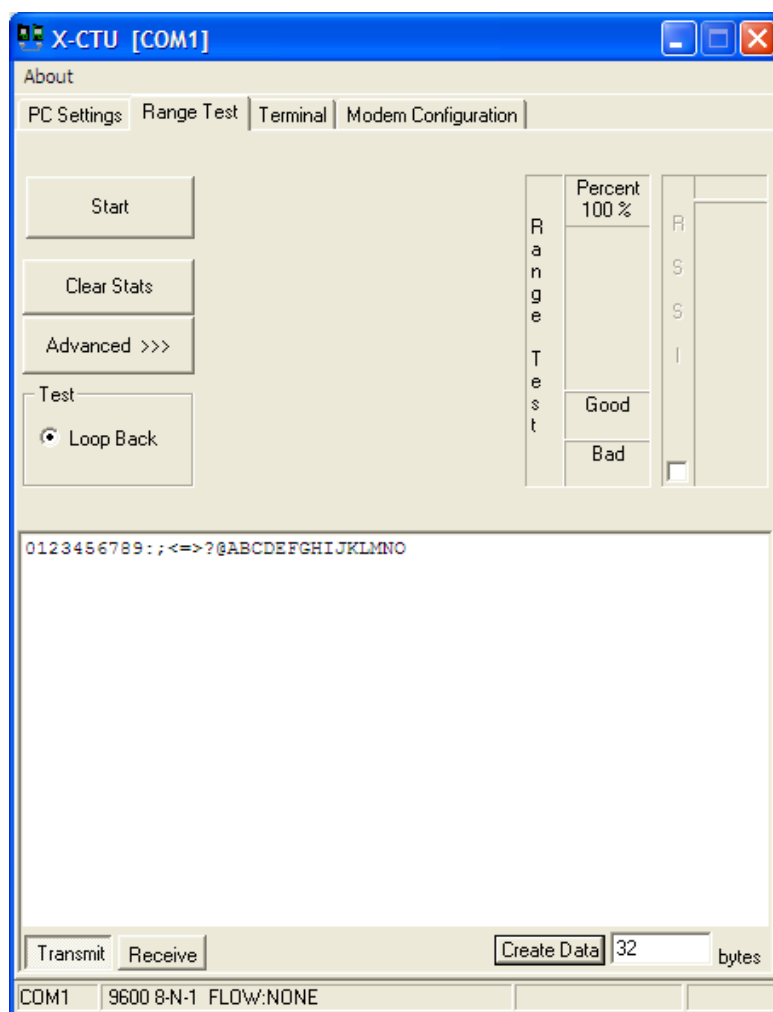


Figura. 4. 9. Función Range Test del Software X-CTU

La opción de RSSI de los X-CTU permite al usuario ver el RSSI (Received Signal Strength Indicator) de un paquete recibido al realizar una prueba de rango.

- **Terminal**

Permite el acceso al puerto COM de las computadoras con un programa de emulación de terminal, el funcionamiento es idéntico al del Hyperterminal. También existe la posibilidad de acceder al firmware de los radio utilizando los comandos AT.

Tiene tres funciones básicas:

- Emulador de terminal.
- Capacidad para enviar y recibir paquetes de datos predefinidos (paquete de ensamble).
- Capacidad para enviar y recibir datos en hexadecimal y formatos ASCII (Mostrar/Ocultar hex).

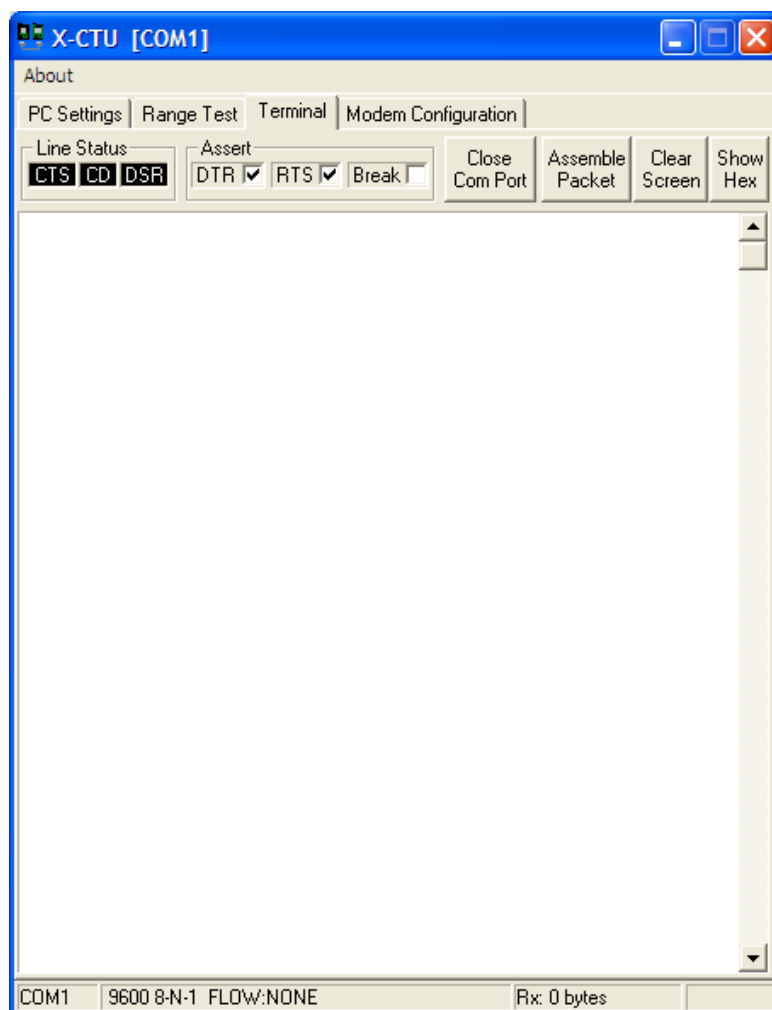


Figura. 4. 10. Función Terminal del Software X-CTU

- **Configuración del módem (Modem Configuration)**

Permite al usuario programar los ajustes de firmware de los radios a través de una interfaz gráfica. También permite cambiar las versiones de firmware.

Es decir se puede leer, guardar o cargar cierta configuración predeterminada. Permite ver cómo está configurado cada módem, cambiar alguna característica o luego guardarla o cargar una previamente guardada.

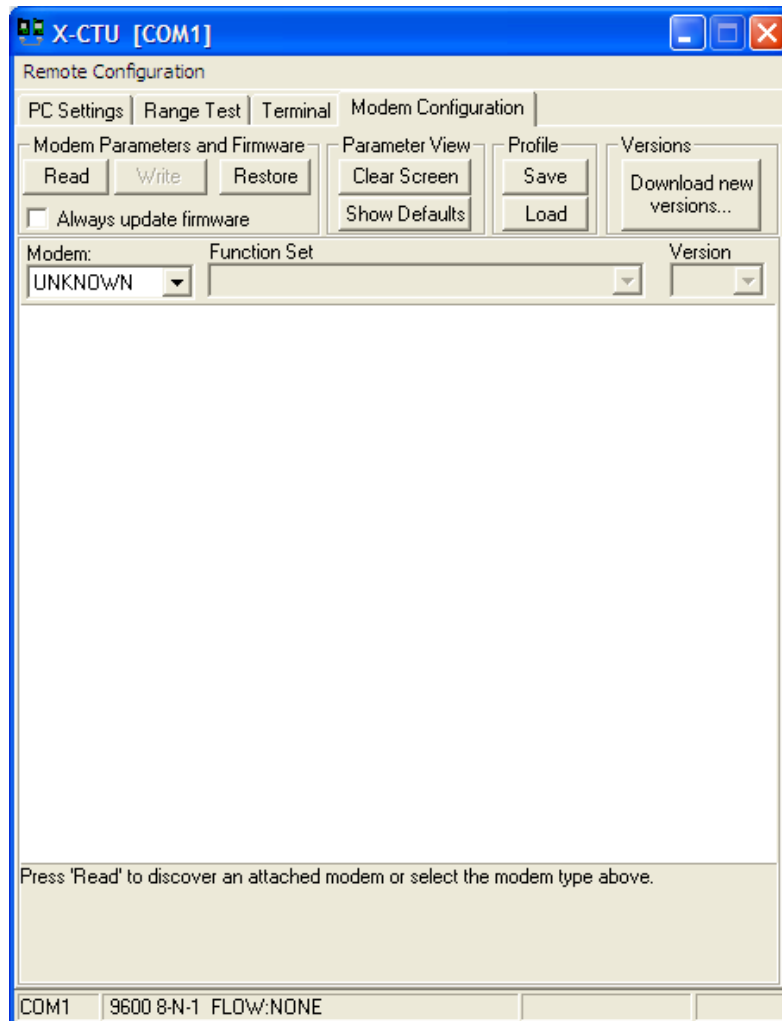


Figura. 4. 11. Función Modem Configuration del Software X-CTU

4.2 IMPLEMENTACION DEL PROTOTIPO

4.2.1 Comandos de referencia

Todos los valores de parámetros están en formato hexadecimal. [34]

- **Comandos de red**

- **ID (*Pan ID*)**

El comando ID se utiliza para establecer y leer la identificación de la PAN (Red de área personal) del módulo de RF. Sólo los módulos con el mismo identificador de PAN pueden comunicarse entre sí.

RANGO: 0xFFFF.

Por otra parte, el ID = 0 (por defecto) para el coordinador le permite elegir un ID aleatorio para la PAN y en el dispositivo final le permite unirse a cualquier PAN.

- **SC (*Scan Channels*)**

Buscar canales. El comando SC se usa para establecer y leer la lista de canales para escanear.

Coordinador: lista de canales para elegir antes de iniciar la red.

Router/dispositivo final: lista de canales que serán escaneados para encontrar un Coordinador/Router para unirse.

RANGO: 0xFFFF.

Tabla. 4. 3. Canales de frecuencia disponibles en los módulos XBee

Bit (Channel)	Bit (Channel)	Bit (Channel)	Bit (Channel)
0(0x0B)	4(0x0F)	8(0x13)	12(0x17)
1(0x0C)	5(0x10)	9(0x14)	13(0x18)
2(0x0D)	6(0x11)	10(0x15)	14(0x19)
3(0x0E)	7(0x12)	11(0x16)	15(0x1A)

– **SD (*Scan Duration*)**

Coordinador, El comando se usa para establecer/leer el exponente de la duración de escaneo. El exponente configura la duración de la exploración activa y del escaneo de energía durante la inicialización del coordinador.

Duración de escaneo = $SC * (2 \wedge SD) * 15.36ms$. (SC = # canales)

RANGO: 0-0x07

Nodo, Establecer/leer el exponente de la duración de escaneo. El exponente configura la duración de la exploración activa (*Pan Scan*) en cada canal definido por SC mientras intenta unirse a un PAN.

Duración de escaneo = $SC * (2 \wedge SD) * 15.36ms$. (SC = # canales)

RANGO: 0-0x07

– **OP (*Operating PAN ID*)**

Este parámetro sirve para leer la identificación de la PAN (*PAN ID*) en la cual está operando el modulo ZigBee.

– **CH (*Operating Channel*)**

El comando CH se utiliza para leer el canal en el que las conexiones RF operan entre los módulos ZigBee.

El módulo utiliza los números de canal de la norma 802.15.4.

Frecuencia central = $2.405 + (CH - 11) * 0.005$ GHz

Donde CH equivale al número del canal entre 11 y 26.

Frecuencia [GHz]					
canal	hexadecimal	inferior	central	superior	Comando AT
11	0x0B	2,4025	2,4050	2,4075	ATCH0B
12	0x0C	2,4075	2,4100	2,4125	ATCH0C
13	0x0D	2,4125	2,4150	2,4175	ATCH0D
14	0x0E	2,4175	2,4200	2,4225	ATCH0E
15	0x0F	2,4225	2,4250	2,4275	ATCH0F
15	0x10	2,4225	2,4250	2,4275	ATCH10
17	0x11	2,4325	2,4350	2,4375	ATCH11
18	0x12	2,4375	2,4400	2,4425	ATCH12
19	0x13	2,4425	2,4450	2,4475	ATCH13
20	0x14	2,4475	2,4500	2,4525	ATCH14
21	0x15	2,4525	2,4550	2,4575	ATCH15
22	0x16	2,4575	2,4600	2,4625	ATCH16
23	0x17	2,4625	2,4650	2,4675	ATCH17
24	0x18	2,4675	2,4700	2,4725	ATCH18
25	0x19	2,4725	2,4750	2,4775	ATCH19
26	0x1A	2,4775	2,4800	2,4825	ATCH1A
Frecuencia Base		2,405	GHz		

Figura. 4. 12. Frecuencias de los módulos XBee

- **Comandos de direccionamiento**

- **DH (Destination Address High)/ DL (Destination Address Low)**

El parámetro DH sirve para establecer/leer la parte superior de 32 bits de la dirección de destino de 64 bits y DL la parte inferior. 0x000000000000FFFF es la dirección de broadcast para el PAN. 0x0000000000000000 se puede utilizar como dirección del coordinador PAN.

RANGO: 0-0XFFFFFFFF

– **NI (*Node Identifier*)**

El comando NI se utiliza para establecer y leer una cadena para identificar un nodo en particular.

Reglas:

- ✓ Registro sólo acepta datos ASCII imprimibles.
- ✓ Una cadena no puede iniciar con un espacio.
- ✓ Un enter termina el comando.
- ✓ El comando finalizará automáticamente cuando el máximo de bits para la cadena han sido introducidos.

– **SH (*Serial Number High*)/SL (*Serial Number Low*)**

El comando SH se utiliza para leer los 32 bits altos de la dirección única IEEE de 64 bits del módulo y SL los 32 bits bajos. El número de serie del módulo se fija en la fábrica y es sólo lectura.

– **MY (*16-bit Network Address*)**

Leer los 16 bits de la dirección de red para el módem. Si MY tiene un valor de 0xFFFFE significa que el dispositivo no se ha unido a una PAN.

• **Comandos de interfaz RF**

– **PL (*Power Level*)**

Seleccionar/Leer la potencia de salida de Tx. Los niveles aproximados de potencia (XBee): 0 = -7dBm, 1 = -3dBm, 2 = -1dBm, 3 = 1 dBm, 4 = 3 dBm.

• **Comandos de interfaz serial**

– **BD (*Baud Rate*)**

Establecer/ leer la velocidad de transmisión de la interfaz serial para la comunicación entre el puerto serial del módem y un host.

RANGO:

0 = 1200 bps

1 = 2400 bps

2 = 4800 bps

3 = 9600 bps

4 = 19200 bps

5 = 38400 bps

6 = 57600 bps

7 = 115200 bps

– **NB (Parity)**

El comando NB se utiliza para seleccionar o leer la configuración de la paridad del módulo de RF para las comunicaciones UART.

• **Comandos de ahorro de energía**

– **SM (*Sleep Mode*)**

El comando SM se utiliza para establecer y leer los ajustes del modo del sueño. Las opciones de SM varían según el tipo de sistema de redes que se desee implementar:

- SM=1 Pin hibernar, es la opción de más bajo consumo de energía
- SM=4 Modo cíclico de sueño, se despierta del sueño por la expiración del temporizador.
- SM=5 Modo cíclico de sueño con pin-despertador, se despierta por la expiración del temporizador o cuando *Sleep_Rq* (pin 9 del módulo) tiene una transición de una señal en alto a una en bajo.

– **ST (*Time before Sleep*)**

El comando ST se utiliza para establecer y leer el periodo de inactividad (datos seriales o RF no son enviados o recibidos) antes de activar el modo de sueño. El parámetro ST se utiliza sólo con los modos cíclicos del sueño (SM = 4-5).

RANGO: 0X1-0XFFFE X 1 MS

– **SP (Cyclic Sleep Period)**

El comando SP se utiliza para establecer y leer la duración del tiempo en el que un módulo de RF duerme. Después del período cíclico de sueño, el módulo se despierta y chequea datos. Si no hay datos, el módulo se vuelve a dormir.

El parámetro SP es válido en módulos configurado para operar en modo cíclico de sueño (SM = 4-5). En el Coordinador y nodos el SP debe ser siempre igual.

En un router o el coordinador, SP determina el tiempo de espera de transmisión cuando se envía a un dispositivo final a dormir. SP también determina el tiempo que el padre almacenará un mensaje para un hijo dormido.

RANGO: 0X20-0XAF0 X 10 MS

– **SN Coordinador (Number of Cyclic Sleep Periods)**

Establecer/leer el numero de periodos cíclicos de sleep usados para calcular el tiempo de espera de sondeo de un dispositivo final. Si un dispositivo final no envía una solicitud de sondeo a su coordinador o router en el tiempo de espera para sondeo, el dispositivo final se elimina de la tabla de hijos. El tiempo de espera para sondeo se calcula en milisegundos: $(3 * SN * (SP * 10ms))$, mínimo de 5 segundos. Ejemplo, si SN=15, SP=0x64, el tiempo de espera es de 45 segundos.

– **SN Nodo (Number of Cycles to power down IO)**

Establecer/leer el número los ciclos de sueño cíclico durante el sueño cíclico el pin de On/Sleep debe permanecer en bajo. Esto permite a una aplicación externa dormir más tiempo que el tiempo máximo de SP. Se establece en 1 para tener on/sleep en alto después de cada SP (por defecto).

RANGO: 1-0XFFFF

– **SO (Sleep Options)**

Establecer/leer las opciones de sleep. Las opciones de campo de bits incluyen: 0x02

– El módulo despierta el tiempo ST en cada despertar del ciclo (después de dormir el

tiempo $SP * SN$), 0x04 – Habilita la opción de sleep cíclico prolongado (dormir durante todo el tiempo $SN*SP$ - posible pérdida de datos). Todas las otras opciones de bits se debe establecer en 0. RANGO: 0-0xFF

4.2.2 Diagrama

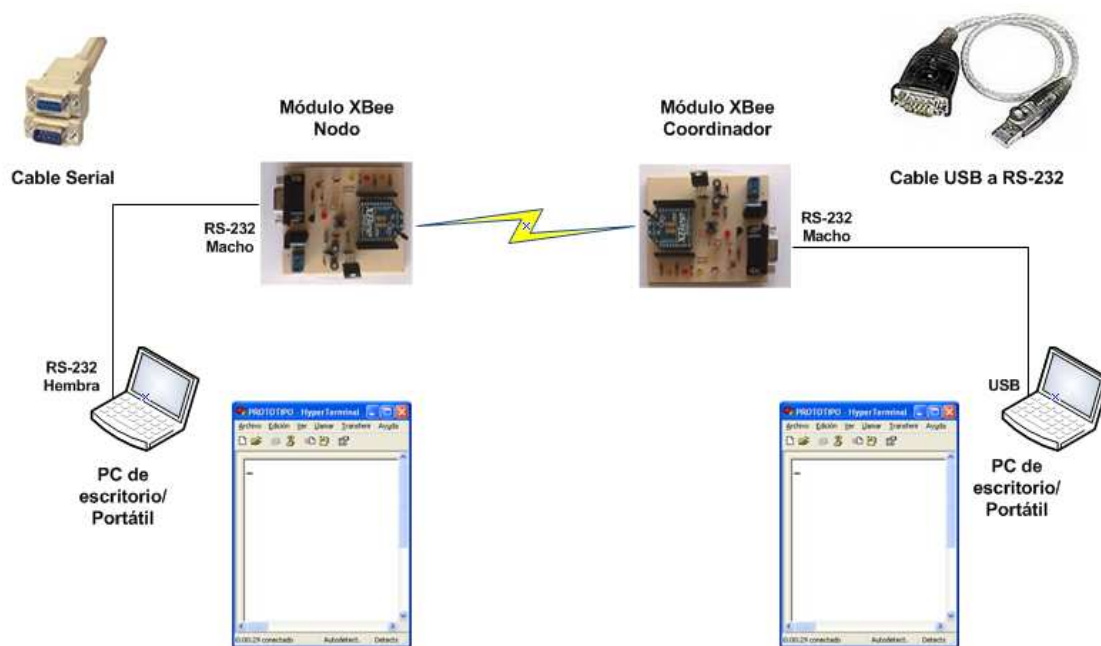


Figura. 4. 13. Diagrama del prototipo de comunicación

4.2.3 Elementos

El prototipo de comunicación se implementa con los siguientes elementos:

- 2 módulos RF XBee (1 coordinador y 1 nodo)
- 2 fuentes de alimentación
- 2 placas de desarrollo RS-232
- 1 cable serial RS-232
- 1 cable USB a RS-232

- 2 baterías de 9 V

4.2.4 Configuración del módulo RF XBee

- **Formación de la red**

La red ZigBee está formada por un coordinador y un nodo (end device). El Coordinador es el responsable de definir el canal de funcionamiento y PAN ID. Cuando el nodo se une a una red o asocia a un coordinador, recibe una dirección de red de 16-bits. Si no existe coordinador, una red no puede ser formada. Un nodo no puede transmitir o recibir datos hasta asocie a una PAN.

– **COORDINADOR**

Configuración por default del Coordinador.

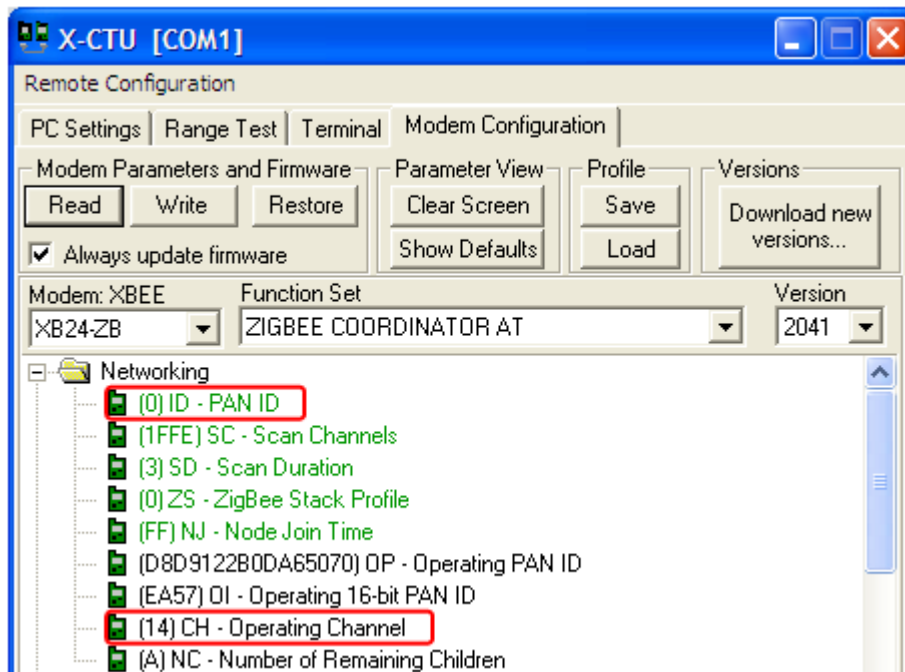


Figura. 4. 14. Valores de default del Coordinador XBee

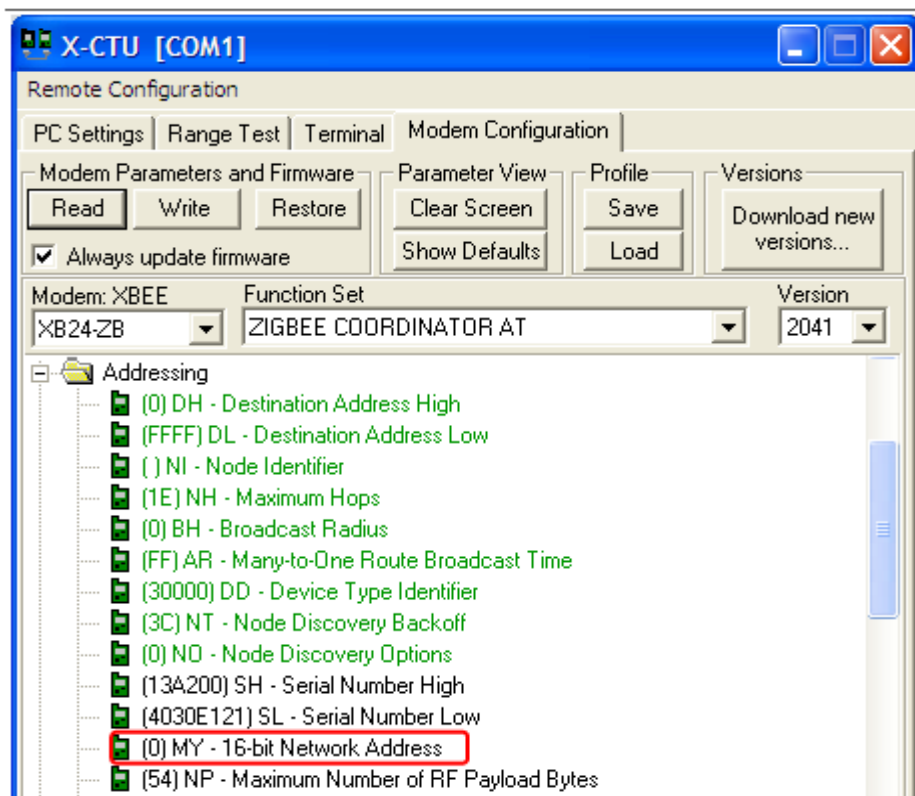


Figura. 4. 15. Valores de default del Coordinador XBee

– NODO (END DEVICE)

Configuración por default del Nodo.

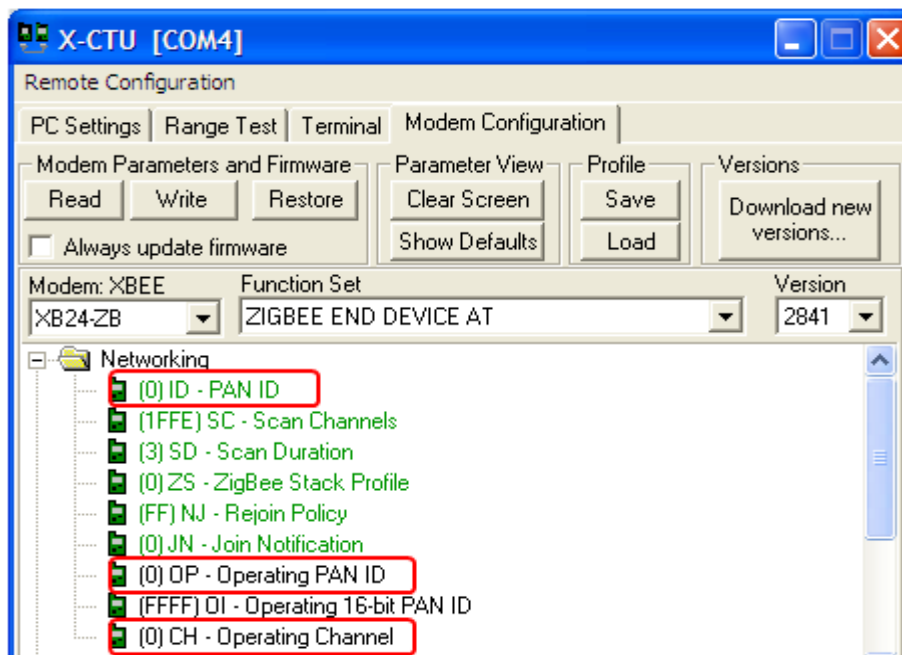


Figura. 4. 16. Valores de default del Nodo XBee

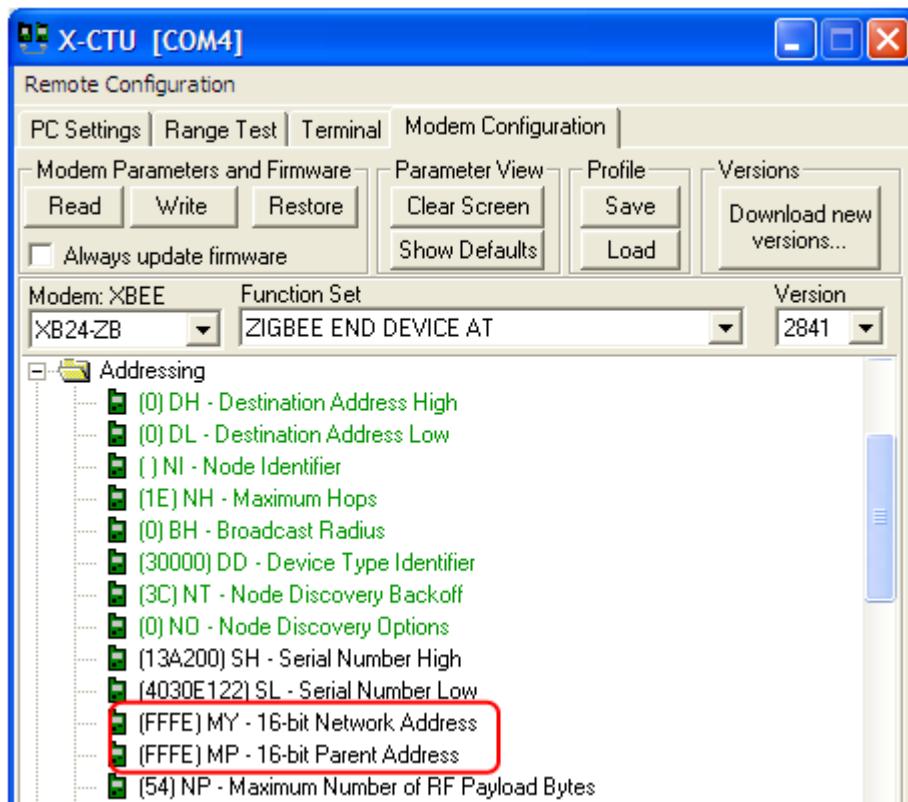


Figura. 4. 17. Valores de default del Nodo XBee

- **Asociación**

Para realizar la asociación de un nodo a un coordinador existen dos maneras de configuración. El parámetro PAN ID determina el tipo de asociación. Cada dispositivo en una PAN tiene un identificador llamado ID (ATID), el cual debe ser el mismo para todos los módulos de la misma PAN.

Tabla. 4. 4. Descripción del parámetro ID en los módulos XBee

COMANDO	DESCRIPCIÓN	RANGO DEL PARAMETRO
AT		
ID	Se utiliza para establecer y leer la identificación de la PAN (Personal Area Network) del módulo RF.	0 - 0xFFFF

– **Asociación manual**

Para este modo de asociación se configura el mismo PAN ID en ambos módulos, coordinador y nodo.

Coordinador, se configura de acuerdo al siguiente parámetro:

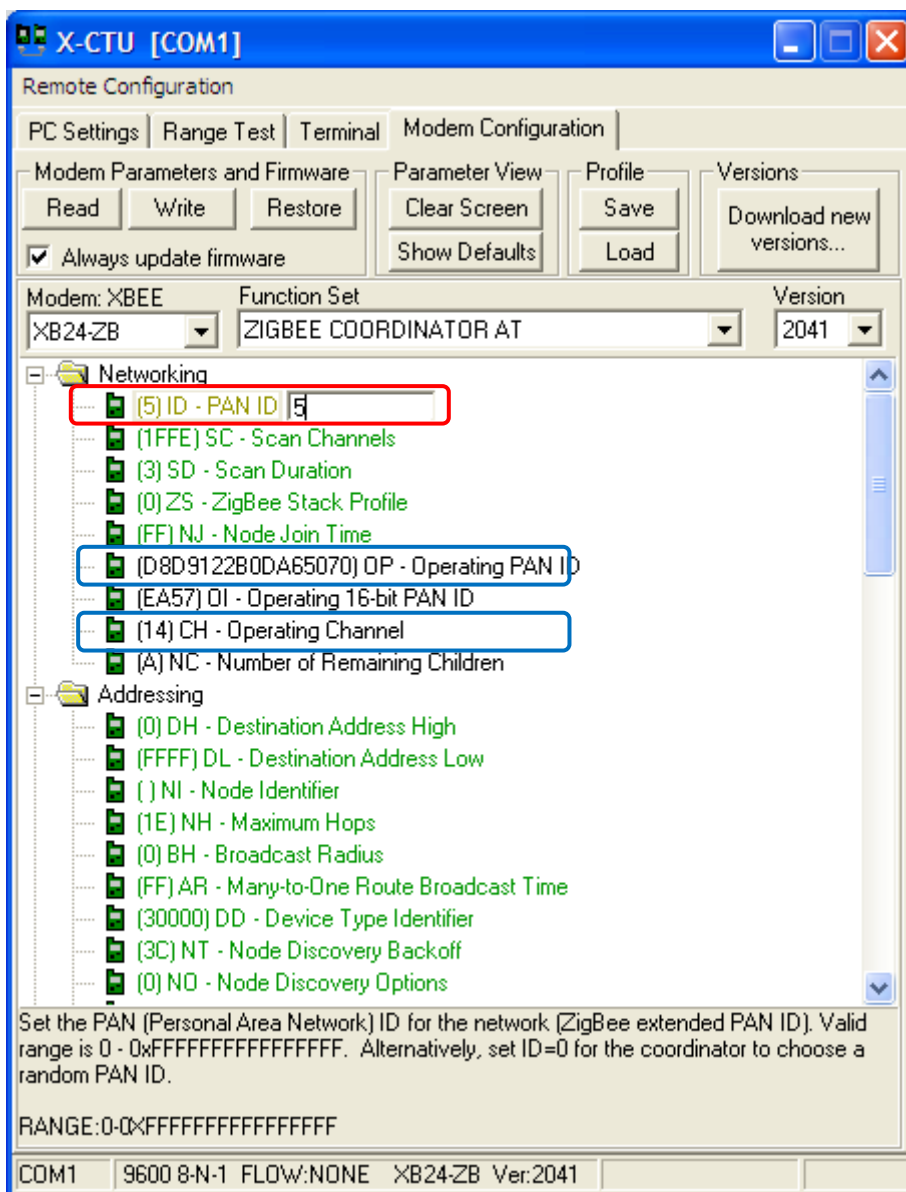


Figura. 4. 18. Configuración de parámetros en el coordinador XBee para la asociación manual

En el parámetro ID se establece el valor de 5 que será el ID de la PAN. Luego se graba la nueva configuración en el módulo coordinador (*WRITE*) y se lee (*READ*) verificando los nuevos valores de los parámetros necesarios para la asociación.

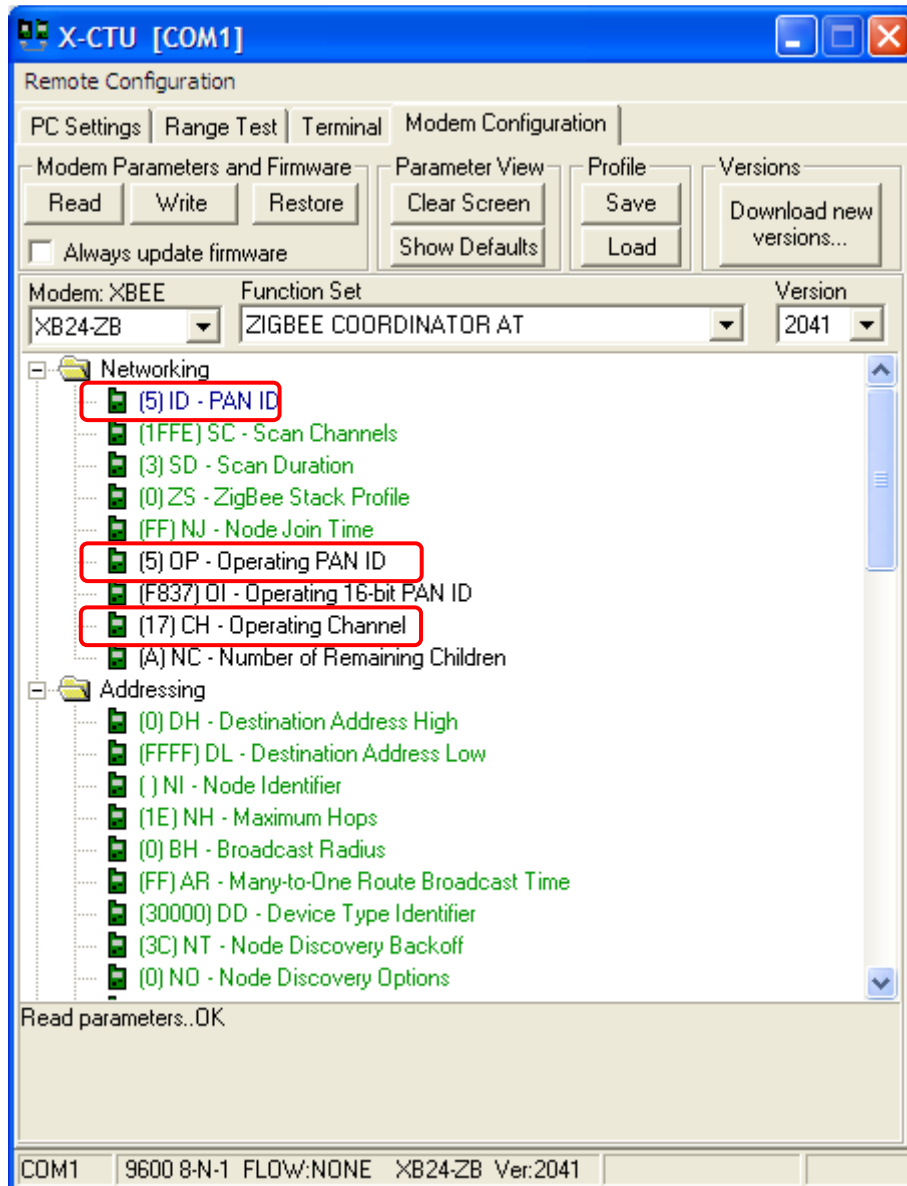


Figura. 4. 19. Nuevos valores de los parámetros en el coordinador para la asociación manual

Nodo, se configura el nodo de acuerdo al siguiente parámetro:

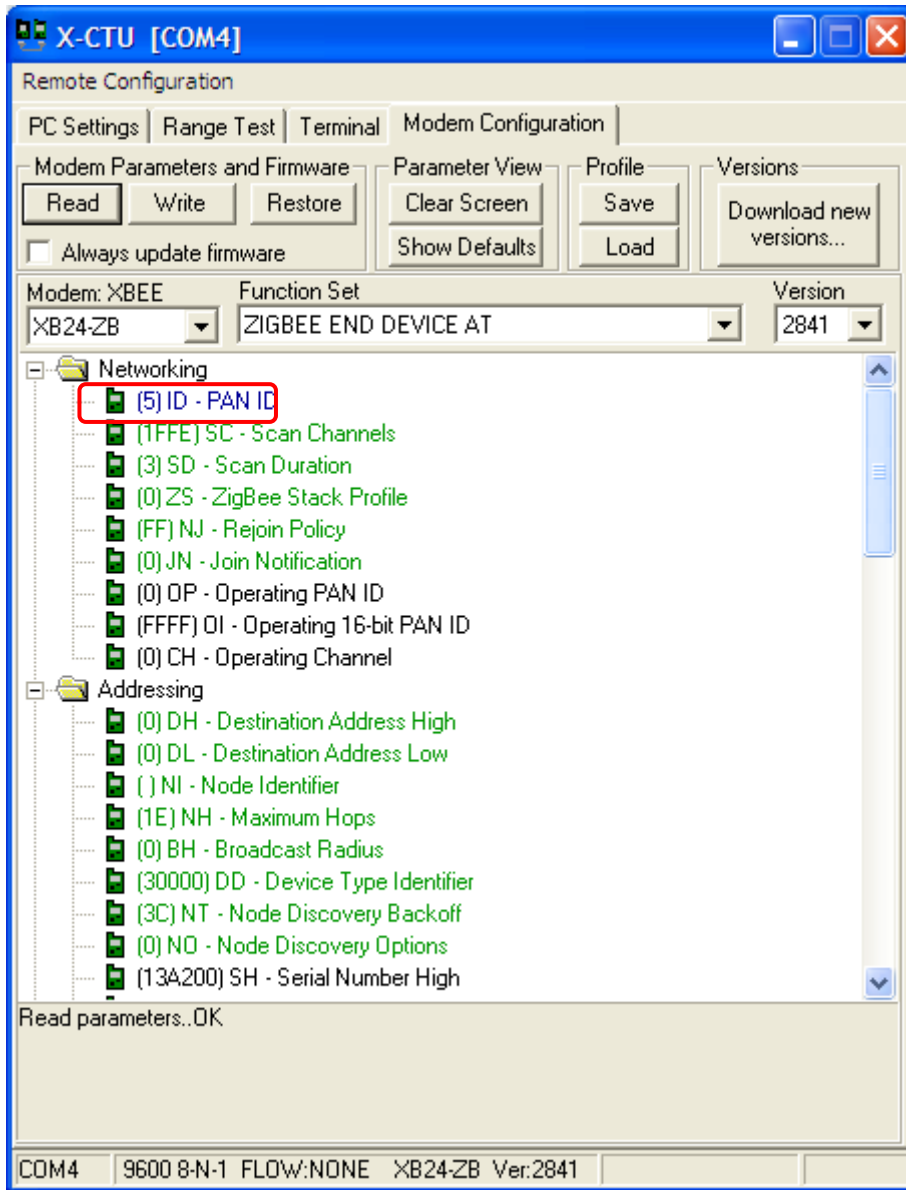


Figura. 4. 20. Configuración de parámetros en el nodo XBee para la asociación manual

Una vez realizado esta configuración inmediatamente se asocian los módulos, el coordinador le asigna al nodo (end device) la frecuencia y la dirección de red de 16 bits.

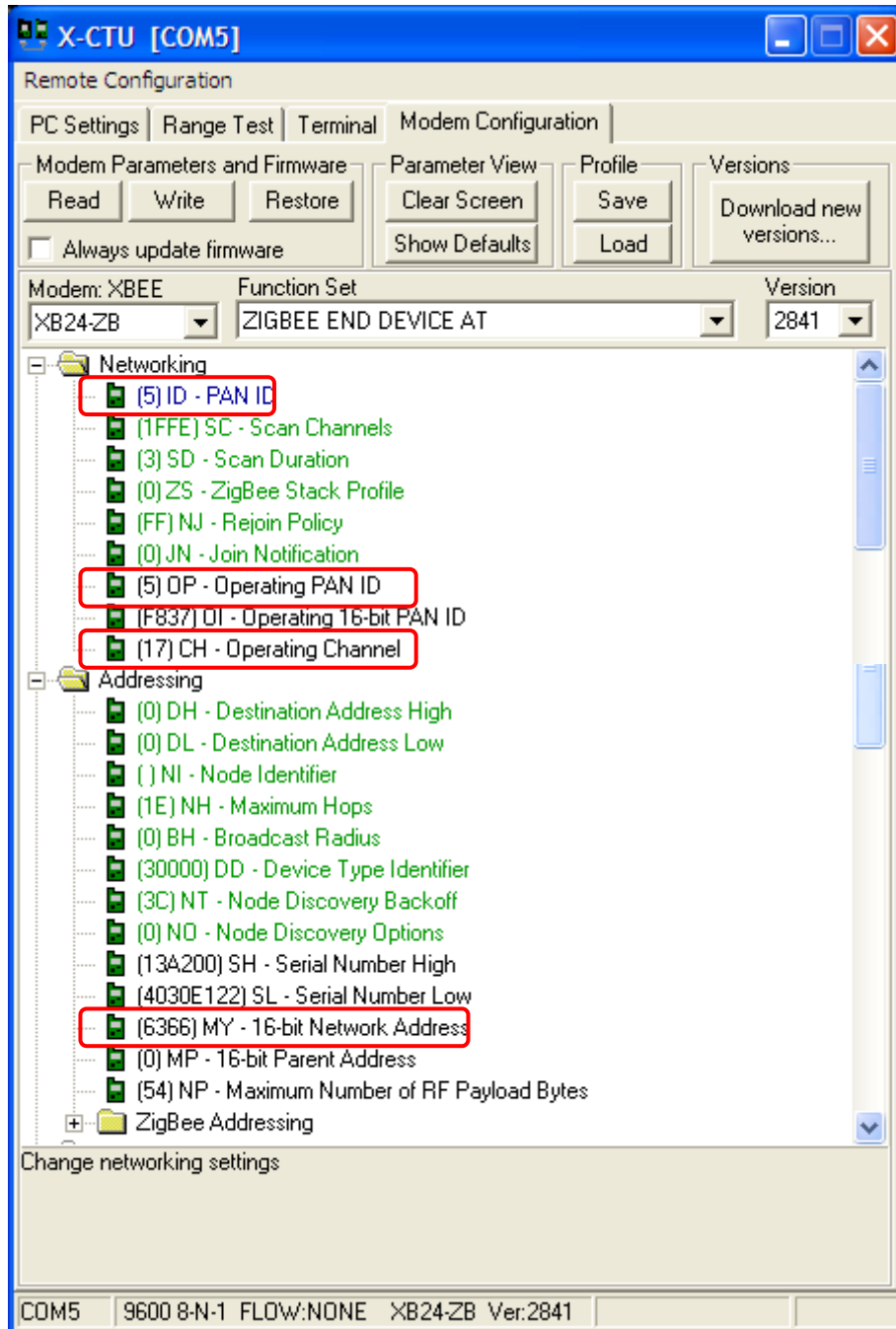


Figura. 4. 21. Valores de los parámetros en el nodo XBee asignados por el coordinador en la asociación manual

– **Asociación automática**

Para este modo de asociación se configura el PAN ID únicamente en el coordinador o se deja con el parámetro por default 0 para que aleatoriamente el coordinar elija una PAN ID. En el nodo el ID se configura en 0 para que se asocie a cualquier red.

Coordinador:

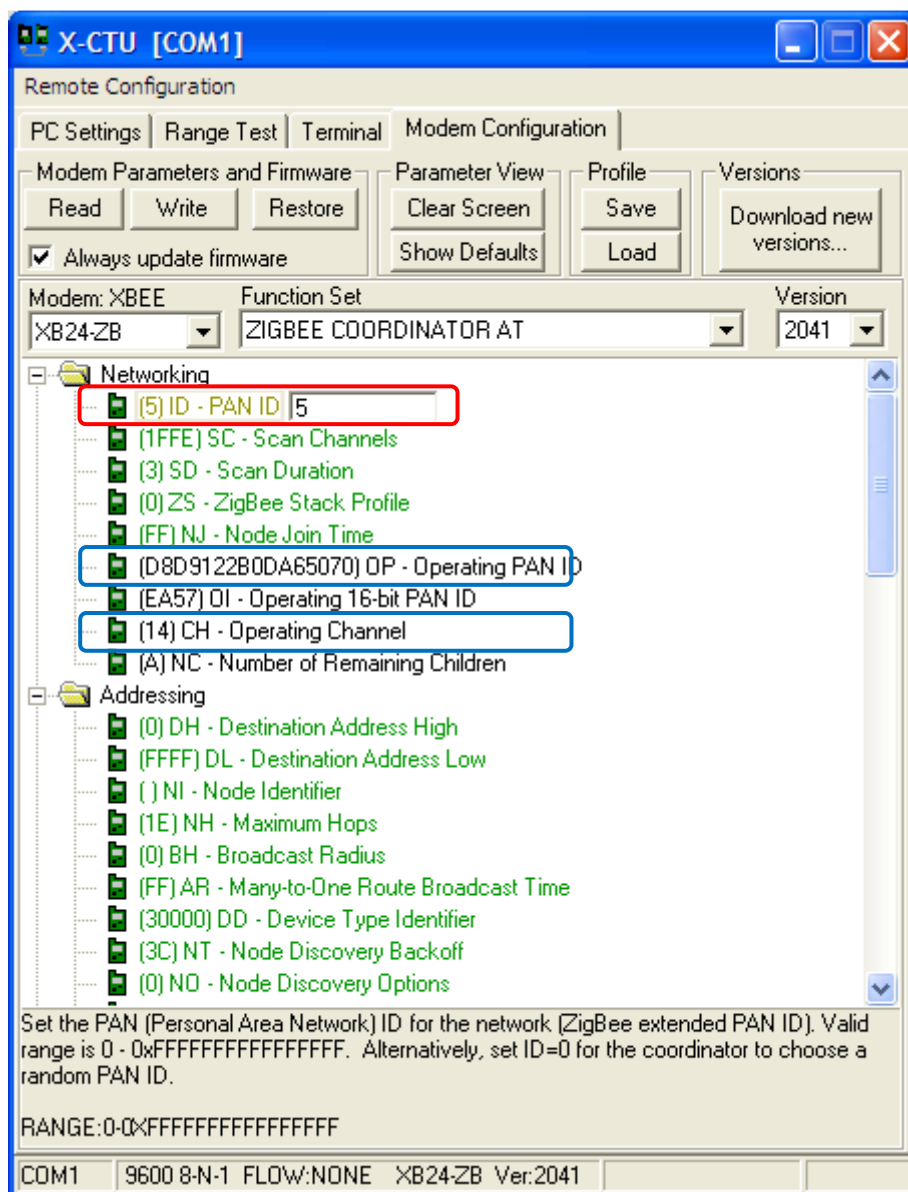


Figura. 4. 22. Configuración de parámetros en el coordinador XBee para la asociación automática

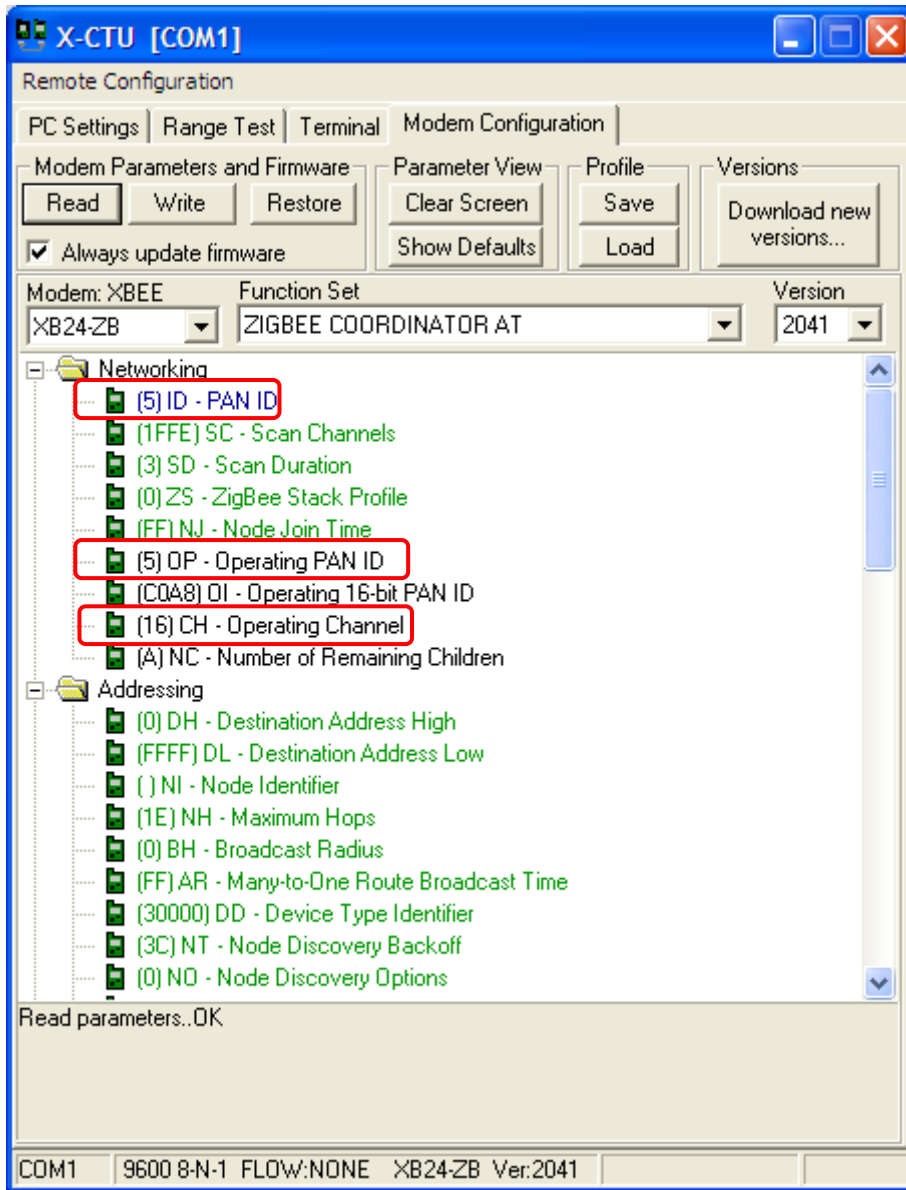


Figura. 4. 23. Nuevos valores de los parámetros en el coordinador para la asociación automática

Nodo, se encuentra configurado el valor de 0 en el ID para que se asocie a cualquier red que detecte. Los valores de OP y CH también se encuentran los datos de default.

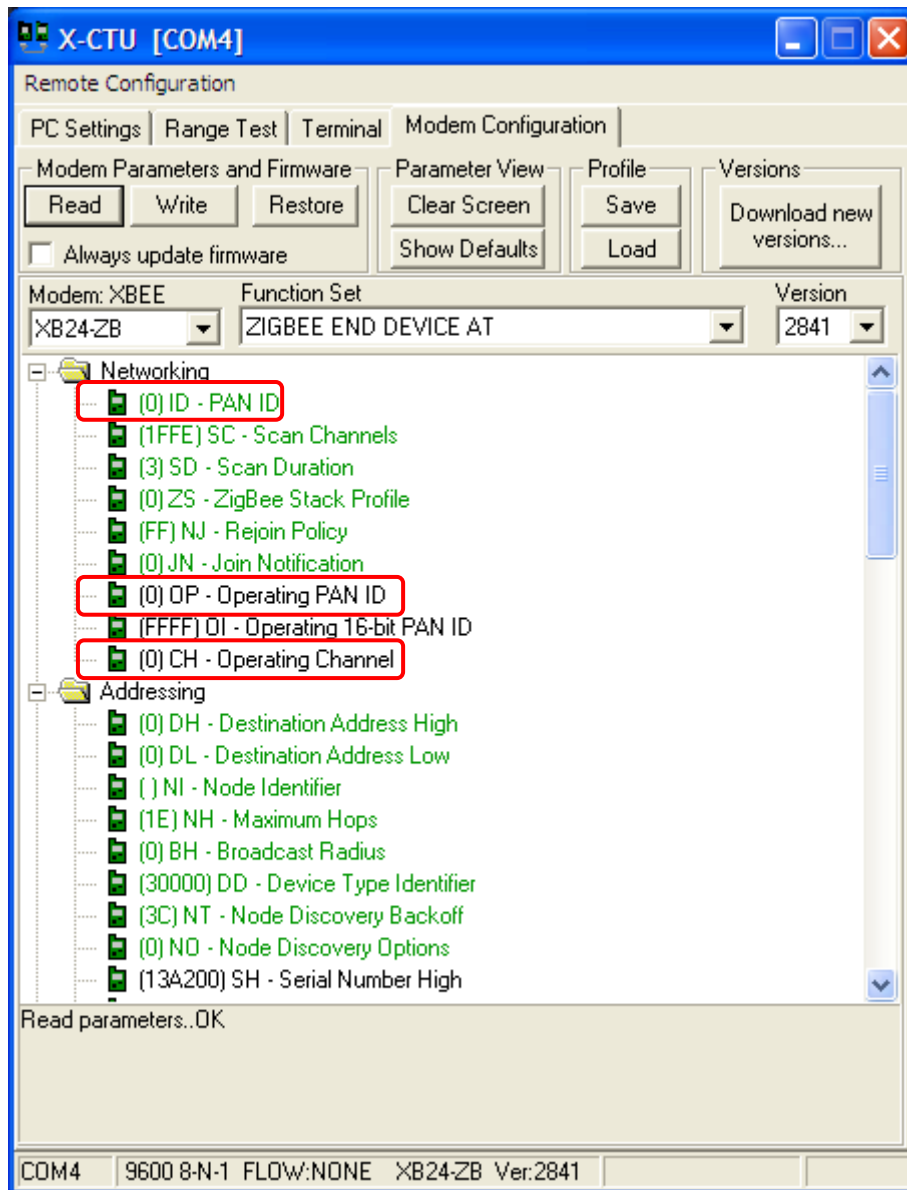


Figura. 4. 24. Configuración de parámetros en el nodo XBee para la asociación automática

Con estos valores el nodo escanea la PAN disponible y se asocia al coordinador, que le asigna los parámetros de OP (Identificación de la PAN operativa), CH (canal de frecuencia) y MY (la dirección de red).

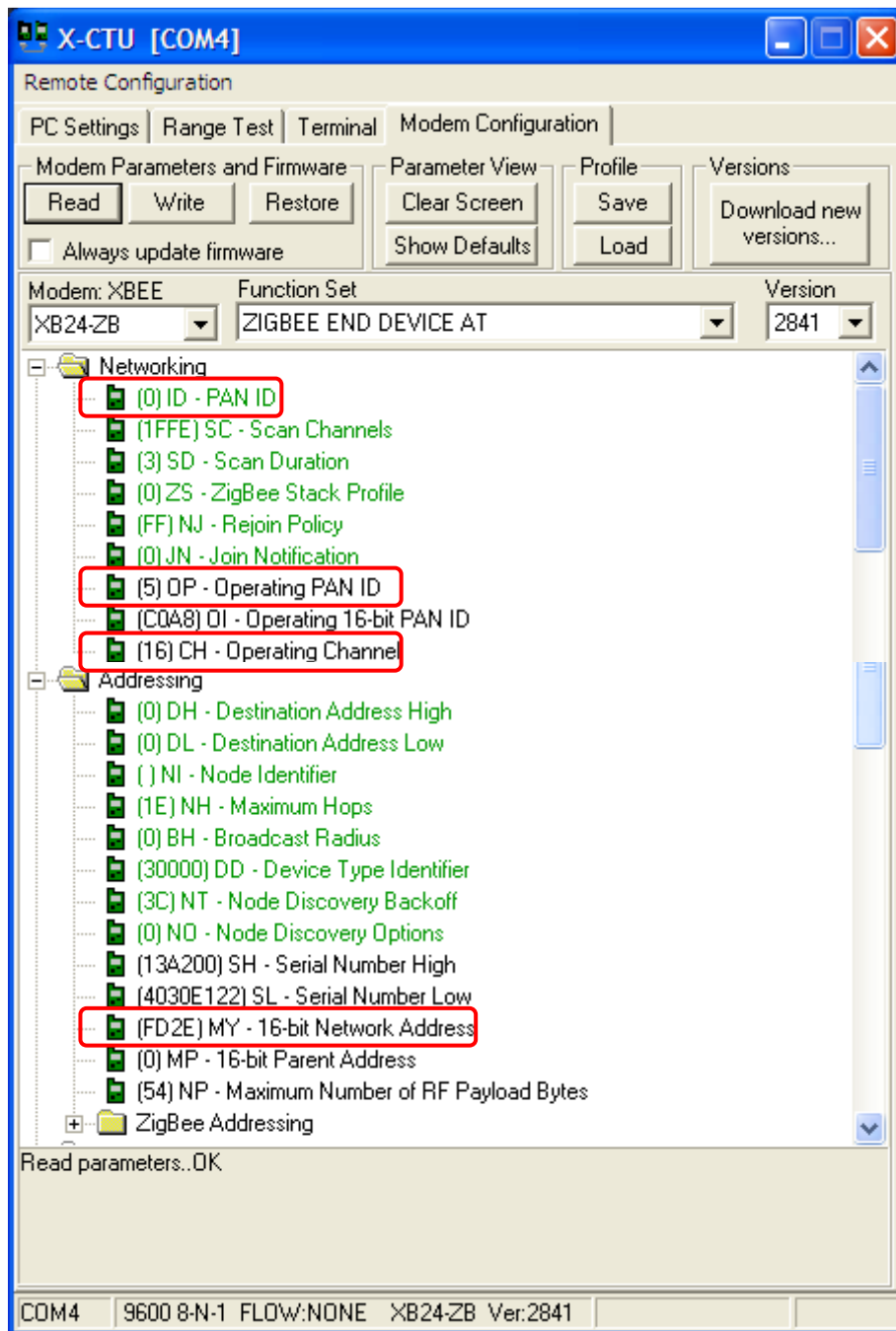


Figura. 4. 25. Valores de los parámetros en el nodo XBee asignados por el coordinador en la asociación automática

4.2.5 Comunicación de los módulos

Una vez que se configura los módulos XBee mediante el software X-CTU y se asocian se realiza la comunicación entre usuarios mediante el uso de Hyperterminal.



Figura. 4. 26. Prototipo de comunicación

Cada usuario debe abrir una sesión nueva de Hyperterminal. Para abrir el Hyperterminal ingresar en Windows a Inicio-Programas-Accesorios-Comunicaciones.

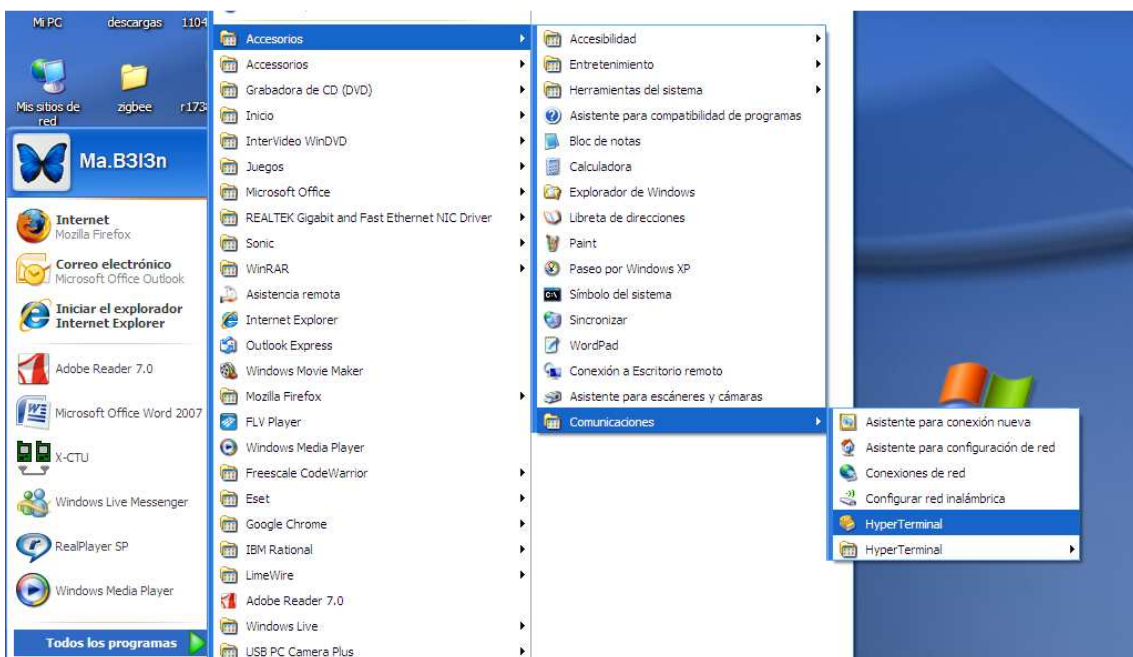


Figura. 4. 27. Acceso a HyperTerminal

- **Establecer la sesión coordinador**

La conexión para el coordinador la llamaremos COMUNICACIÓN COORDINADOR.



Figura. 4. 28. Creación de nueva conexión para el usuario coordinador

Se escoge el puerto al cual se encuentra conectado el módulo, en este caso el puerto COM3.



Figura. 4. 29. Selección del puerto para la conexión del usuario coordinador

Y enseguida se muestra la configuración del puerto.



Figura. 4. 30. Parámetros por default del puerto COM en la conexión del usuario Coordinador

Para que la comunicación se pueda realizar es necesario que la configuración del puerto sea idéntica a la del módulo XBee, para esto restauramos los valores por default.



Figura. 4. 31. Configuración del puerto COM de la conexión del usuario coordinador para establecer la comunicación

Con esto se finaliza la configuración del Hyperterminal y esta listo para la comunicación con el nodo.

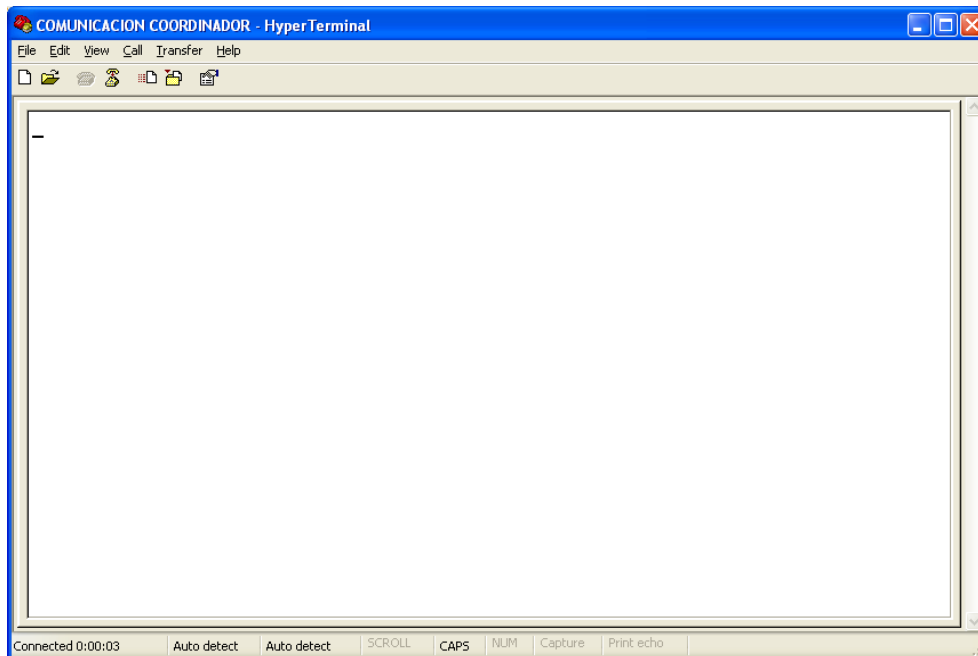


Figura. 4. 32. Interfaz de usuario coordinador

- **Establecer la sesión nodo,**

La conexión para el nodo la llamaremos COMUNICACIÓN NODO.



Figura. 4. 33. Creación de nueva conexión para el usuario nodo

Se escoge el puerto al cual se encuentra el módulo, en este caso el puerto COM1.

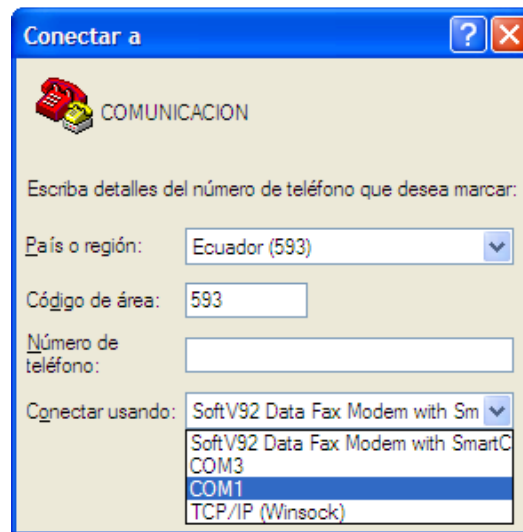


Figura. 4. 34. Selección del puerto para la conexión del usuario nodo

Y enseguida se muestra la configuración del puerto.

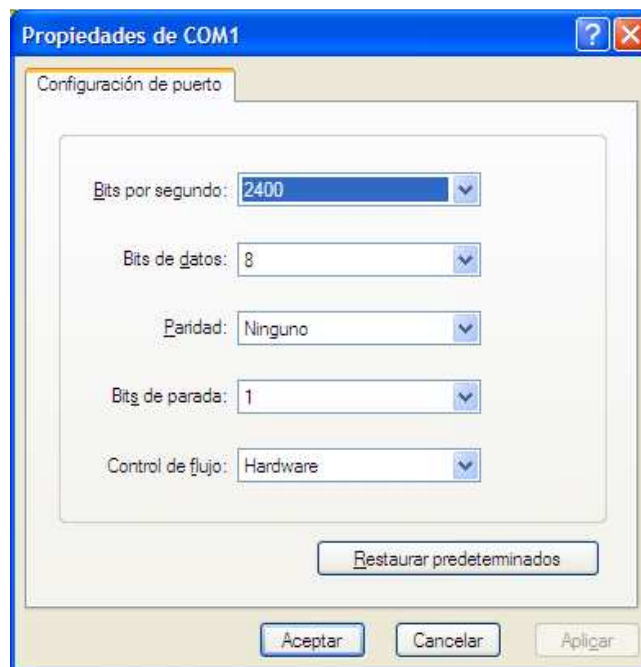


Figura. 4. 35. Parámetros por default del puerto COM en la conexión del usuario nodo

Para que la comunicación se pueda realizar es necesario que la configuración del puerto sea idéntica a la del módulo XBee, para esto restauramos los valores por default.

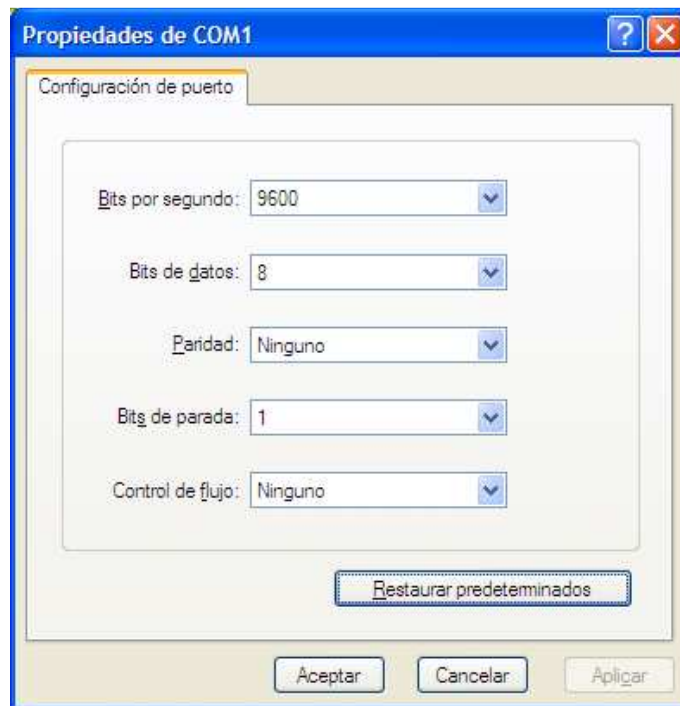


Figura. 4. 36. Configuración del puerto COM de la conexión del usuario nodo para establecer la comunicación

Con esto se finaliza la configuración del Hyperterminal y esta listo para la comunicación con el coordinador.

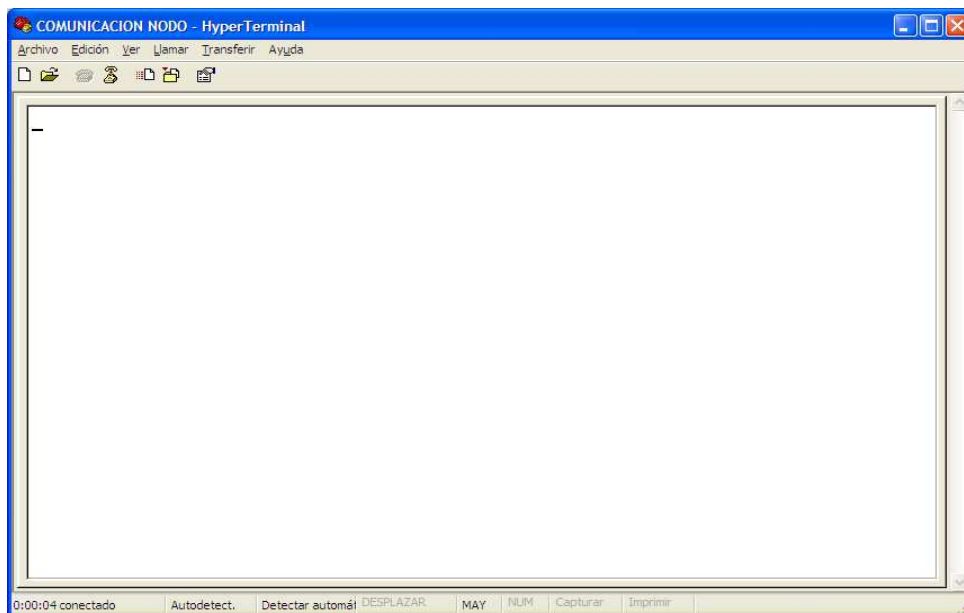


Figura. 4. 37. Interfaz de usuario nodo

Antes de iniciar la conexión se recomienda ingresar a Archivo-Propiedades. En la ventana emergente elegir Configuración y presionar el botón Configuración ASCII. Activar las casillas “Eco de los caracteres escritos localmente” (permite ver lo que se envía por el puerto) y “Agregar avance de línea al final de cada línea recibida” (agrega fin de línea a los mensajes entrantes). Lo anterior evita que se sobrescriban los mensajes que se envían con las respuestas del módem.

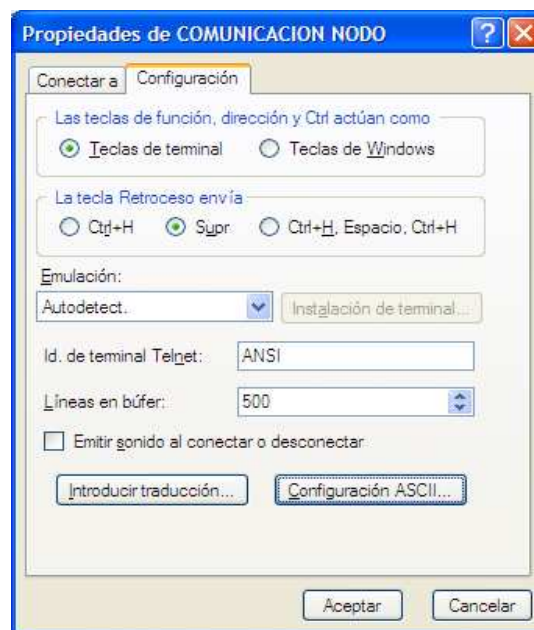


Figura. 4. 38. Configuraciones adicionales del HyperTerminal

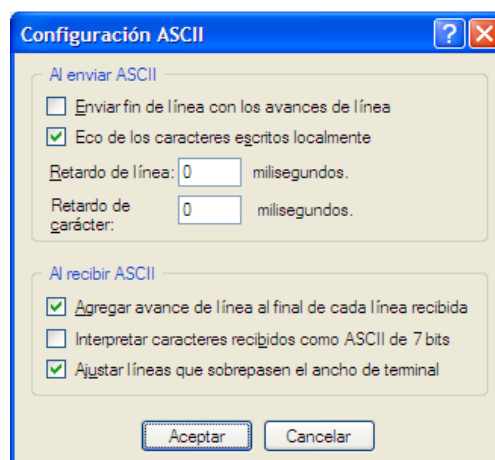


Figura. 4. 39. Activación del Eco de los caracteres escritos en las conexiones de HyperTerminal para los dos usuarios (coordinador y nodo)

Una vez configurado la conexión de Hyperterminal en Coordinador y Nodo se puede iniciar la comunicación entre los módulos.

- **Inicio de la comunicación**

Desde el coordinador se escribe un mensaje. Y este es recibido por el nodo y mostrado en la pantalla de comunicación.

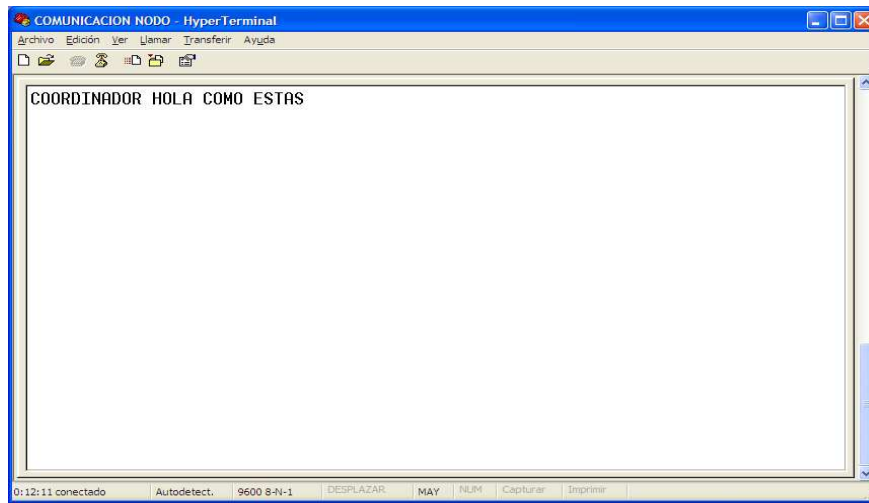


Figura. 4. 40. Comunicación desde la PC del usuario coordinador

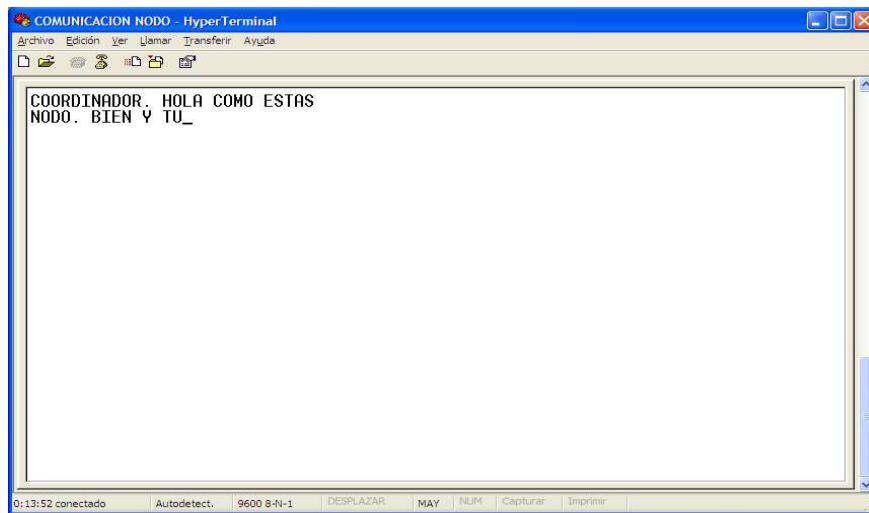


Figura. 4. 41. Comunicación desde la PC del usuario nodo

De esta forma se desarrolla el prototipo de comunicaciones mediante el estándar IEEE 802.15.4.

4.3 ESCENARIOS Y PRUEBAS

4.3.1 Suministro de Voltaje

Se mide los valores de voltaje y corriente entregados por las fuentes de alimentación del coordinador y del nodo, así como los valores en las entradas de alimentación de los módulos XBee, el objetivo de esta prueba es descartar problemas con la alimentación de los componentes electrónicos y asegurar el correcto funcionamiento.

4.3.2 Consumo de Energía

El objetivo de esta prueba es determinar el periodo de duración de la batería en los nodos (terminales) para lo cual emplearemos la característica de modo de sleep que los módulos XBee presentan mediante la configuración de su parámetro SM (Sleep Mode). Para observar el estado en el que se encuentra el nodo (activo/dormido) se coloca un led entre el Pin 13 (ON/SLEEP-indicador del estado del módulo) y tierra. El led se enciende cuando el nodo este activo y apagado cuando se encuentre dormido.

Tabla. 4. 5. Descripción del parámetro SM (Sleep Mode)

COMANDO AT	DESCRIPCIÓN	RANGO DEL PARAMETRO
SM	<p>Se utiliza para establecer y leer los ajustes del modo del sueño.</p> <ul style="list-style-type: none"> • SM=1 Pin hibernar, es la opción de más bajo consumo de energía. Despierta cuando Sleep_Rq (pin 9 del módulo) tiene una transición de una señal en alto a una en bajo. • SM=4 Modo cíclico de sueño, se despierta del sueño por la expiración del temporizador. • SM=5 Modo cíclico de sueño con pin-despertador, se despierta por la expiración del temporizador o cuando Sleep_Rq (pin 9 del módulo) tiene una transición de una señal en alto a una en bajo. 	0 - 5

La batería usada para realizar la prueba tiene las siguientes características: es de nickel-metal-hydride, de 8,4 V, recargable, 170 mAh.

El nodo tiene la siguiente configuración por default:

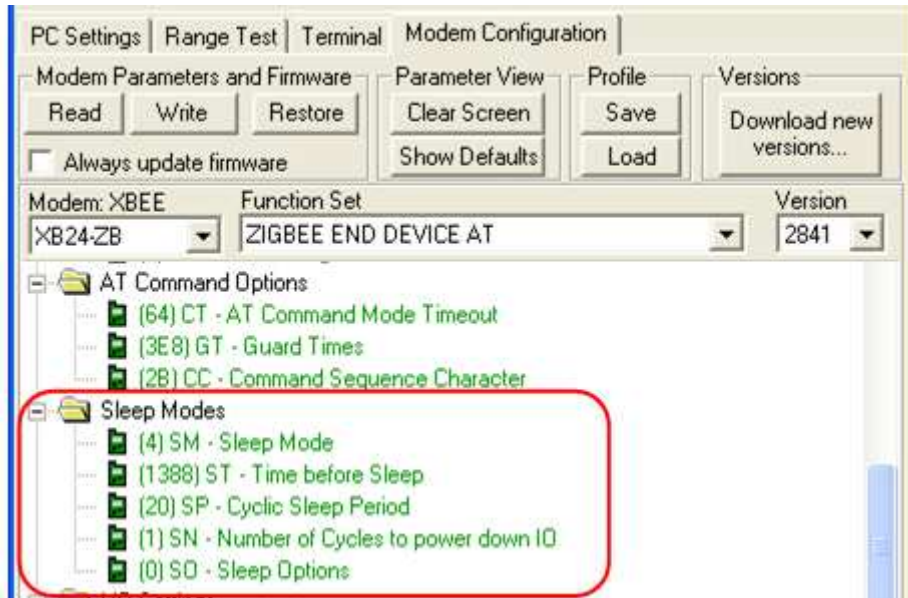


Figura. 4. 42. Configuración de los modos de sleep para bajo consumo de energía en el nodo XBee

- **Escenario 1: Consumo de energía en modo de hibernar**

La mayor parte del tiempo el nodo terminal se encuentra dormido, por lo que en la prueba inicial se midió la duración de la batería en modo de reposo. Para esta prueba es necesario configurar SM=1 en el nodo.

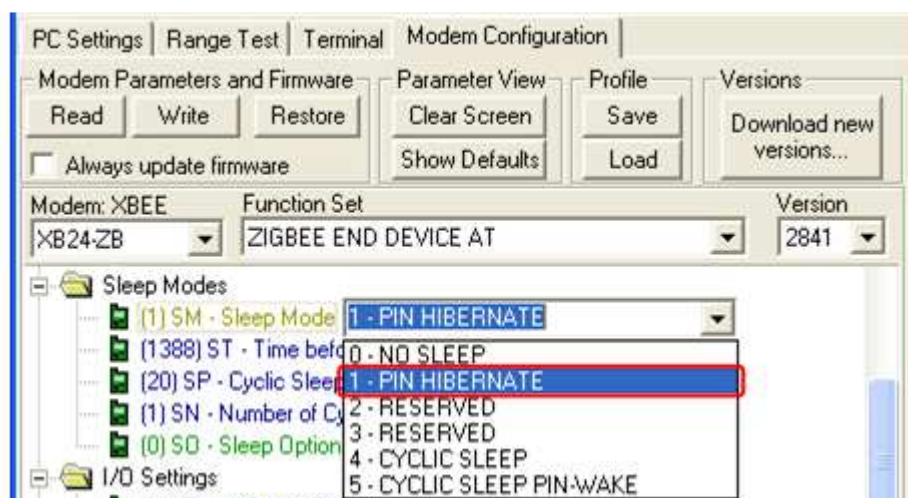


Figura. 4. 43. Configuración del modo de hibernar en el nodo XBee

Se guarda la nueva configuración y se comprueba el cambio del valor SM.

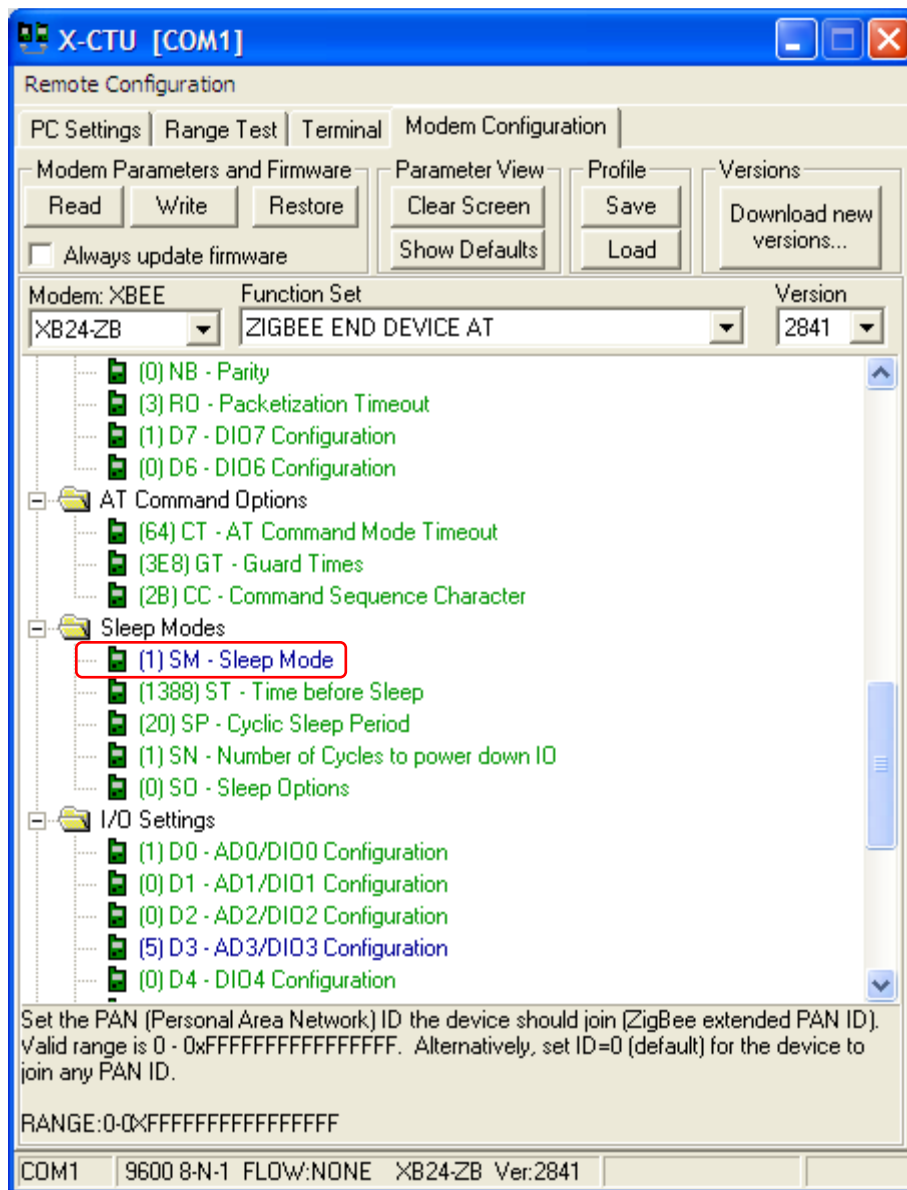


Figura. 4. 44. Modo de hibernar activo en el nodo XBee

El nodo se encuentra en modo de hibernar (dormido), se observa que el led indicador de estado del nodo se encuentra apagado.

Se conecta la batería en las borneras y se mide cada hora el valor de corriente que consume los módulos, el voltaje en borneras y el voltaje que alimenta al integrado.

En la hora 0 se tiene los siguientes valores:

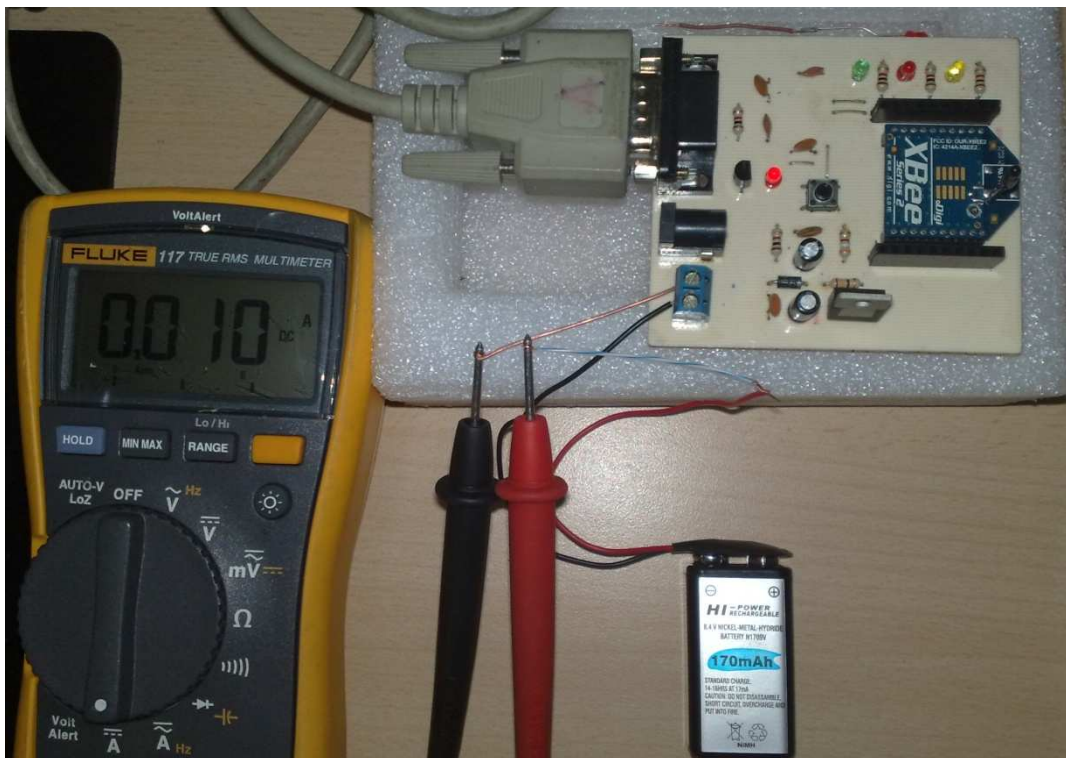


Figura. 4. 45. Consumo de corriente del nodo XBee en modo siempre dormido h=0

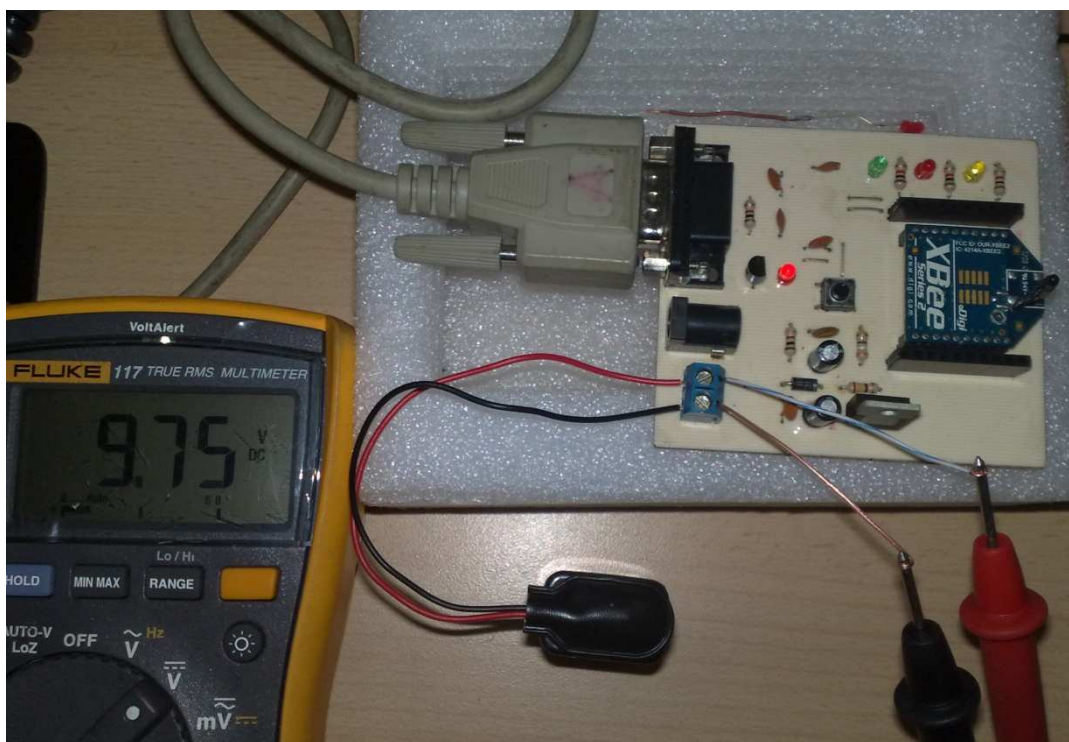


Figura. 4. 46. Voltaje en las borneras del nodo en modo siempre dormido h=0

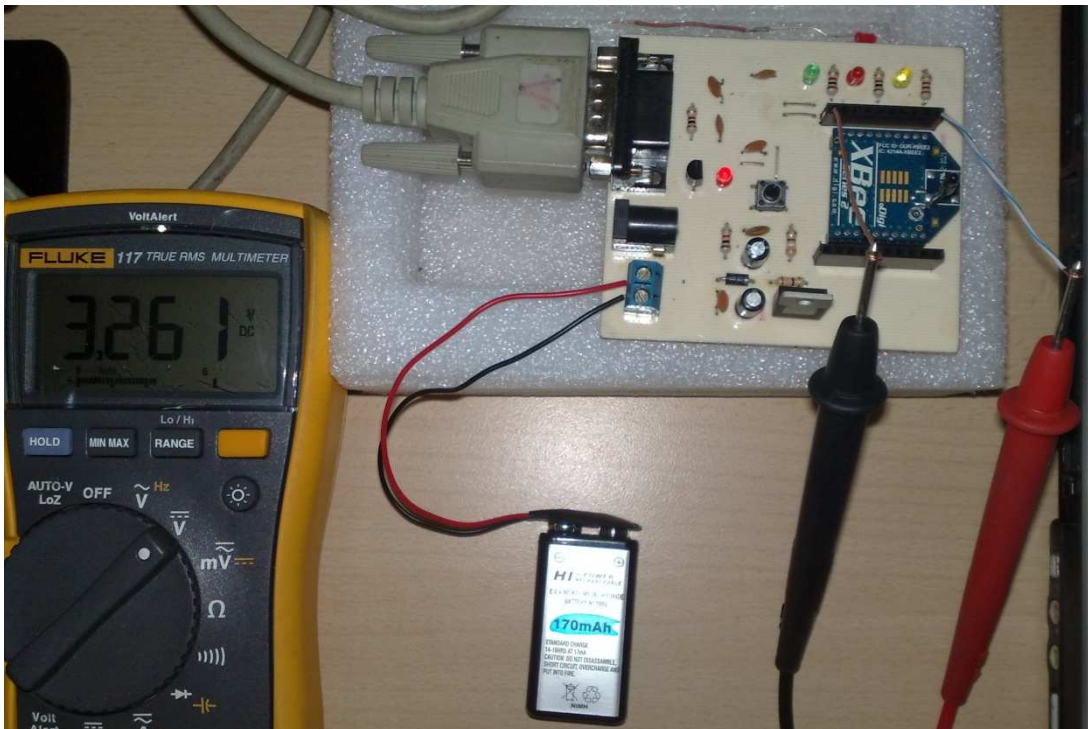


Figura. 4. 47. Voltaje en el integrado (pines de VCC y GND) del nodo XBee en modo siempre dormido h=0

A continuación se observa los valores medidos en la hora 19:

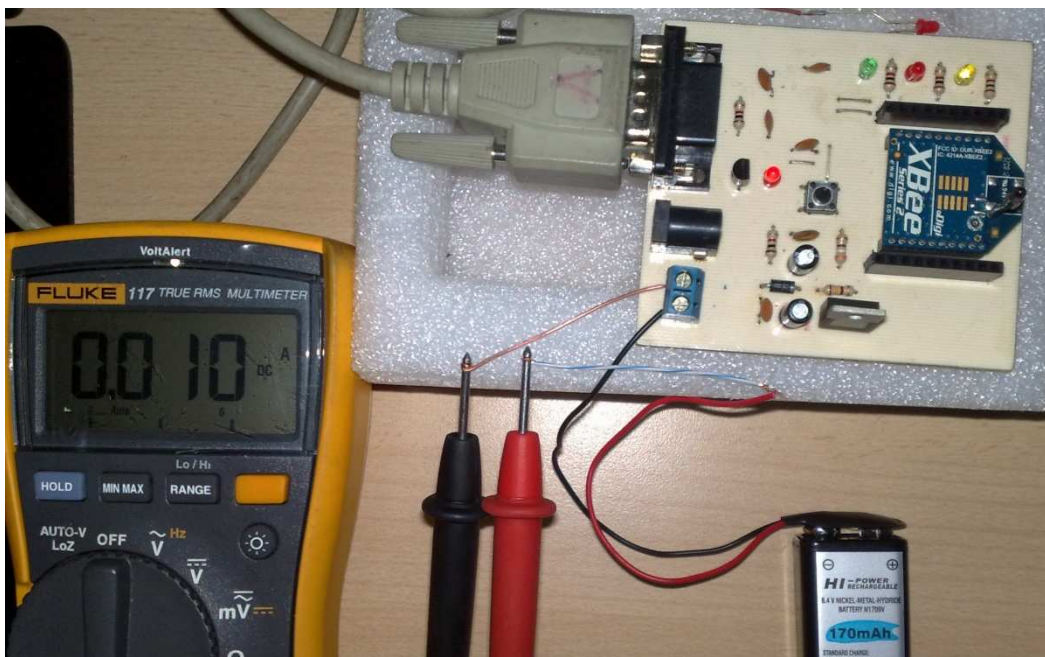


Figura. 4. 48. Consumo de corriente del nodo XBee en modo siempre dormido h=19

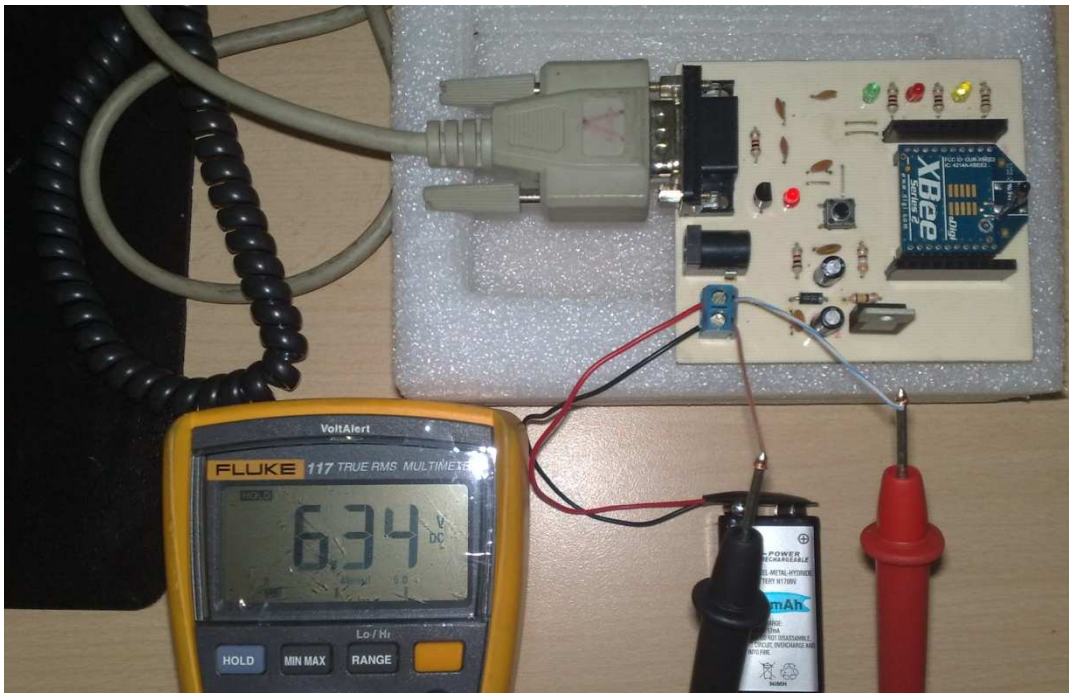


Figura. 4. 49. Voltaje en las borneras del nodo XBee en modo siempre dormido h=19

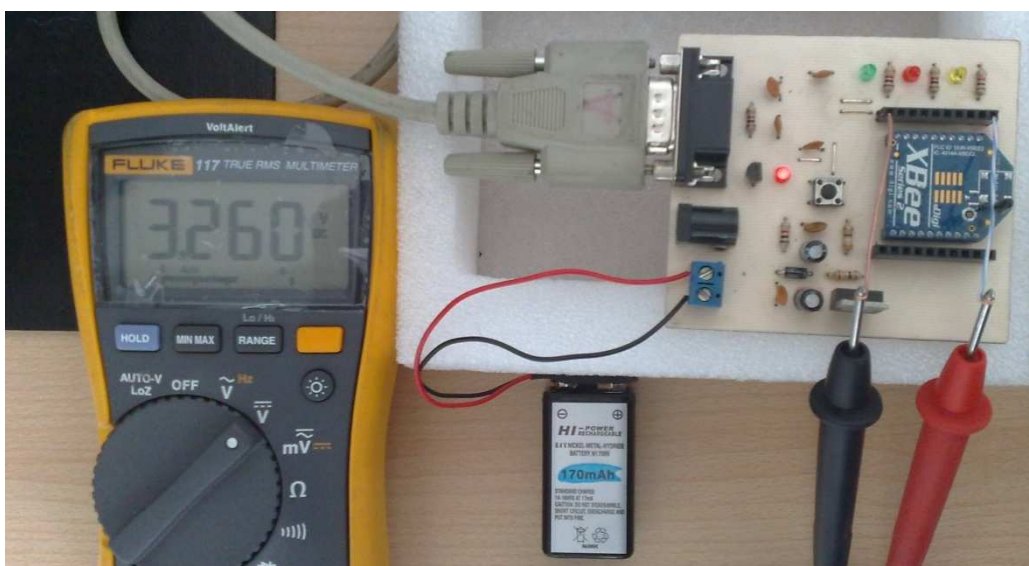


Figura. 4. 50. Voltaje en el integrado (pines de VCC y GND) del nodo XBee en modo siempre dormido h=19

- **Escenario 2: Consumo de energía en modo activo y transmitiendo datos**

Para determinar el consumo de energía del nodo en estado activo y transmitiendo. Se restaura los valores iniciales de los módulos y se los asocia. Se coloca un loop físico en el nodo.

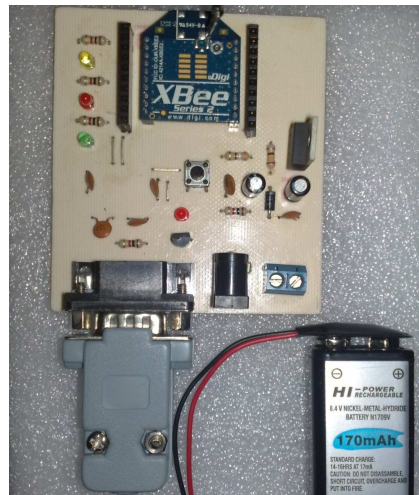


Figura. 4. 51. Loop físico colocado en el nodo para ejecutar pruebas

En el coordinador mediante el software X-CTU en la pestaña *range test* se activa la opción de Loop Back para que se transmitan datos de forma permanente. Además se activa el RSSI para observar la calidad de la señal.

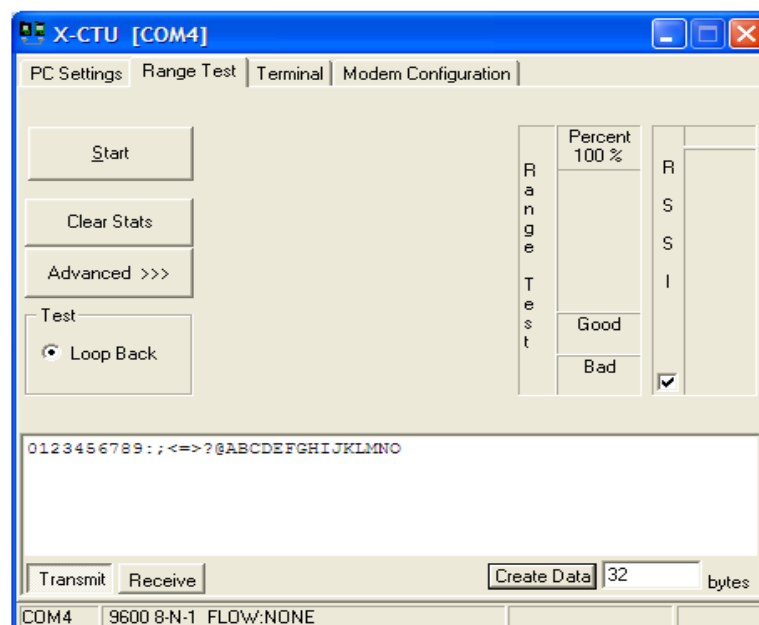


Figura. 4. 52. Activación de la opción de Loop Back en el coordinado para que se transmitan datos de forma permanente

De esta forma el nodo permanecerá siempre despierto y su led indicador encendido.

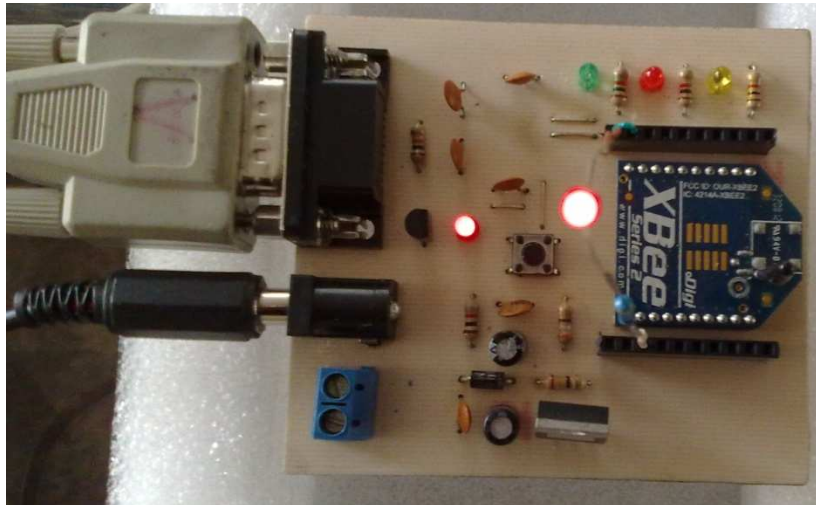


Figura. 4. 53. Nodo XBee despierto

Se mide cada hora el valor de corriente que consume los módulos, el voltaje en borneras, el voltaje que alimenta al integrado y se verifica la cantidad de paquetes enviados.

En la hora 0 se tiene los siguientes valores:

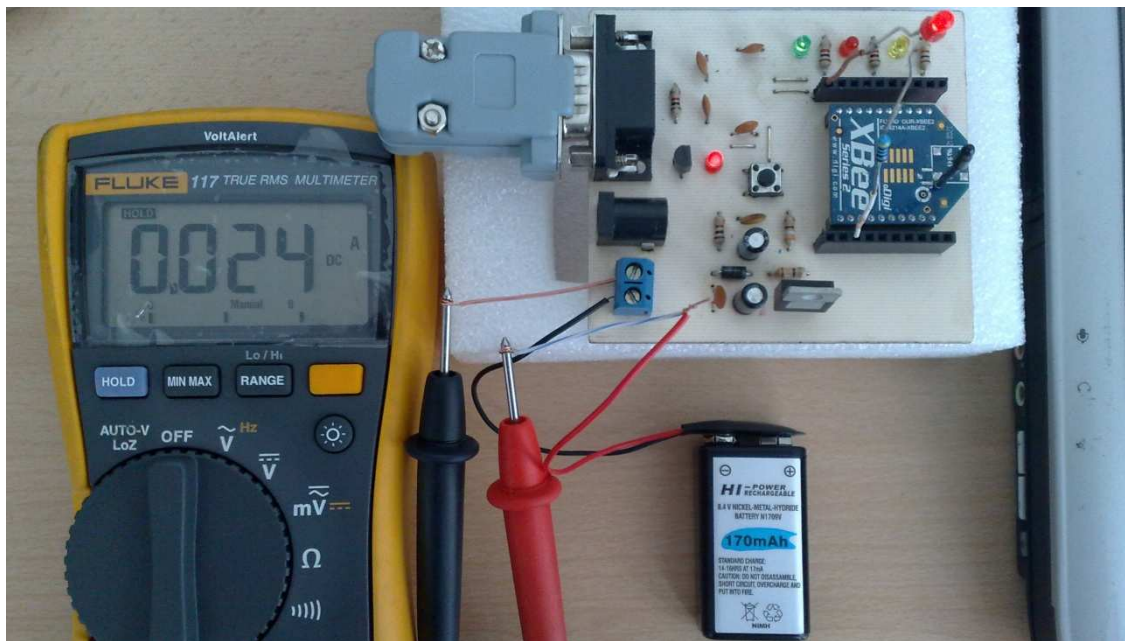


Figura. 4. 54. Consumo de corriente del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=0

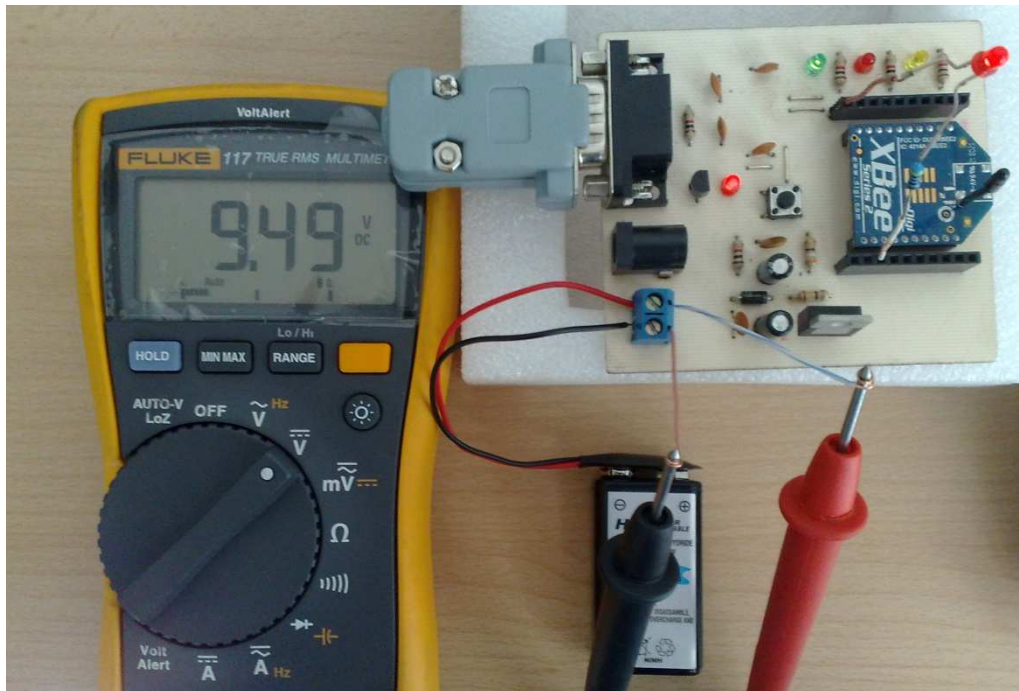


Figura. 4. 55. Voltaje en las borneras del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=0

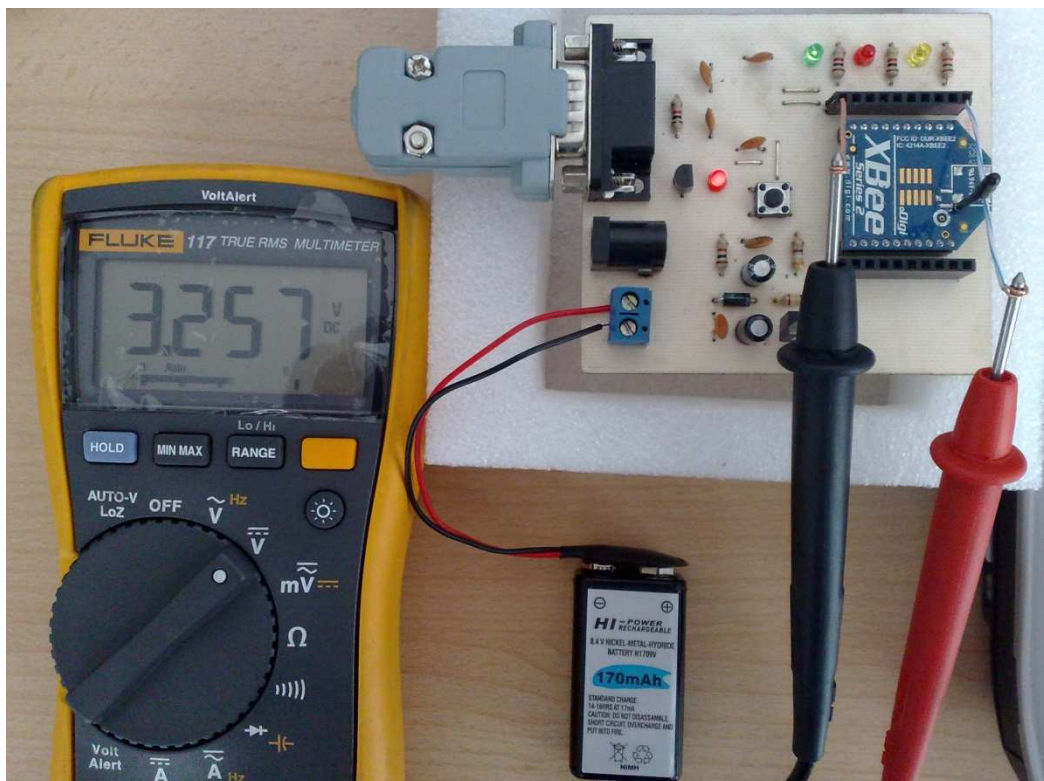


Figura. 4. 56. Voltaje en el integrado (pines de VCC y GND) del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=0

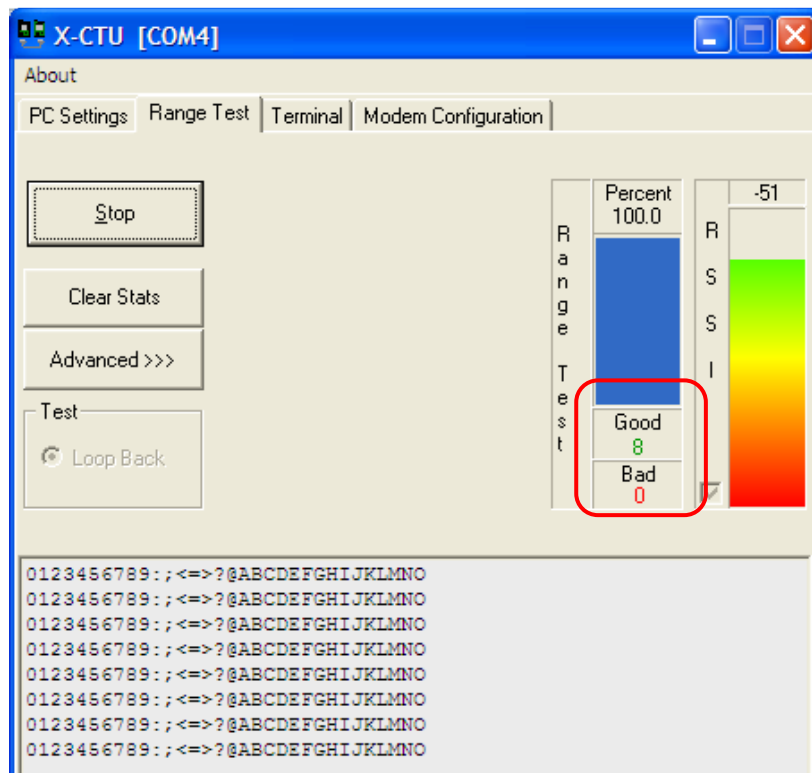


Figura. 4. 57. Cantidad de paquetes enviados por el coordinador h=0

A continuación se observa los valores medidos en la hora 7:



Figura. 4. 58. Consumo de corriente del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=7

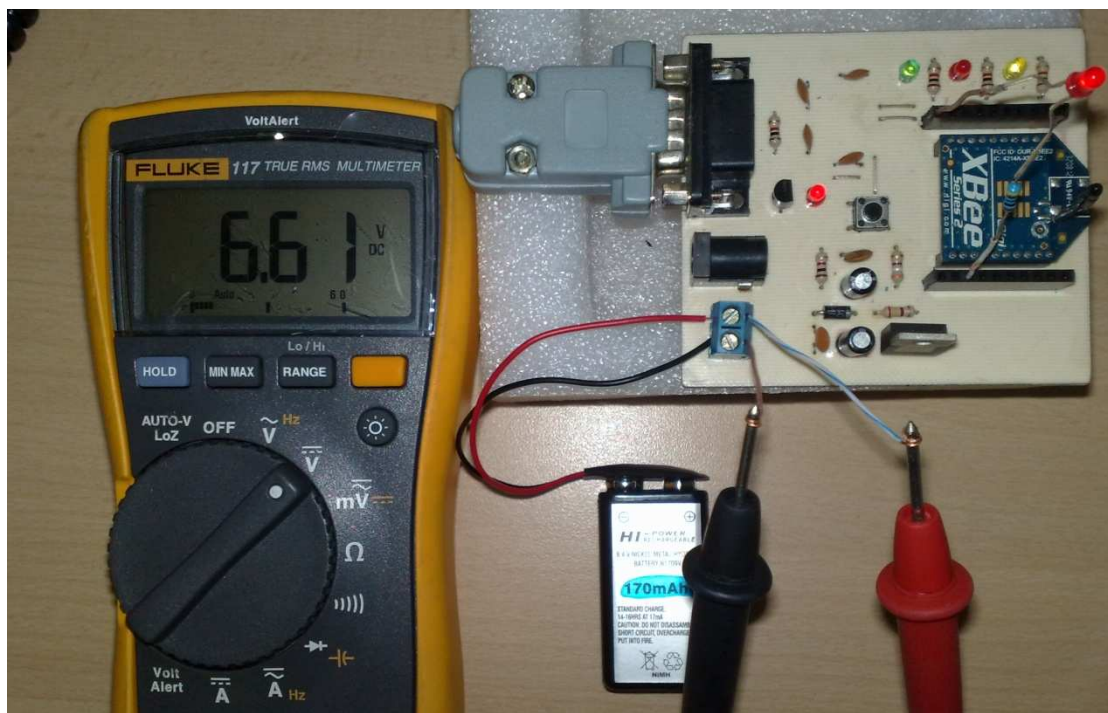


Figura. 4. 59. Voltaje en las borneras del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=7

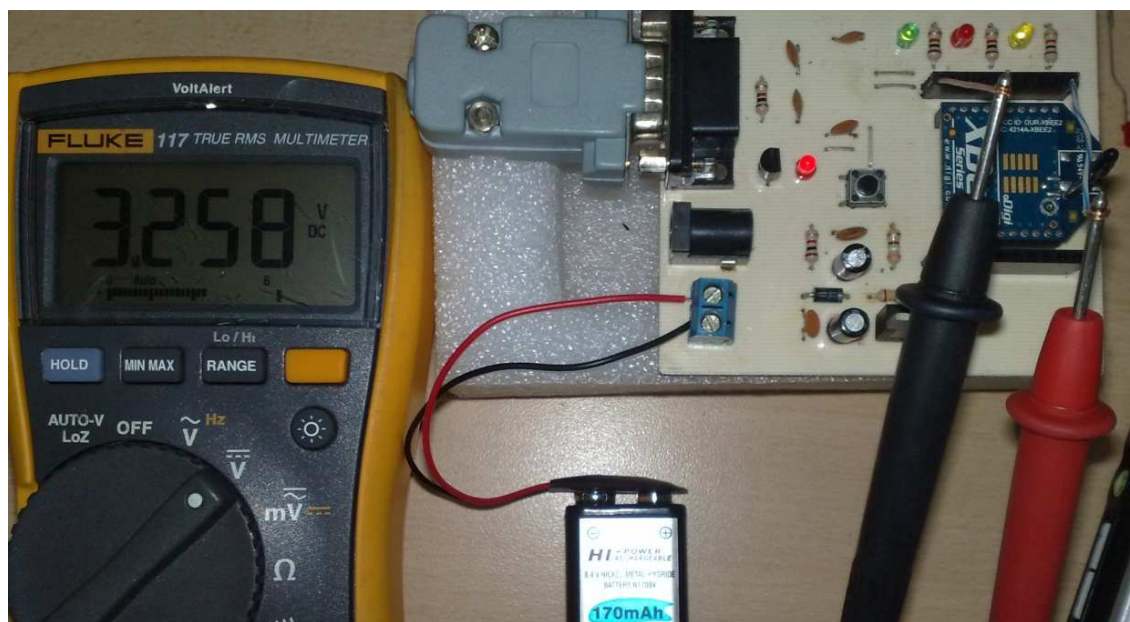


Figura. 4. 60. Voltaje en el integrado (pines de VCC y GND) del nodo XBee en modo siempre despierto y transmitiendo h=7

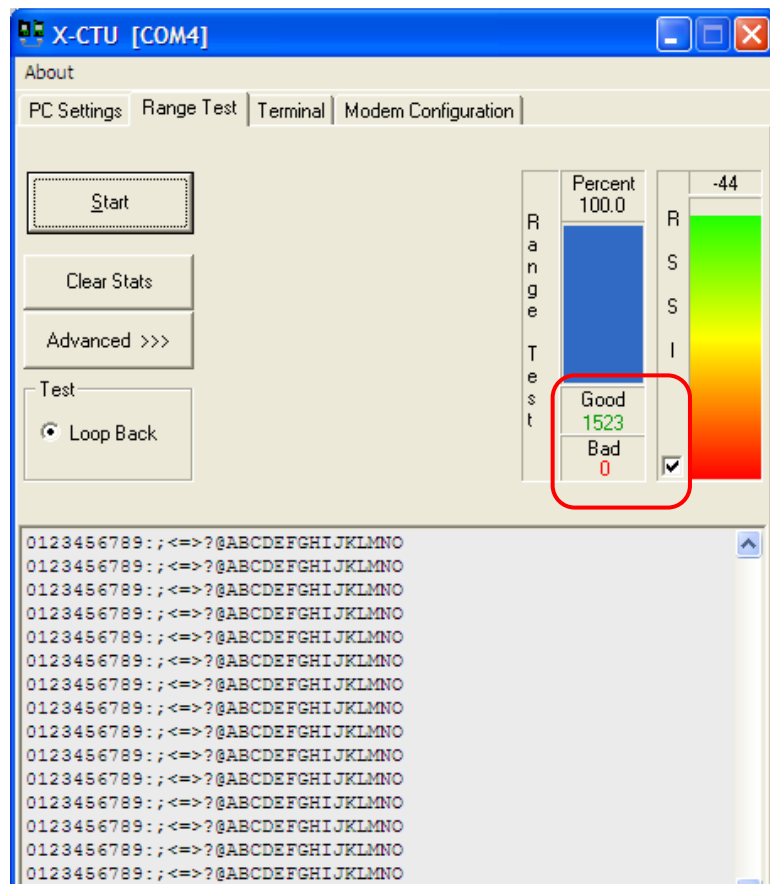


Figura. 4. 61. Cantidad de paquetes enviados por el coordinador h=7

4.3.3 Radiofrecuencia

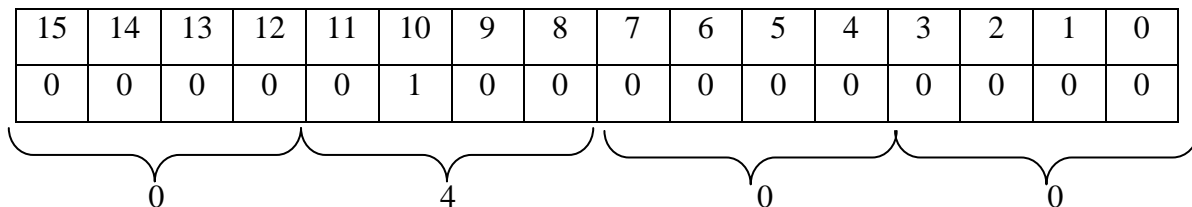
Para la formación de la red y asociación del nodo a un coordinador es necesario el ID y la frecuencia. El coordinador es el encargado de asignar estos parámetros al nodo.

El coordinador analiza el medio y elige el canal más adecuado en el que trabajará la red PAN. Para comprobar esta teoría se maneja el parámetro SC (Scan Channels).

Tabla. 4. 6. Descripción del parámetro SC (Scan Channel) en los módulos XBee

COMANDO AT	DESCRIPCIÓN	RANGO DEL PARAMETRO																
SC	<p>Buscar canales. Establecer/Leer la lista de canales para escanear. Coordinador: lista de canales para elegir antes de iniciar la red. Router/dispositivo final: lista de canales que serán escaneados para encontrar un Coordinador/Router para unirse.</p> <p>Bit (Channel)</p> <table border="0"> <tr> <td>0(0x0B)</td> <td>4(0x0F)</td> <td>8(0x13)</td> <td>12(0x17)</td> </tr> <tr> <td>1(0x0C)</td> <td>5(0x10)</td> <td>9(0x14)</td> <td>13(0x18)</td> </tr> <tr> <td>2(0x0D)</td> <td>6(0x11)</td> <td>10(0x15)</td> <td>14(0x19)</td> </tr> <tr> <td>3(0x0E)</td> <td>7(0x12)</td> <td>11(0x16)</td> <td>15(0x1A)</td> </tr> </table>	0(0x0B)	4(0x0F)	8(0x13)	12(0x17)	1(0x0C)	5(0x10)	9(0x14)	13(0x18)	2(0x0D)	6(0x11)	10(0x15)	14(0x19)	3(0x0E)	7(0x12)	11(0x16)	15(0x1A)	<p>1 - 0xFFFF [campo de bits] (bits 0, 13, 14, 15 no son permitidos para XBee-PRO)</p>
0(0x0B)	4(0x0F)	8(0x13)	12(0x17)															
1(0x0C)	5(0x10)	9(0x14)	13(0x18)															
2(0x0D)	6(0x11)	10(0x15)	14(0x19)															
3(0x0E)	7(0x12)	11(0x16)	15(0x1A)															

Se definirá los canales que se va a escanear en un campo de bits de la siguiente manera:



Si se desea configurar en los módulos que se escanee únicamente el canal 15 se debe asignar al bit 10 el valor de 1. De tal forma que el valor a configurar sería ATSC400 (hexadecimal).

Para la prueba de radio frecuencia se usa dos módulos ZIGBEE XBEE PRO como se muestra en la figura 4.62, cuyo modo de configuración y funcionamiento es similar a los módulos ZIGBEE XBEE que se usan en el presente proyecto.

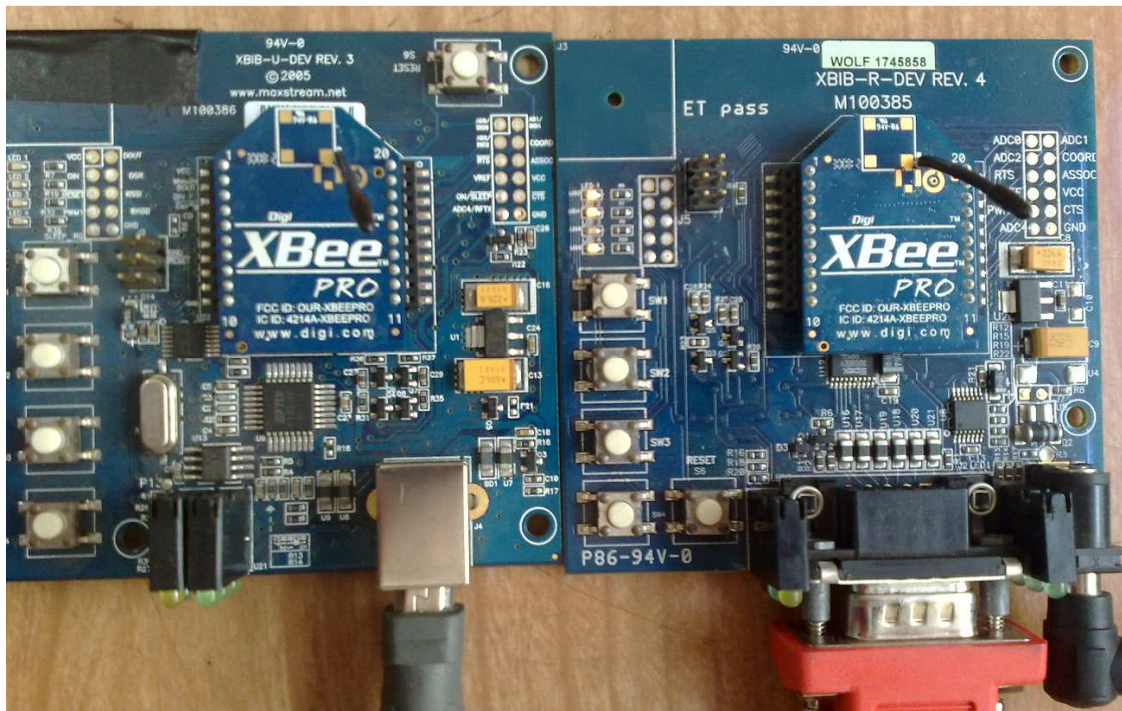


Figura. 4. 62. Módulos ZigBee PRO: Coordinador y Dispositivo final

Las pruebas consisten en asignar un canal de frecuencia a los módulos ZigBee PRO para su funcionamiento y comprobar que los módulos ZigBee escogen el canal más adecuado para transmitir.

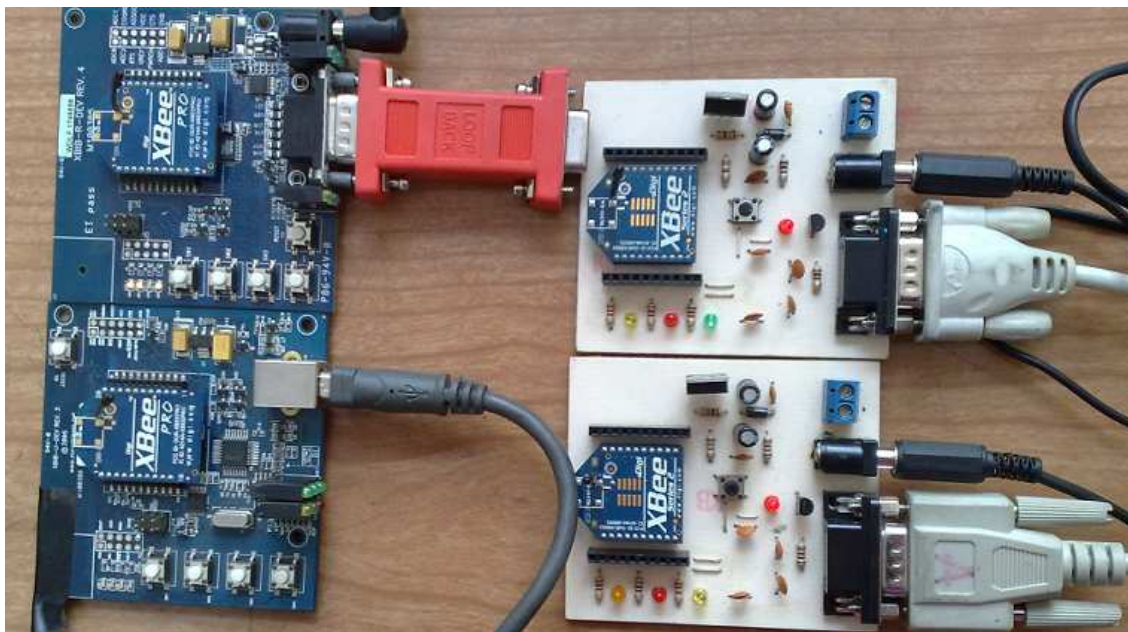


Figura. 4. 63. Módulos ZigBee PRO y Módulos ZigBee

• **Configuración Módulos ZigBee PRO**

Se configura el coordinador con un ID y con el CH en el canal 0x0D, el nodo se asigna valor de 0 al PANID para que escanee las Redes existentes. De esta forma se realiza la asociación automática del nodo (end device).

• **Configuración Módulos ZigBee**

Se configura el coordinador con un ID y el SC (Scan Channels) para que escanee los siguientes canales:

- 2(0x0D)
- 5(0x10)
- 10(0x15)
- 12(0x17)

Es decir en hexadecimal:

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0

1
4
2
4

Al coordinador se configura el SC con un valor de ATSC1424. El nodo tendrá el ID en 0 para que se asocie a la red existente.

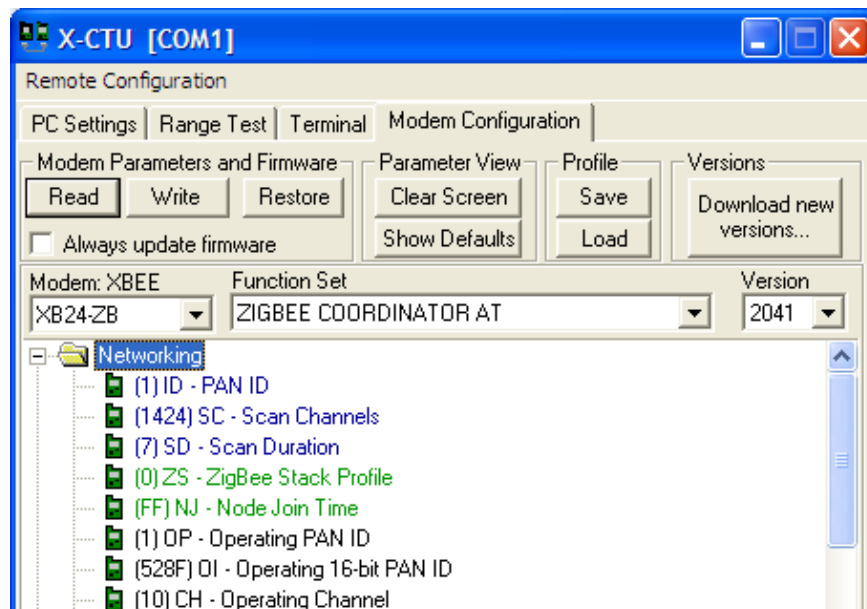


Figura. 4. 64. Configuración del SC (Scan Channels) en el coordinador para que escanee únicamente 4 canales.

Se observa en la figura 4.64. que el coordinador luego de escanear los canales toma como canal de operación el CH 10. Ahora se si se puede asociar el nodo (automático).

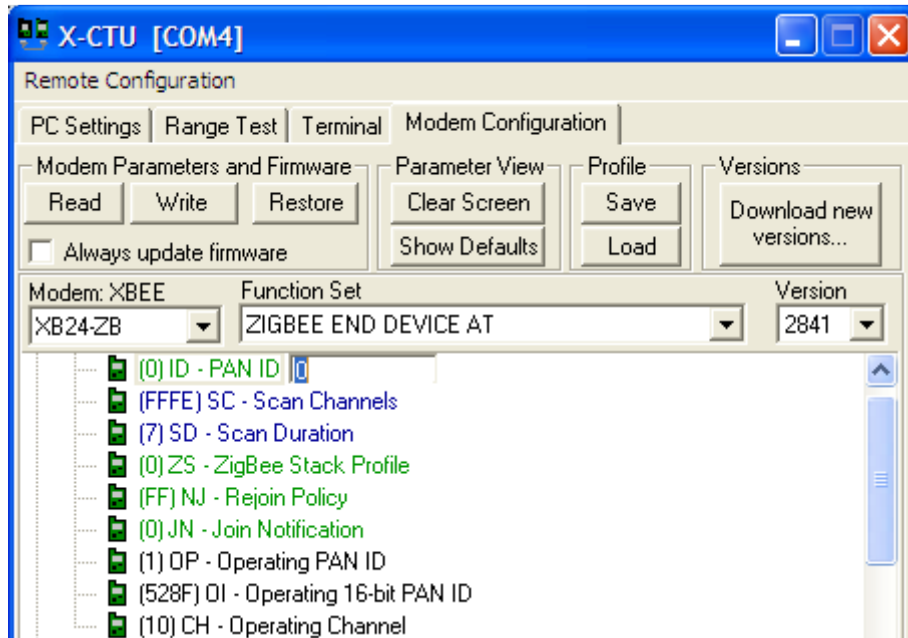


Figura. 4. 65. El nodo se asocia luego de que el coordinado ha elegido el canal de operación CH=10

Para continuar con la prueba y determinar que el coordinador busca el canal más adecuado, se elimina el CH 10 de la configuración de escaneo y se configura el SC de la siguiente manera:

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

}
}
}
}

1
4
0
4

Para que escanee los siguientes canales:

- 2(0x0D)
- 5(0x15)
- 12(0x17)

En el coordinador se configura ATSC1404.

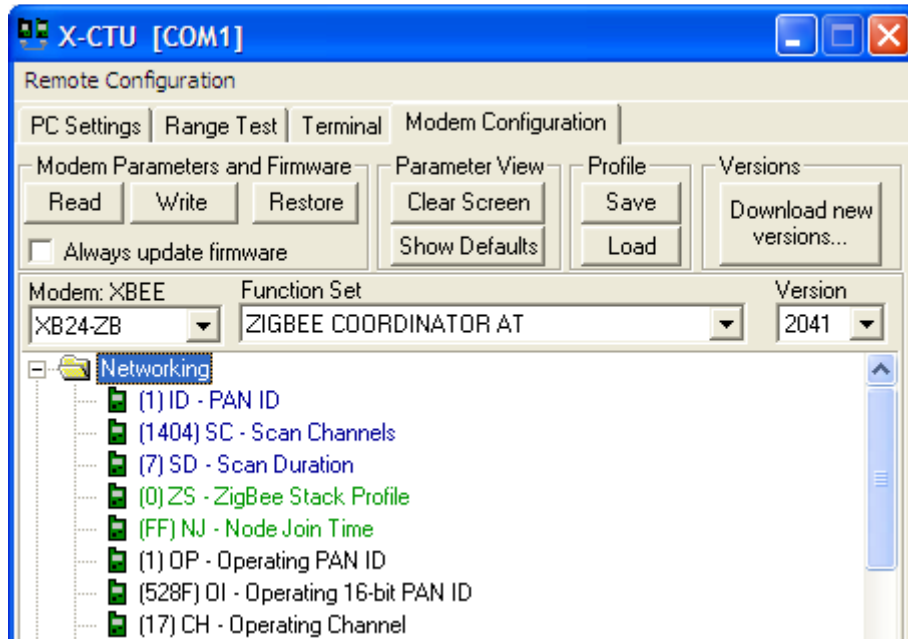


Figura. 4. 66. Configuración del SC (Scan Channels) en el coordinador para que escanee únicamente 3 canales

El coordinador toma como canal de operación el CH 17. Ahora se realiza la asociación del nodo.

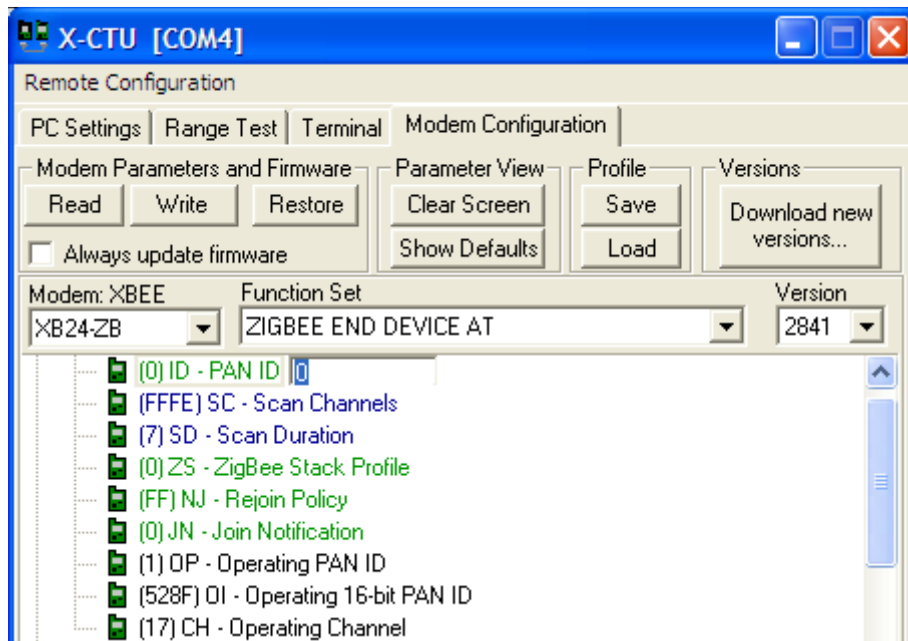


Figura. 4. 67. El nodo se asocia luego de que el coordinado ha elegido el canal de operación CH=17

Ahora se configura al coordinador para que únicamente escanee los siguientes canales:

- 2(0x0D)
- 5(0x15)

En hexadecimal:

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Diagram illustrating the bit configuration for scanning channels. The bits are grouped into four sets of 4 bits each, with the first and third groups having a '0' below them, and the second and fourth groups having a '4' below them.

Se configura en el coordinador ATSC0404.

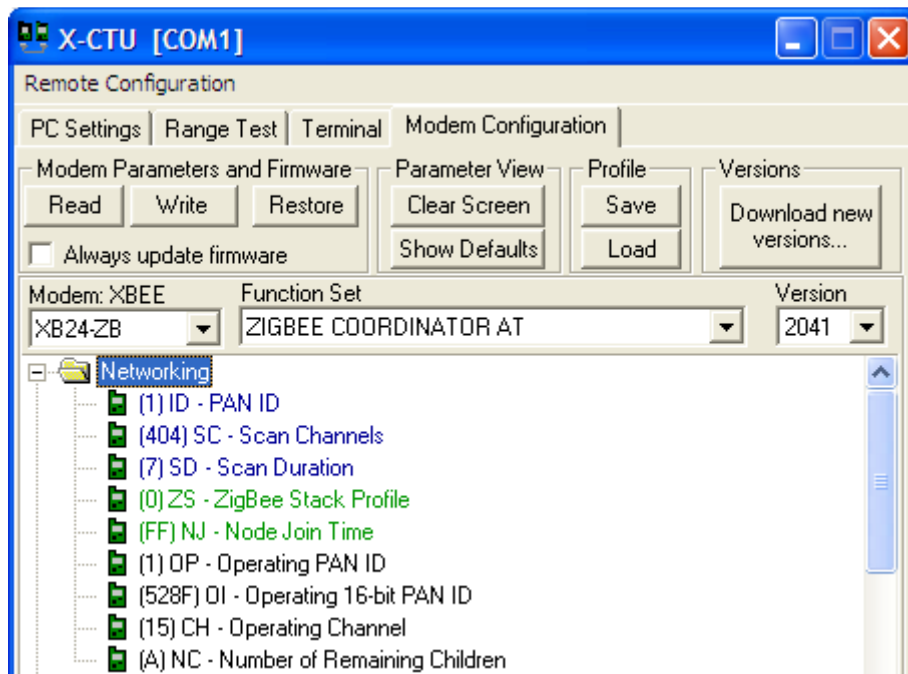


Figura. 4. 68. Configuración del SC (Scan Channels) en el coordinador para que escanee únicamente 2 canales

4.3.4 Propagación

La siguiente prueba se mide la potencia de señal recibida del nodo a diferentes distancias en espacio libre e interiores, y se establece la máxima distancia de trabajo a la que puede funcionar el sistema.

Para la realización de las mediciones de potencia de la señal se coloca un loop físico en el nodo Zigbee y en el coordinador se activa la opción de loop back en la pestaña de Range Test.

- **Escenario 1: Interiores**

Esta prueba consiste en colocar el módulo coordinador en una habitación y con el módulo nodo desplazarse en la casa. Cada cierta distancia observar los valores de RSSI y paquetes buenos y malos recibidos para determinar el alcance.

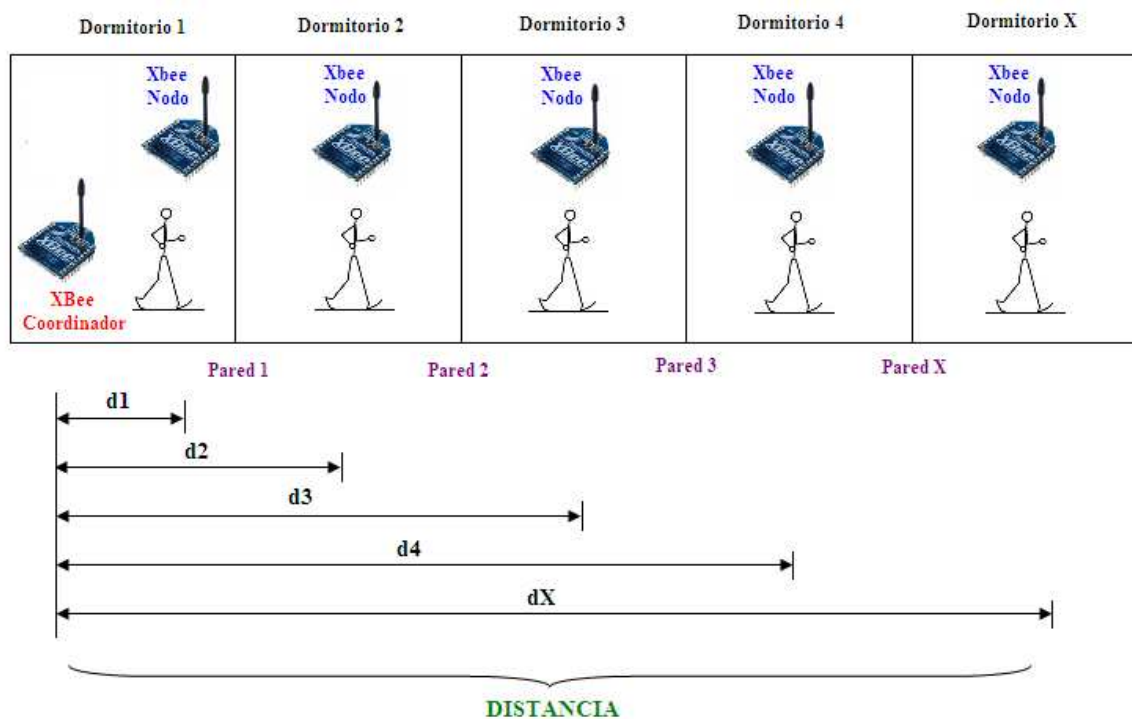


Figura. 4. 69. Prueba de alcance en interiores

- **Exteriores**

La prueba consiste en colocar el módulo coordinador en un punto fijo y movilizarse con el módulo nodo manteniendo la línea de vista sin obstrucciones. Cada cierta distancia se verifica los valores de RSSI y paquetes buenos y malos recibidos para determinar el alcance.

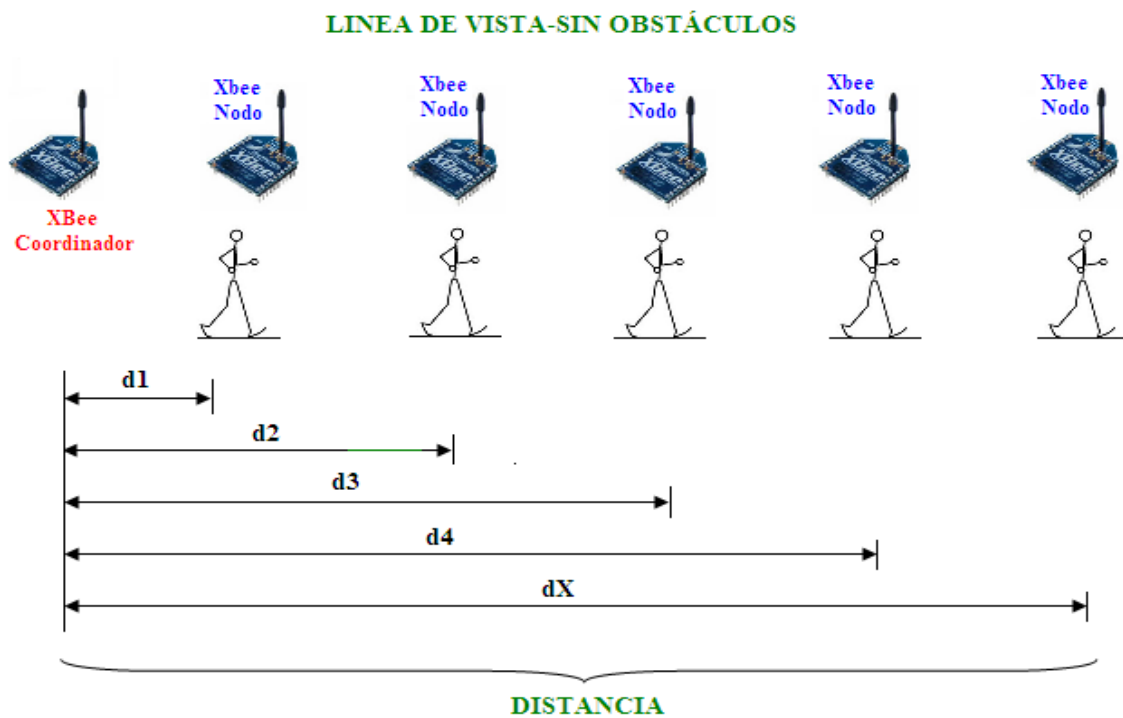


Figura. 4. 70. Prueba de alcance en exteriores

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Prueba de Suministro de Voltaje

El rango operativo de voltaje del módulo XBEE es de 2.8 [V] a 3.4 [V], se establece que los voltajes suministrados son los adecuados para la operación del coordinador y nodo del proyecto como se puede observar en las tablas 4.7 y 4.8.

Tabla. 4. 7. Valores de voltaje medidos en el Coordinador XBee

COORDINADOR	VOLTAJE DC (V)
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	5,370
ENTRADA EN EL MODULO ZIGBEE	3,060

Tabla. 4. 8. Valores de voltaje medidos en el Nodo XBee

NODO	VOLTAJE DC (V)
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	5,397
ENTRADA EN EL MODULO ZIGBEE	2,968

Los módulos XBEE necesitan un valor de corriente de 45 mA para transmisión y 50 mA para la recepción. Los resultados mostrados en las tablas 4.9 y 4.10 establecen que los valores de corrientes suministradas son los adecuados para la operación del coordinador y nodo del proyecto.

Tabla. 4. 9. Valores de corriente medidos en el Coordinador XBee

COORDINADOR	CORRIENTE (mA)
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	1683

Tabla. 4. 10. Valores de corriente medidos en el Nodo XBee

NODO	CORRIENTE (mA)
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	746

4.4.2 Prueba de Consumo de Energía

- **Escenario 1: Consumo de energía en modo de hibernar**

En la tabla. 4. 11 se detalla los valores medidos durante las pruebas.

Tabla. 4. 11. Duración de batería medida en el nodo en estado dormido

HORA (H)	CONSUMO DE CORRIENTE (A)	VOLTAJE EN BORNERAS (V)	VOLTAJE EN INTEGRADO (V)
0	0,01	9,75	3,261
14	0,01	7,99	3,260
15	0,01	7,88	3,260
16	0,01	7,74	3,260
17	0,01	7,59	3,261
18	0,01	7,35	3,261
19	0,01	6,34	3,260
20	0,012	4,938	2,773

En modo reposo la batería tiene una duración de 19 horas. A partir de esta hora el valor de voltaje que alimenta al integrado desciende rápidamente hasta que el módulo deja de funcionar (2,773 V)

- **Escenario 2: Consumo de energía en modo activo y transmitiendo datos**

En la tabla. 4. 12 se detalla los valores medidos durante las pruebas.

Tabla. 4. 12. Duración de batería medida en el nodo en modo activo y transmitiendo datos

HORA	CANTIDAD DE PAQUETES ENVIADOS	CONSUMO DE CORRIENTE (A)	VOLTAJE EN BORNERAS (V)	VOLTAJE EN INTEGRADO (V)
0	0	0,024	9,49	3,257
1	1745	0,024	8,57	3,258
2	1741	0,024	8,35	3,258
3	1744	0,024	8,20	3,258
4	1630	0,024	8,04	3,258
5	1530	0,024	7,76	3,258
6	1542	0,024	7,48	3,258
7	1523	0,024	6,61	3,258
8	658	0,017	4,518	2,684

En modo activo y transmitiendo datos la batería tiene una duración de 7 horas. A partir de esta hora el valor de voltaje que alimenta al integrado desciende rápidamente hasta que el módulo deja de funcionar (2,684 V) presentándose paquetes perdidos.

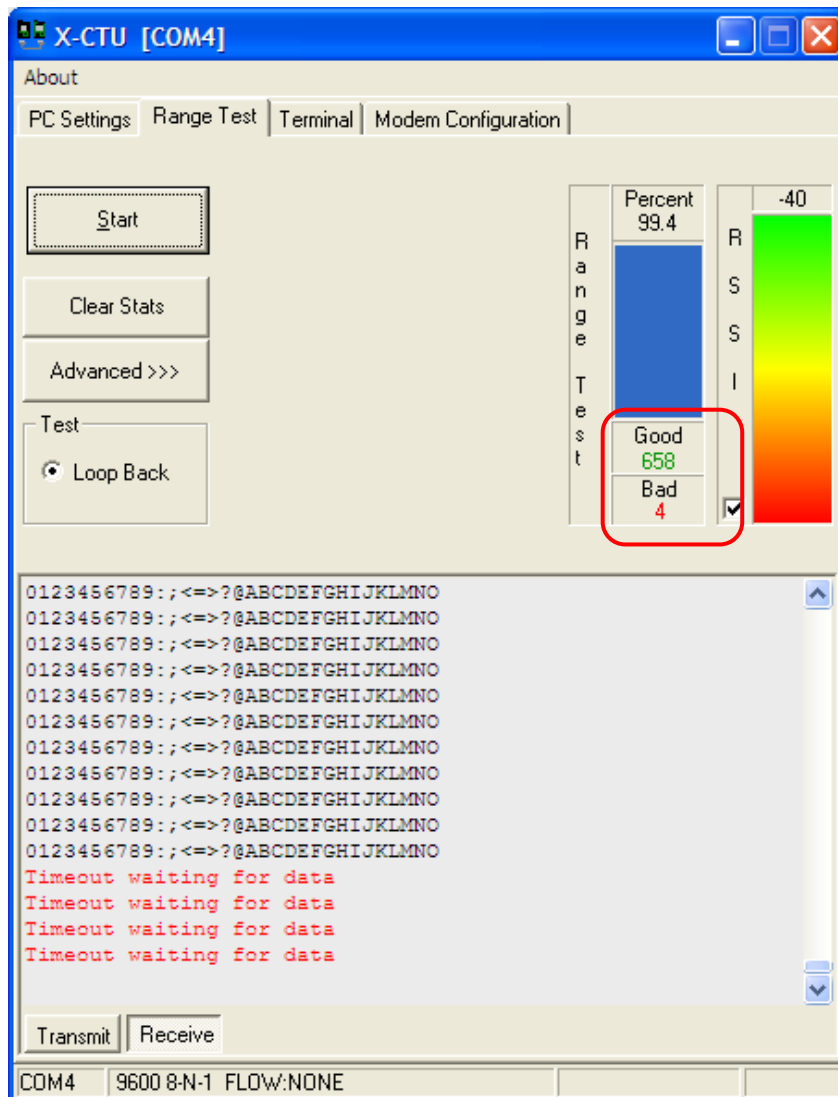


Figura. 4. 71. Paquetes perdidos en la comunicación cuando la batería se encuentra agotada

4.4.3 Prueba de Radiofrecuencia

Se observa que el coordinador cuando únicamente el SC (Scan Channel) le permite escoger entre dos canales CH15 y CH0D, elige el CH15 como canal de operación descartando el CH 0D que es el canal que se configuró para que operen los módulos ZIGBEE PRO.

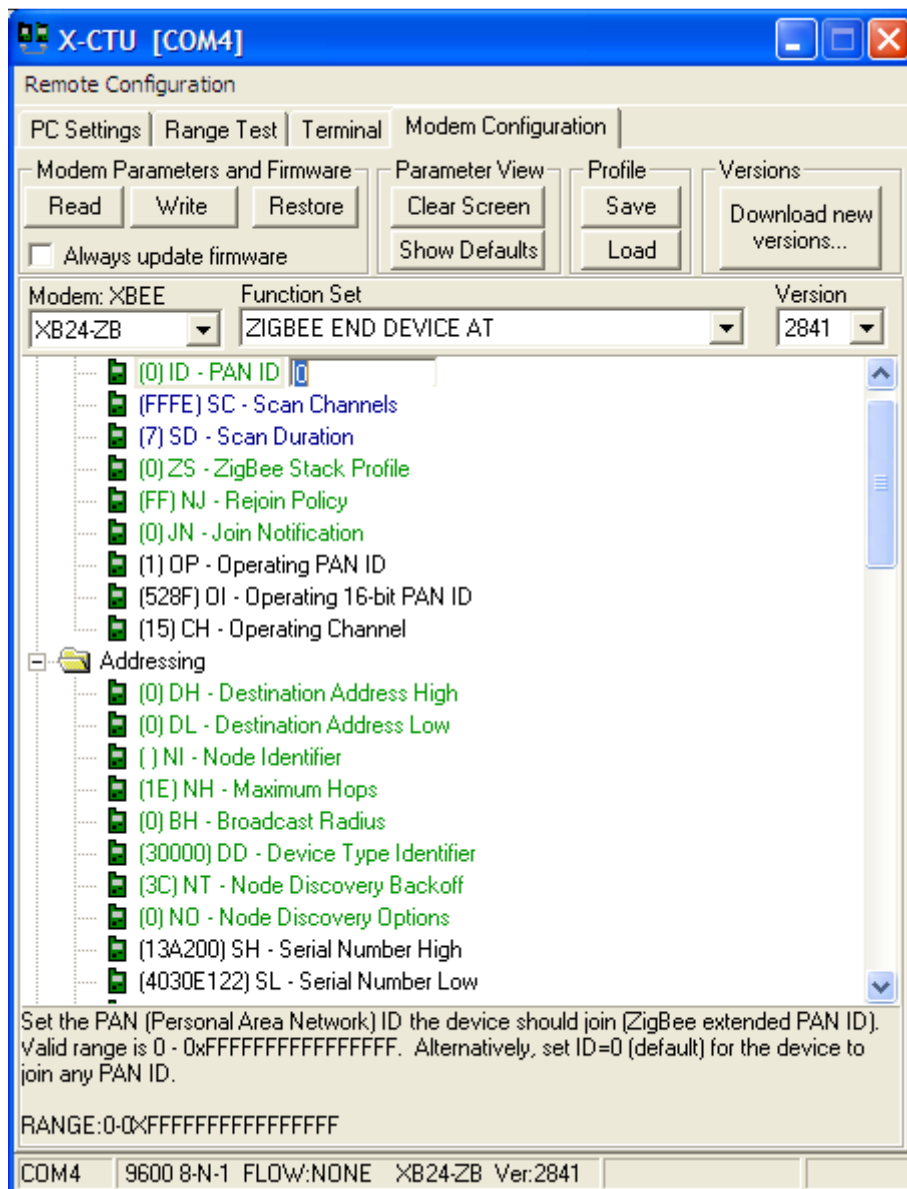


Figura. 4. 72. El nodo se asocia luego de que el coordinado ha elegido el canal de operación CH=15

4.4.4 Prueba de Propagación

- **Escenario 1: Interiores**

Tabla. 4. 13. Potencia de señal recibida en el coordinador (pruebas interior)

DISTANCIA (m)	RSSI (dBm)
0	-40
3	-58
6	-65
9	-82
12	-81
15	-86
MAXIMA DISTANCIA 16	-87

De los datos exhibidos en la tabla. 4.13., se observa que el alcance máximo del sistema en interiores es de 16 metros (sin paquetes perdidos), la prueba se realiza en el interior de una casa de concreto y el alcance medido es con obstrucción de 4 paredes.

- **Escenario 2: Exteriores**

Tabla. 4. 14. Potencia de señal recibida en el coordinador (pruebas exterior)

DISTANCIA (m)	RSSI (dBm)
10	-60
20	-68
30	-70
40	-74
50	-78
MAXIMA DISTANCIA 60	-85

De los datos exhibidos en la tabla. 4.14., se observa que el alcance máximo del sistema en exteriores es de 60 metros (sin paquetes perdidos) con línea de vista.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Del estudio realizado en el proyecto se determina que la principal característica del estándar 802.15.4/ZigBee es su bajo consumo por lo que es la mejor opción para aplicaciones y proyectos en los que el principal objetivo sea la durabilidad de la vida útil de baterías.
- De la investigación realizada se concluye que ZigBee es una tecnología poco conocida en nuestro país y aún no existe aplicaciones comerciales, únicamente se logró encontrar aplicaciones del estándar en el desarrollo de proyectos de tesis universitarias. Los proyectos presentan soluciones muy interesantes en las áreas de Telecomunicaciones, medición automática, domótica, automatización comercial de edificios y control industrial.
- Mediante las pruebas realizadas con el prototipo se determina una ventaja que ZigBee presente frente a Bluetooth. Con la prueba de consumo de energía se concluye que ZigBee no requiere un cambio o carga continua de baterías, debido a su característica de modo de sueño que permite que el módulo permanezca la mayor parte de tiempo dormido, lo que difiere con Bluetooth debido a que este tipo de dispositivos permanecen despiertos y transmitiendo.
- Mediante las pruebas de consumo de energía, radiofrecuencia y propagación que se desarrollan en el presente proyecto se determinó los módulos XBee funcionan de acuerdo a las especificaciones definidas en el estándar, soportando las necesidades particulares de las redes de sensores de bajo costo y consumo, requiriendo alimentación mínima y a la vez permitiendo el transporte confiable de datos entre dispositivos remotos, opera dentro de la banda 2.4 GHz ISM,
- En el proyecto se implementa una red ZigBee formada por un coordinador y un nodo, se pudo comprobar de acuerdo a la teoría que el coordinador es el encargado de formar la red, eligiendo el PAN ID, un canal de funcionamiento y asignando la dirección de 16

bits al nodo todo esto a través de la utilización del software X-CTU, además se determina que la forma de asociación más recomendada es la manual, que consiste en configurar el mismo PAN ID en coordinador y nodo debido a que evita que en un lugar donde existe más redes ZigBee los dispositivos se asocien a la primera red que detecten.

- La prueba de suministro de voltaje nos permite determinar que el rango operativo de voltaje de los módulos XBEE es de 2.8 [V] a 3.4 [V] y corriente de 45 mA para transmisión y 50 mA para la recepción, en los rangos especificados se garantiza su correcta operación y funcionamiento.
- La prueba de consumo de energía nos permite concluir que en modo hibernar (dormido) la batería tiene un tiempo de utilidad de 19 horas con un consumo de corriente de 10 mA, en modo activo y transmitiendo datos es de 7 horas con un consumo de corriente de 24 mA. A partir de estos tiempos el valor de voltaje y corriente de la batería descienden rápidamente y no son los necesarios por lo que el módulo tiene mal funcionamiento (pérdida de paquetes) o deja de funcionar.
- Mediante la prueba de radiofrecuencia se concluye que los módulos XBee son muy robustos ante la interferencia de otros dispositivos que funcionan en la misma frecuencia 2,4 GHz, por esta característica los módulos XBee descartan los canales en el que detecte mayor cantidad de interferencia y toma como su canal de funcionamiento el más adecuado.
- Se concluye que la máxima distancia de trabajo a la que puede funcionar nuestro prototipo en interiores es de 16 metros que depende de la estructura de la edificación (madera, cemento, mixta) y elementos que se encuentren en el espacio y 60 metros en exteriores (en línea de vista y sin obstrucciones).

5.2 RECOMEDACIONES

- Es recomendable el probar la implementación del prototipo de comunicaciones con otras tecnologías de redes WPAN y de esta manera cerciorarse cual es la mejor opción en cuanto a desempeño comparándola con la presentada en el presente proyecto de titulación.
- Realizar pruebas comparativas al adquirir nuevos equipos inalámbricos (módulos ZigBee), de diferente marca y modelo a los usados en el presente proyecto de esta forma determinar cual son módulos más sencillos (configuración y manejo) para desarrollar aplicaciones.
- Se recomienda realizar la prueba de radiofrecuencia, exponiendo a los módulos XBee a interferencia de otros dispositivos que trabajen en la banda de 2,4 GHz como microondas, router Wireless, equipos Bluetooth y radios 802.11b, y mediante un analizador de espectro verificar que realice la elección del mejor canal para el funcionamiento de la red ZigBee.
- Realizar la prueba de propagación (interior) en edificaciones de estructura diferente a la presentada en el presente proyecto. Las alternativas pueden ser: madera, mixtas o con vidrios y comparar los resultados obtenidos con los presentados en el proyecto.
- Es recomendable realizar la prueba de propagación (interior y exterior) variando la potencia de transmisión de los módulos y determinar el alcance que se puede tener en base a esta característica.
- En el presente proyecto para la prueba de consumo de energía se usa una batería con las siguientes características: nickel-metal-hydride, de 8,4 V, recargable, 170 mAh. Es recomendable realizar esta prueba empleado diferentes tipos de baterías (AA, AAA en serie) considerando que deben proporcionar el voltaje y corriente necesarios para el funcionamiento los módulos XBee.

ANEXO 1

MANUAL DE LOS MÓDULOS XBEE/XBEE PRO OEM RF

XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules

XBee/XBee-PRO OEM RF Modules
ZigBee™ Networks
RF Module Operation
RF Module Configuration
Appendices



Product Manual v8.x1x Beta - ZigBee Protocol

For OEM RF Module Part Numbers: XB24-...-002
XBP24-...-002

ZigBee OEM RF Modules by MaxStream, Inc.

Firmware Versions: 8.0xx - Coordinator, Transparent Operation
 8.1xx - Coordinator, API Operation
 8.2xx - Router, Transparent Operation
 8.3xx - Router, API Operation



MaxStream®

355 South 520 West, Suite 180

Lindon, UT 84042

Phone: (801) 765-9885

Fax: (801) 765-9895

rf-xperts@maxstream.net

www.MaxStream.net (live chat support)

M100344
2007.01.04

© 2007 MaxStream, Inc. All rights reserved

No part of the contents of this manual may be transmitted or reproduced in any form or by any means without the written permission of MaxStream, Inc.

ZigBee™ is a registered trademark of the ZigBee Alliance.

XBee™ and XBee-PRO™ are trademarks of MaxStream, Inc.

Technical Support: Phone: (801) 765-9885
 Live Chat: www.maxstream.net
 E-mail: rf-xperts@maxstream.net

Contents

1. XBee/XBee-PRO OEM RF Modules	4	4. RF Module Configuration	24
1.1. Key Features	4	4.1. AT Command Programming Examples	24
1.1.1. Worldwide Acceptance	4	4.2. Command Reference Tables	25
1.2. Specifications	5	4.3. API Operation	29
1.3. Mechanical Drawings	6	4.3.1. API Frame Specifications	29
1.4. Mounting Considerations	6	4.3.2. API Types	30
1.5. Pin Signals	7	Appendix A: Agency Certifications	34
1.6. Electrical Characteristics	7	FCC Certification	34
1.7. Definitions	8	OEM Labeling Requirements	34
2. ZigBee Networks	10	FCC Notices	34
2.1. ZigBee Network Formation	10	FCC-Approved Antennas (2.4 GHz)	35
2.1.1. Node Types	10	European Certification	36
2.1.2. Network Limitations	10	OEM Labeling Requirements	36
2.2. ZigBee Network Communications	12	Restrictions	36
2.2.1. ZigBee Addressing	12	Declarations of Conformity	36
2.2.2. Mesh Routing	12	Appendix B: Development Guide	37
2.2.3. Broadcast Transmissions	13	Migrating from the 802.15.4 Protocol	37
3. RF Module Operation	14	ZigBee Command Set	37
3.1. Serial Communications	14	API / AT Firmware Versions	37
3.1.1. UART Data Flow	14	XBee/XBee-PRO Development Kits	38
3.1.2. Transparent Operation	15	Interfacing Options	38
3.1.3. API Operation	15	RS-232 Development Board	39
3.1.4. Flow Control	16	External Interface	39
3.2. XBee/XBee-PRO Networks	17	RS-232 Pin Signals	40
3.2.1. XBee/XBee-PRO Coordinator	17	Wiring Diagrams	41
3.2.2. XBee/XBee-PRO Router	17	Adapters	42
3.2.3. Network Reset	18	USB Development Board	43
3.2.4. Network Mapping	18	External Interface	43
3.3. XBee/XBee-PRO Addressing	19	USB Pin Signals	43
3.3.1. 64-bit Addressing	19	X-CTU Software	44
3.3.2. API Addressing	19	Install	44
3.3.3. NI-String Addressing	20	Serial Communications Software	44
3.3.4. Coordinator Addressing	20	Appendix C: Additional Information	45
3.3.5. Broadcast Addressing	20	1-Year Warranty	45
3.4. Modes of Operation	21	Ordering Information	45
3.4.1. Idle Mode	21	Contact MaxStream	46
3.4.2. Transmit Mode	21		
3.4.3. Receive Mode	21		
3.4.4. Command Mode	22		
3.5. Network Startup Examples	23		

1. XBee/XBee-PRO OEM RF Modules

The XBee and XBee-PRO OEM RF Modules were engineered to operate within the ZigBee protocol and support the unique needs of low-cost, low-power wireless sensor networks. The modules require minimal power and provide reliable delivery of data between remote devices.

Both modules operate within the ISM 2.4 GHz frequency band and are pin-for-pin compatible with each other.



1.1. Key Features

High Performance, Low Cost

XBee

- Indoor/Urban: up to 100' (30 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 300' (100 m)
- Transmit Power: 1 mW (0 dBm)
- Receiver Sensitivity: -92 dBm

XBee-PRO

- Indoor/Urban: up to 300' (100 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 1 mile (1500 m)
- Transmit Power: 100 mW (20 dBm) EIRP
- Receiver Sensitivity: -100 dBm

RF Data Rate: 250,000 bps

Advanced Networking & Security

Retries and Acknowledgements

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Each direct sequence channel has over 65,000 unique network addresses available

Point-to-point, point-to-multipoint and peer-to-peer topologies supported

Self-routing, self-healing and fault-tolerant mesh networking

Low Power

XBee

- TX Current: 45 mA (@3.3 V)
- RX Current: 50 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 μ A

XBee-PRO

- TX Current: 215 mA (@3.3 V)
- RX Current: 55 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 μ A

Easy-to-Use

No configuration necessary for out-of-box RF communications

AT and API Command Modes for configuring module parameters

Small form factor

Extensive command set

Free X-CTU Software (Testing and configuration software)

Free & Unlimited Technical Support

1.1.1. Worldwide Acceptance

FCC Approval (USA) Refer to Appendix A [p34] for FCC Requirements.

Systems that contain XBee/XBee-PRO RF Modules inherit MaxStream Certifications.

ISM (Industrial, Scientific & Medical) **2.4 GHz frequency band**

Manufactured under **ISO 9001:2000** registered standards

XBee/XBee-PRO RF Modules are optimized for use in **US, Canada, Australia, Israel and Europe** (contact MaxStream for complete list of agency approvals).



1.2. Specifications

Table 1-01. Specifications of the XBee/XBee-PRO OEM RF Module (PRELIMINARY)

Specification	XBee	XBee-PRO
Performance		
Indoor/Urban Range	up to 100 ft. (30 m)	Up to 300' (100 m)
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 300 ft. (100 m)	Up to 1 mile (1500 m)
Transmit Power Output (software selectable)	1mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm) conducted, 100 mW (20 dBm) EIRP*
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-92 dBm (1% packet error rate)	-100 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements		
Supply Voltage	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
Operating Current (Transmit)	45mA (@ 3.3 V)	If PL=0 (10dBm): 137mA(@3.3V), 139mA(@3.0V) PL=1 (12dBm): 155mA (@3.3V), 153mA(@3.0V) PL=2 (14dBm): 170mA (@3.3V), 171mA(@3.0V) PL=3 (16dBm): 188mA (@3.3V), 195mA(@3.0V) PL=4 (18dBm): 215mA (@3.3V), 227mA(@3.0V)
Operating Current (Receive)	50mA (@ 3.3 V)	55mA (@ 3.3 V)
Power-down Current	not supported	not supported
General		
Operating Frequency Band	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector
Networking & Security		
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer & Mesh	
Number of Channels (software selectable)	16 Direct Sequence Channels	12 Direct Sequence Channels
Addressing Options	PAN ID, Channel and Addresses	
Agency Approvals		
United States (FCC Part 15.247)	OUR-XBEE	OUR-XBEEPRO
Industry Canada (IC)	4214A XBEE	4214A XBEEPRO
Europe (CE)	ETSI	ETSI (Max. 10 dBm transmit power output)*

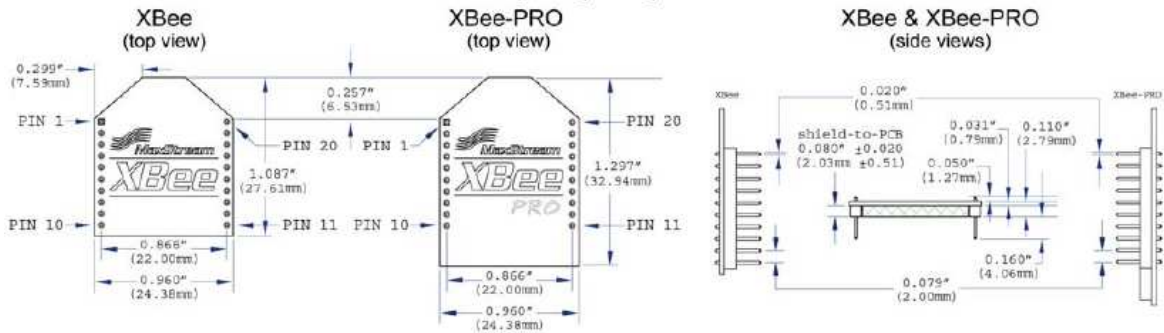
* When operating in Europe: XBee-PRO RF Modules must be configured to operate at a maximum transmit power output level of 10 dBm. The power output level is set using the PL command. The PL parameter must equal "0" (10 dBm).

Additionally, European regulations stipulate an EIRP power maximum of 12.86 dBm (19 mW) for the XBee-PRO and 12.11 dBm for the XBee when integrating high-gain antennas.

Antenna Options: The ranges specified are typical when using the integrated Whip (1.5 dBi) and Dipole (2.1 dBi) antennas. The Chip antenna option provides advantages in its form factor; however, it typically yields shorter range than the Whip and Dipole antenna options when transmitting outdoors. For more information, refer to the "XBee Antenna" application note located on MaxStream's web site (<http://www.maxstream.net/support/knowledgebase/article.php?kb=153>).

1.3. Mechanical Drawings

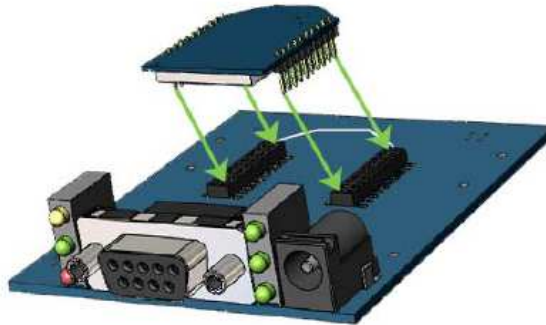
Figure 1-01. Mechanical drawings of the XBee/XBee-PRO OEM RF Modules (antenna options not shown)
The XBee and XBee-PRO RF Modules are pin-for-pin compatible.



1.4. Mounting Considerations

The XBee/XBee-PRO RF Module was designed to mount into a receptacle (socket) and therefore does not require any soldering when mounting it to a board. The XBee Development Kits contain RS-232 and USB interface boards which use two 20-pin receptacles to receive modules.

Figure 1-02. XBee Module Mounting to an RS-232 Interface Board.



The receptacles used on MaxStream development boards are manufactured by Century Interconnect. Several other manufacturers provide comparable mounting solutions; however, MaxStream currently uses the following receptacles:

- Through-hole single-row receptacles -
Samtec P/N: MMS-110-01-L-SV (or equivalent)
- Surface-mount double-row receptacles -
Century Interconnect P/N: CPRMSL20-D-0-1 (or equivalent)
- Surface-mount single-row receptacles -
Samtec P/N: SMM-110-02-SM-S

MaxStream also recommends printing an outline of the module on the board to indicate the orientation the module should be mounted.

1.5. Pin Signals

Figure 1-03. XBee/XBee-PRO RF Module Pin Number
(top sides shown - shields on bottom)

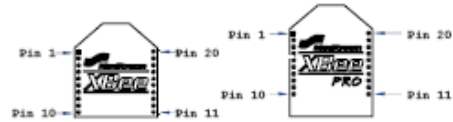


Table 1-02. Pin Assignments for the XBee and XBee-PRO Modules
(Low-asserted signals are distinguished with a horizontal line above signal name.)

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DO8*	Output	Digital Output 8
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator
7	[reserved]	-	Do not connect
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ* / DI8	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	AD4* / DIO4*	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / DIO7*	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	VREF*	Input	Voltage Reference for A/D Inputs
15	Associate / AD5* / DIO5*	Either	Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5
16	RTS* / AD6* / DIO6*	Either	Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6
17	AD3* / DIO3*	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2* / DIO2*	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1* / DIO1*	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0* / DIO0*	Either	Analog Input 0 or Digital I/O 0

* Functions not supported at the time of this release.

Design Notes:

- Minimum connections: VCC, GND, DOUT & DIN
- Minimum connections for updating firmware: VCC, GND, DIN, DOUT, RTS & DTR
- Signal Direction is specified with respect to the module
- Module includes a 50k Ω pull-up resistor attached to RESET
- Several of the input pull-ups can be configured using the PE command
- Unused pins should be left disconnected

1.6. Electrical Characteristics

Table 1-03. DC Characteristics of the XBee & XBee-PRO (VCC = 2.8 - 3.4 VDC)

Symbol	Parameter	Condition	Min	Typical	Max	Units
V _{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	0.35 * VCC	V
V _{IH}	Input High Voltage	All Digital Inputs	0.7 * VCC	-	-	V
V _{OL}	Output Low Voltage	I _{OL} = 2 mA, VCC ≥ 2.7 V	-	-	0.5	V
V _{OH}	Output High Voltage	I _{OH} = -2 mA, VCC ≥ 2.7 V	VCC - 0.5	-	-	V
I _{IN}	Input Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all inputs, per pin	-	0.025	1	uA
I _{OZ}	High Impedance Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all I/O High-Z, per pin	-	0.025	1	uA
TX	Transmit Current	VCC = 3.3 V	-	45 (XBee) 215 (PRO)	-	mA
RX	Receive Current	VCC = 3.3 V	-	50 (XBee) 55 (PRO)	-	mA
PWR-DWN	Power-down Current	SM parameter = 1	-	< 10	-	uA

1.7. Definitions

Table 1-04. Terms and Definitions

ZigBee Node Types	
Coordinator	<p>A node that has the unique function of forming a network. The Coordinator is responsible for establishing the operating channel and PAN ID for an entire network. Once established, the Coordinator can form a network by allowing Routers and End Devices to join to it. Once the network is formed, the Coordinator functions like a Router (it can participate in routing packets and be a source or destination for data packets).</p> <ul style="list-style-type: none"> -- One Coordinator per PAN -- Establishes/Organizes PAN -- Can route data packets to/from other nodes -- Can be a data packet source and destination -- Mains-powered <p>Refer to the XBee/XBee-PRO Coordinator section [p17] for more information.</p>
Router	<p>A node that creates/maintains network information and uses this information to determine the best route for a data packet. A router must join a network before it can allow other Routers and End Devices to join to it.</p> <p>A Router can participate in routing packets and is intended to be a mains-powered node.</p> <ul style="list-style-type: none"> -- Several Routers can operate in one PAN -- Can route data packets to/from other nodes -- Can be a data packet source and destination -- Mains-powered <p>Refer to the XBee/XBee-PRO Router section [p17] for more information.</p>
End Device	<p>End Devices have no routing capacity. End Devices must always interact with their parent node (Router or Coordinator) in order to transmit or receive data.</p> <p>An End Device can be a source or destination for data packets but cannot route packets. End Devices can be battery-powered and offer low-power operation.</p> <ul style="list-style-type: none"> -- Several End Devices can operate in one PAN -- Can be a data packet source and destination -- All messages are relayed through a Coordinator or Router -- Low power <p>End Devices are not supported in this release.</p>
ZigBee Protocol	
PAN	<p>Personal Area Network - A data communication network that includes a Coordinator and one or more Routers/End Devices. Network formation is governed by Network Maximum Depth, Maximum Child Routers and Maximum Children End Devices.</p>
Joining	<p>The process of a node becoming part of a ZigBee PAN. A node becomes part of a network by joining to a Coordinator or a Router (that has previously joined to the network). During the process of joining, the node that allowed joining (the parent) assigns a 16-bit address to the joining node (the child).</p>

Table 1-04. Terms and Definitions

Network Maximum Depth	The level of descendents from a Coordinator. In a MaxStream PAN, the Network Maximum Depth is 5.
Maximum Child Routers	The maximum number of Routers than can join to one node. The maximum number of Child Routers in a MaxStream PAN is 6.
Maximum Child End Devices	The maximum number of End Devices than can join to one node. The maximum number of Child End Devices in a MaxStream PAN is 14.
Network Address	The 16-bit address assigned to a node after it has joined to another node.
Operating Channel	The frequency selected for data communications between nodes. The operating channel is selected by the Coordinator on power-up.
Energy Scan	A scan of RF channels that detects the amount of energy present on the selected channels. The Coordinator uses the energy scan to determine the operating channel.
Route Request	Broadcast transmission sent by a Coordinator or Router throughout the network in attempt to establish a route to a destination node.
Route Reply	Unicast transmission sent back to the originator of the route request. It is initiated by a node when it receives a route request packet and its address matches the Destination Address in the route request packet.
Route Discovery	The process of establishing a route to a destination node when one does not exist in the Routing Table. It is based on the AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector routing) protocol.
ZigBee Stack	ZigBee is a published specification set of high-level communication protocols for use with small, low-power modules. The ZigBee stack provides a layer of network functionality on top of the 802.15.4 specification. For example, the mesh and routing capabilities available to ZigBee solutions are absent in the 802.15.4 protocol.

2. ZigBee Networks

2.1. ZigBee Network Formation

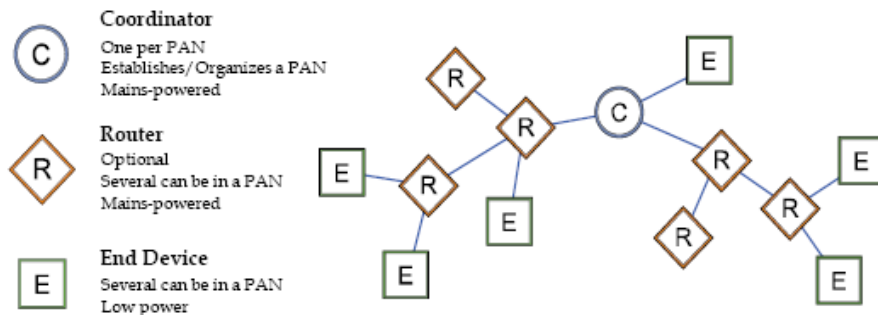
A ZigBee PAN is formed by nodes joining to a Coordinator or to a previously joined Router. Once the Coordinator defines the operating channel and PAN ID, it can allow Routers and End Devices to join to it. When a node joins a network, it receives a 16-bit Network Address.

Once a Router has joined the network, it can also allow other nodes to join to it. Joining establishes a parent/child relationship between two nodes. The node that allowed the join is the parent and the node that joined is the child. The parent/child relationship is not necessary for routing; however, it is necessary for network formation and Network Address assignment. If a Coordinator does not exist, a network cannot be formed. A node cannot transmit or receive data until it has joined a PAN.

2.1.1. Node Types

A ZigBee PAN consists of one Coordinator and one or more Routers and/or End Devices. Refer to the Coordinator [p17] and Router [p17] sections of the "RF Module Operation" chapter for more information regarding each node type.

Figure 2-01. Node Types / Sample of a Basic ZigBee Network Topology



End Devices are not supported at the time of this release.

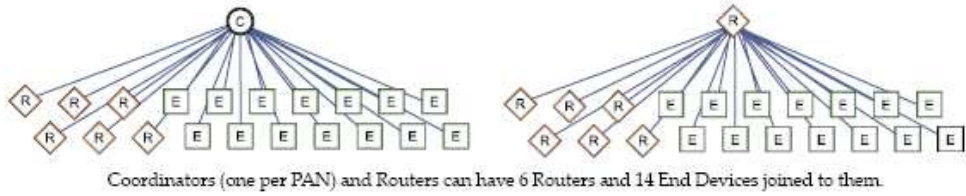
2.1.2. Network Limitations

MaxStream ZigBee PANs are limited to the following boundaries:

- Maximum Children - The Coordinator and each joined Router can support up to 20 children, 6 of which can be Routers (Maximum Child Routers). Refer to Figure 2-02.
- Network Maximum Depth - The Maximum Network Depth is 5 - Maximum Network Depth refers to the level of descendants from the Coordinator. Refer to Figure 2-03.

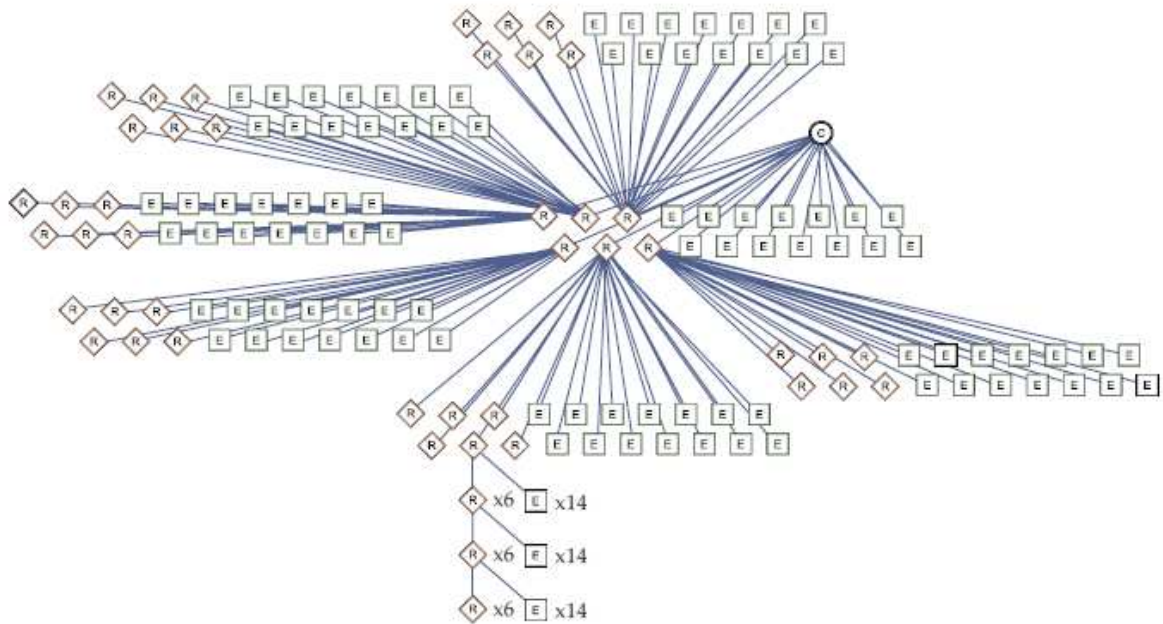
Refer to the definitions table [p8] for more information.

Figure 2-02. Maximum Number of Child Devices per Parent



Coordinators (one per PAN) and Routers can have 6 Routers and 14 End Devices joined to them.

Figure 2-03. Maximum Network Depth
Network depth can span 5 levels deep.



2.2. ZigBee Network Communications

2.2.1. ZigBee Addressing

The 802.15.4 protocol upon which the ZigBee protocol is built specifies two address types:

- 16-bit Network Addresses
- 64-bit Addresses

16-bit Network Addresses

A 16-bit Network Address is assigned to a node when the node joins a network. The Network Address is unique to each node in the network. However, Network Addresses are not static - it can change.

The following two conditions will cause a node to receive a new Network Address:

1. An End Device cannot communicate with its parent.
2. A Router or End Device, when it power cycles, sends an 802.15.4 Orphan Notification command to locate its parent. If the parent node does not respond, the Router or End Device considers itself not-joined and repeats the process of joining the network. Once the node joins the network, it and all of its descendents will receive a new Network Address.

Since all ZigBee communications use 16-bit addressing, a node's 16-bit address must be known before communications can take place.

64-bit Addresses

Each node contains a unique 64-bit address. The 64-bit address uniquely identifies a node and is permanent.

2.2.2. Mesh Routing

Mesh routing allows data packets to traverse multiple nodes (hops) in a network to route data from a source to a destination. The route a packet can take in a mesh network is independent of the parent/child relationships established during joining. Before transmitting a data packet from source to destination nodes, a route must be established. Route discovery is based on the AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector routing) protocol.

AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) Routing Algorithm

Routing under the AODV protocol is accomplished using tables in each node that store in the next hop (intermediary node between source and destination nodes) for a destination node. If a next hop is not known, route discovery must take place in order to find a path. Since only a limited number of routes can be stored on a Router, route discovery will take place more often on a large network with communication between many different nodes.

When a source node must discover a route to a destination node, it sends a broadcast route request command. The route request command contains the source Network Address, the destination Network Address and a Path Cost field (a metric for measuring route quality). As the route request command is propagated through the network (refer to the Broadcast Transmission section [p13]), each node that re-broadcasts the message updates the Path Cost field and creates a temporary entry in its route discovery table.

When the destination node receives a route request, it compares the 'path cost' field against previously received route request commands. If the path cost stored in the route request is better than any previously received, the destination node will transmit a route reply packet to the node that originated the route request. Intermediate nodes receive and forward the route reply packet to the Source Node (the node that originated route request).

Refer to the ZigBee specification for more details.

2.2.3. Broadcast Transmissions

Broadcast transmissions within the ZigBee protocol are intended to be propagated throughout the entire network such that all nodes receive the transmission. This requires each broadcast transmission be retransmitted by all Router nodes to ensure all nodes receive the transmission.

Broadcast transmissions use a passive acknowledgment scheme. This means that when a node transmits a broadcast transmission, it listens to see if all of its neighbors retransmit the message. If one or more neighbor nodes do not retransmit the data, the node will retransmit the broadcast message and listen again for the neighbor nodes to forward the broadcast transmission.

Refer to the ZigBee specification for more details.

3. RF Module Operation

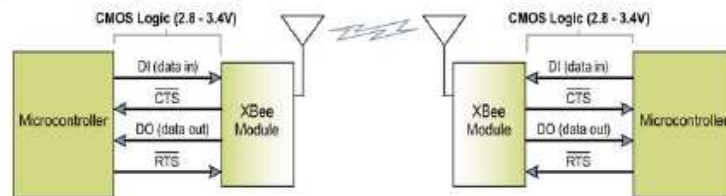
3.1. Serial Communications

The XBee/XBee-PRO OEM RF Modules interface to a host device through a logic-level asynchronous serial port. Through its serial port, the module can communicate with any logic and voltage compatible UART; or through a level translator to any serial device (For example: Through a Max-Stream proprietary RS-232 or USB interface board).

3.1.1. UART Data Flow

Devices that have a UART interface can connect directly to the pins of the RF module as shown in the figure below.

Figure 3-01. System Data Flow Diagram in a UART-interfaced environment
(Low-asserted signals distinguished with horizontal line over signal name.)



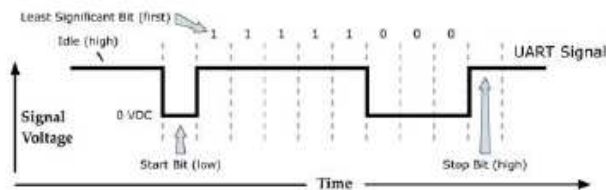
RTS flow control is not currently supported.

Serial Data

Data enters the module UART through the DI pin (pin 3) as an asynchronous serial signal. The signal should idle high when no data is being transmitted.

Each data byte consists of a start bit (low), 8 data bits (least significant bit first) and a stop bit (high). The following figure illustrates the serial bit pattern of data passing through the module.

Figure 3-02. UART data packet 0x1F (decimal number "31") as transmitted through the RF module
Example Data Format is 8-N-1 (bits - parity - # of stop bits)



The module UART performs tasks, such as timing and parity checking, that are needed for data communications. Serial communications depend on the two UARTs to be configured with compatible settings (baud rate, parity, start bits, stop bits, data bits).

3.1.2. Transparent Operation

RF modules that contain the following firmware versions will support Transparent Mode: 8.0xx (Coordinator) and 8.2xx (Router).

When operating in Transparent Mode, modules are configured using AT Commands and API operation is not supported. The modules act as a serial line replacement - all UART data received through the DI pin is queued up for RF transmission. Data is sent to a module as defined by the DH (Destination Address High) and DL (Destination Address Low) parameters.

When RF data is received that is addressed to the module's 64-bit Address, the data is sent out the DO pin.

Serial-to-RF Packetization

Data is buffered in the DI buffer until one of the following causes the data to be packetized and transmitted:

1. No serial characters are received for the amount of time determined by the RO (Packetization Timeout) parameter. If RO = 0, packetization begins when a character is received.
2. Maximum number of characters that will fit (72) in an RF packet is received.
3. The Command Mode Sequence (GT + CC + GT) is received. Any character buffered in the DI buffer before the sequence is transmitted.

3.1.3. API Operation

API (Application Programming Interface) Operation is an alternative to the default Transparent Operation. The frame-based API extends the level to which a host application can interact with the networking capabilities of the module.

When in API mode, all data entering and leaving the module is contained in frames that define operations or events within the module.

Transmit Data Frames (received through the DI pin (pin 3)) include:

- RF Transmit Data Frame
- Command Frame (equivalent to AT commands)

Receive Data Frames (sent out the DO pin (pin 2)) include:

- RF-received data frame
- Command response
- Event notifications such as reset, associate, disassociate, etc.

The API provides alternative means of configuring modules and routing data at the host application layer. A host application can send data frames to the module that contain address and payload information instead of using command mode to modify addresses. The module will send data frames to the application containing status packets; as well as source, RSSI and payload information from received data packets.

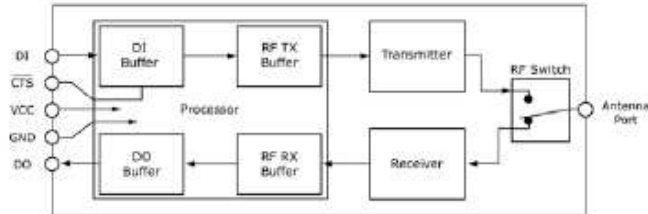
The API operation option facilitates many operations such as the examples cited below:

- > Transmitting data to multiple destinations without entering Command Mode
- > Receive success/failure status of each transmitted RF packet
- > Identify the source address of each received packet

To implement API operations, refer to API sections [p29].

3.1.4. Flow Control

Figure 3-03. Internal Data Flow Diagram



DI (Data In) Buffer

When serial data enters the RF module through the DI pin (pin 3), the data is stored in the DI Buffer until it can be processed.

Hardware Flow Control (\overline{CTS}). When the DI buffer is 17 bytes away from being full; by default, the module de-asserts \overline{CTS} (high) to signal to the host device to stop sending data [refer to D7 (DIO7 Configuration) parameter]. \overline{CTS} is re-asserted after the DI Buffer has 34 bytes of memory available.

Cases in which the DI Buffer may become full and possibly overflow:

1. If the module is receiving a continuous stream of RF data, any serial data that arrives on the DI pin is placed in the DI Buffer. The data in the DI buffer will be transmitted over-the-air when the module is no longer receiving RF data in the network.
2. When data is ready to be transmitted, the module may need to discover a Network Address and/or a Route in order to reach the destination node. Discovery overhead may delay packet transmission.
Refer to the ZigBee Networks --> Mesh Routing sections for more information.

Refer to the RO (Packetization Timeout) command description [p25] and the Mesh Routing section [p12] for more information.

DO (Data Out) Buffer

When RF data is received, the data enters the DO buffer and is sent out the serial port to a host device. Once the DO Buffer reaches capacity, any additional incoming RF data is lost.

Hardware Flow Control (\overline{RTS}). If \overline{RTS} is enabled for flow control (D6 (DIO6 Configuration) Parameter = 1), data will not be sent out the DO Buffer as long as \overline{RTS} (pin 16) is de-asserted.

Cases in which the DO Buffer may become full and possibly overflow:

1. If the RF data rate is set higher than the interface data rate of the module, the module will receive data from the transmitting module faster than it can send the data to the host.
2. If the host does not allow the module to transmit data out from the DO buffer because of being held off by hardware or software flow control.

\overline{RTS} flow control is not supported in this release.

3.2. XBee/XBee-PRO Networks

3.2.1. XBee/XBee-PRO Coordinator

Network Startup

In order to form a network, a Coordinator must select an unused operating channel and PAN ID on behalf of its network. To do this, the Coordinator first performs an energy scan on all channels as specified by its SC (Scan Channels) parameter. The scan time on each channel is determined by the SD (Scan Duration) parameter. Once the energy scan is completed, an Active Scan is issued. The Active Scan returns a list of discovered Coordinators and Routers (up to 5 results). The duration of the Active Scan on each channel is also determined by the SD parameter. An unoccupied operating channel is then chosen for PAN operations.

If the ID (PAN ID) parameter = 0xFFFF: The Coordinator will select a random PAN ID. Otherwise, the Coordinator will startup on its stored ID parameter.

After the Coordinator has started, it will allow nodes to join to it for a time based on its NJ (Node Join Time) parameter. If enabled, the Associate LED (D5 (DIO5 Configuration) command) will blink 1x per second after the Coordinator has started. At this point, the operating channel and PAN ID can be read using the CH (Operating Channel) and ID (PAN ID) commands. The 16-bit address of the Coordinator is always 0x0000.

If API is enable (AP parameter > 0):

The API Modem Status "Coordinator Started" is sent out the UART.

The AI (Association Indication) command can be used at any point during the Coordinator startup routine to determine the status of the startup operation.

3.2.2. XBee/XBee-PRO Router

Router Startup

A new Router must locate a Router that has already joined a PAN or a Coordinator to join to. To do this, it first issues an Active Scan on each of the SC channels. The scan duration on each of these channels is determined by the SD parameter. The Active Scan will return a list of discovered Coordinators and Routers (up to 5 results). The Router will then try to join to a parent (Router or Coordinator) that is allowing joining, based on the ID parameter. If ID = 0xFFFF, the Router will attempt to join a parent on any PAN ID. Otherwise, the Router will only attempt joining with a Router/Coordinator that operates on the PAN ID specified by the ID parameter. If a valid Router/Coordinator is found, the Router will attempt to join to that node. If the join succeeds, the Router has successfully started.

After the Router has started, it will allow nodes to join to it for a time based on the NJ (Node Join Time) parameter. If enabled, the Associate LED (D5 (DIO5 Configuration) command) will blink 2x per second after the Router has started. At this point, the operating channel and PAN ID can be read using the CH (Operating Channel) and ID (PAN ID) commands. The 16-bit Network Address of the Router can be read using the MY (16-bit Source Address) command.

If API is enable (AP parameter > 0):

The API Modem Status "Joined" is sent out the UART.

The AI (Association Indication) command can be used at any point during the Router startup routine to know the status of the startup operation.

Router Configuration

The SC (Scan Channel) and ID (PAN ID) parameter values affect Router startup by determining the channels the Router will scan [SC (Scan Channels) command] to find a parent to join and by determining the allowable PAN ID(s) the node will join (ID parameter).

Changing these parameters could be problematic if other nodes (children) have already joined the Router. These commands should not be changed once the Router has started and allowed nodes to join to it.

3.2.3. Network Reset

Resetting a Coordinator

Upon reset (Power-up, FR (Software Reset) or NR (Network Reset)):

1. If a Coordinator has formed a network, it will retain the PAN ID and operating channel information as well as a list of its child nodes. However, if either the SC (Scan Channels) or ID (PAN ID) parameters have changed and the Coordinator is reset, the Coordinator will startup using the new SC and/or ID values and will erase its list of child nodes.
2. If the Coordinator must change the operating channel of an established network, it can alert all nodes in the network to leave and reform the network by issuing the NR (Network Reset) command with a parameter of '1'. When this command is issued, the Coordinator sends a broadcast message across the entire network forcing all nodes to unjoin and rejoin to a new parent. The Coordinator will, after several seconds, restart and allow joining according to its saved NJ (Node Join Time) setting. Once the Coordinator has started, other nodes can join the PAN. The other nodes will attempt to rejoin by scanning all channels (as specified by the SC parameter) for a parent operating on the PAN ID (specified by its ID parameter). This will re-assign the 16-bit Network Addresses on all nodes. The NJ parameter value on the Coordinator must be non-zero if the NR command is issued to allow at least one Router to join to it.

Resetting a Router

Upon reset (Power-up, FR (Software Reset) or NR (Network Reset)):

1. If a Router has joined a network and a reset occurs (FR or power-up), the Router will send a broadcast transmission to find its parent in order to re-establish its operating channel, PAN ID and 16-bit Network Address. If the Router cannot find its parent, it will rejoin the network using its SC (Scan Channels) and ID (PAN ID) settings. This could change the Router's 16-bit Network Address.
2. Issuing an NR (Network Reset) command with a parameter of '0' will also cause a Router reset. The NR command will force the Router to rejoin the network and it may receive a different 16-bit Network Address. It will also erase the Router's list of child device addresses. This option should be used with caution.
3. Issuing an NR (Network Reset) command with a parameter of '1' will send a command to the Coordinator instructing it to reset the entire network. Resetting the entire network will reset all nodes and reform the PAN (Also refer to the "Resetting a Coordinator" section).

3.2.4. Network Mapping

The ND (Node Discover) command is useful for mapping out the network. When issued from the Coordinator or an End Device, the command sends a broadcast message across the network and returns a list of all nodes. Refer to the ND command for more information.

3.3. XBee/XBee-PRO Addressing

Each RF module has a unique 64-bit Address that is assigned at the factory that can be read using the SH (Serial Number High) and SL (Serial Number Low) commands. When a module starts or joins a network, it receives a 16-bit Network Address that is unique within the network; however, this address can change (refer to the 'ZigBee Addressing' section). In addition, each module can store a string-identifier using the NI (Node Identifier) command.

XBee/XBee-PRO RF modules can be addressed using their 64-bit Address, their NI-string or both the 64-bit Address and the 16-bit Network Address (API Mode). Under the ZigBee protocol, the 16-bit Network Address of a Coordinator is always "0". Nodes can address the Coordinator using its 16-bit Network Address.

3.3.1. 64-bit Addressing

To send a packet to an RF module using its 64-bit Address (Transparent Mode)

Set the DH (Destination Address High) and DL (Destination Address Low) parameters of the source node to match the 64-bit Address (SH (Serial Number High) and SL (Serial Number Low) parameters) of the destination node.

To send a packet to an RF module using its 64-bit Address (API Mode)

Use the ZigBee Transmit Request API frame to set the DH (Destination Address High) and DL (Destination Address Low) parameters of the source node to match the 64-bit Address (SH (Serial Number High) and SL (Serial Number Low) parameters) of the destination node.
If the 64-bit Address of the destination node is not known, set 16-bit Destination Network Address to 0xFFFFE (refer to the 'API Addressing section below).

Since the ZigBee protocol relies on the 16-bit Network Address for routing, the 64-bit Address must be converted into a 16-bit Network Address prior to transmitting data. If a module does not know the 16-bit Network Address for a given 64-bit Address, it will transmit a broadcast Network Address Discovery command. The module with a matching 64-bit Address will transmit its 16-bit Network Address back.

The modules maintain a table that can store up to seven 64-bit Addresses and their corresponding 16-bit Network Addresses.

3.3.2. API Addressing

API Mode provides the ability to store and maintain 16-bit Network Address tables on an external processor. The 16-bit Network Address information is provided to the application through the following:

- The ZigBee Transmit Status Frame (contains the current 16-bit Network Address of the remote)
- The ND and DN commands (return 64-bit and 16-bit Network Addresses of remote nodes)

With this information, a table can be built in an application that maps a 64-bit Address to the corresponding 16-bit Network Address.

The ZigBee Transmit Request API frame specifies the 64-bit Address and the Network Address (if known) that the packet should be sent to. By supplying both addresses, the module will forego Network Address Discovery and immediately attempt to route the data packet to the remote. If the Network Address of a particular remote changes, Network Address and route discovery will take place to establish a new route to the correct node. Upon successful packet delivery, the TX Status Frame will indicate the correct Network Address of the remote.

Table 3-01. Sample table mapping 64-bit Addresses to 16-bit Network Addresses

Index	64-bit Address	16-bit Network Address
0	0013 4000 4000 0001	1234
1	0013 4000 4000 0002	5678
2	0013 4000 4000 01A0	A479
3	0013 4000 4000 0220	1F70

3.3.3. NI-String Addressing

To send a packet to an RF module using its NI-string (Transparent Mode)

Issue the DN (Destination Node) command using the NI (Node Identifier)-string of the destination node as the parameter.

To send a packet to an RF module using its NI-string (API Mode)

Issue the DN command as stated above using the AT Command API frame.

When the DN command is issued, a broadcast transmission is sent across the network to discover the module that has a matching NI (Node Identifier) parameter. If a module is discovered with a matching NI-string, the DH and DL parameters will be configured to address the destination node and the command will return both the 64-bit Address and the 16-bit Network Address of the discovered node. Data can be transmitted after the DN (Destination Node) command finishes.

3.3.4. Coordinator Addressing

A Coordinator can be addressed using its 64-bit address or NI string as described in the "NI-String Addressing" section. Alternatively, since the ZigBee Coordinator has a Network Address of "0", it can be addressed by its 16-bit Network Address.

To send a transmission to a Coordinator using its 16-bit Network Address:

Set the Destination Addresses of the transmitting module as shown below:
DL (Destination Low Address) = 0
DH (Destination High Address) = 0

3.3.5. Broadcast Addressing

Broadcast transmissions are sent using a 64-bit address of 0x0000FFFF. Any RF module in the PAN will accept a packet that contains a broadcast address. When configured to operate in Broadcast Mode, receiving modules do not send ACKs (Acknowledgements).

To send a broadcast packet to all modules

Set the Destination Addresses of the transmitting module as shown below:
DL (Destination Low Address) = 0x0000FFFF
DH (Destination High Address) = 0x00000000

NOTE: When programming the module, parameters are entered in hexadecimal notation (without the "0x" prefix). Leading zeros may be omitted.

Refer to the "Broadcast Transmissions" section [p13] for more information.

3.4. Modes of Operation

3.4.1. Idle Mode

When not receiving or transmitting data, the RF module is in Idle Mode. During Idle Mode, the RF module is also checking for valid RF data. The module shifts into the other modes of operation under the following conditions:

- Transmit Mode (Serial data in the DI Buffer is ready to be packetized)
- Receive Mode (Valid RF data is received through the antenna)
- Sleep Mode (End Devices only - not supported in this release)
- Command Mode (Command Mode Sequence is issued)

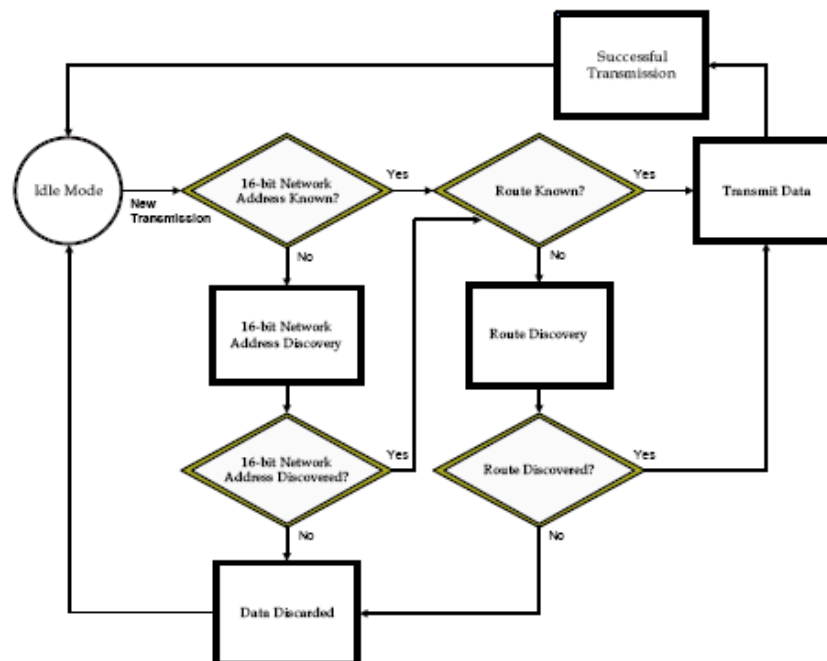
3.4.2. Transmit Mode

When serial data is received and is ready for packetization, the RF module will exit Idle Mode and attempt to transmit the data. The destination address determines which node(s) will receive the data.

Prior to transmitting the data, the module ensures that a 16-bit Network Address and route to the destination node have been established.

If the 16-bit Network Address is not known, Network Address Discovery will take place. If a route is not known, route discovery will take place for the purpose of establishing a route to the destination node. If a module with a matching Network Address is not discovered, the packet is discarded. The data will be transmitted once a route is established. If route discovery fails to establish a route, the packet will be discarded.

Figure 3-04. Transmit Mode Sequence



When data is transmitted from one node to another, a network-level acknowledgement is transmitted back across the established route to the source node. This acknowledgement packet indicates to the source node that the data packet was received by the destination node. If a network acknowledgement is not received, the source node will re-transmit the data.

3.4.3. Receive Mode

If a valid RF packet is received and its address matches the RF module's MY (16-bit Source Address) parameter, the data is transferred to the DO buffer.

3.4.4. Command Mode

To modify or read RF Module parameters, the module must first enter into Command Mode - a state in which incoming serial characters are interpreted as commands. Refer to the API Mode section [p29] for an alternate means of configuring modules.

AT Command Mode

To Enter AT Command Mode:

Send the 3-character command sequence "+++" and observe guard times before and after the command characters. [Refer to the "Default AT Command Mode Sequence" below.]

Default AT Command Mode Sequence (for transition to Command Mode):

- No characters sent for one second [GT (Guard Times) parameter = 0x3E8]
- Input three plus characters ("+++") within one second [CC (Command Sequence Character) parameter = 0x2B.]
- No characters sent for one second [GT (Guard Times) parameter = 0x3E8]

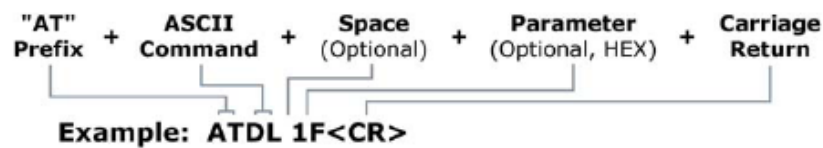
All of the parameter values in the sequence can be modified to reflect user preferences.

NOTE: Failure to enter AT Command Mode is most commonly due to baud rate mismatch. Ensure the 'Baud' setting on the "PC Settings" tab matches the interface data rate of the RF module. By default, the BD parameter = 3 (9600 bps).

To Send AT Commands:

Send AT commands and parameters using the syntax shown below.

Figure 3-05. Syntax for sending AT Commands



To read a parameter value stored in the RF module's register, omit the parameter field.

The preceding example would change the RF module Destination Address (Low) to "0x1F". To store the new value to non-volatile (long term) memory, subsequently send the WR (Write) command.

For modified parameter values to persist in the module's registry after a reset, changes must be saved to non-volatile memory using the WR (Write) Command. Otherwise, parameters are restored to previously saved values after the module is reset.

System Response. When a command is sent to the module, the module will parse and execute the command. Upon successful execution of a command, the module returns an "OK" message. If execution of a command results in an error, the module returns an "ERROR" message.

To Exit AT Command Mode:

1. Send the ATCN (Exit Command Mode) command (followed by a carriage return).
[OR]
2. If no valid AT Commands are received within the time specified by CT (Command Mode Timeout) Command, the RF module automatically returns to Idle Mode.

For an example of programming the RF module using AT Commands and descriptions of each configurable parameter, refer to the "RF Module Configuration" chapter [p24].

3.5. Network Startup Examples

Start the Coordinator

1. Determine the operating channels list using the SC (Scan Channels) command and the PAN ID to operate using the ID (PAN ID) command. The default SD (Scan Duration) parameter value should suffice. If these values are changed from the defaults, they must be written to non-volatile memory using the WR (Write) command.
2. The Associate LED, if enabled using the D5 (DIO5 Configuration) parameter, will start blinking 1x per second once the Coordinator has started.
If API is enabled (AP parameter > 0): The API Modem Status "Coordinator Started" is sent out the UART.
3. The AI (Association Indication) parameter will be 0 signifying a successful startup.
4. The MY (16-bit Source Address) attribute is 0 (the 16-bit Network Address of a ZigBee Coordinator).
5. After startup, the Coordinator will allow joining based on its NJ (Node Join Time) value.
6. It is recommended that the Coordinator be configured with an NI-String identifier. This NI-String identifier should be written to non-volatile memory using the WR (Write) command to be preserved through power-loss.

Adding a Child (Router)

1. Determine the operating channel list (SC) and the desired PAN ID to join (ID) (0xFFFF - join any Pan). The default SD parameter should suffice. If these values are changed from the defaults, they must be written to non-volatile memory using the WR (Write) command.
2. The Router, on power-up, will attempt to locate a parent to join according to its SC and ID parameters.
3. Once the Router has joined a parent, the Associate LED, if enabled (D5), will start blinking 2x per second. The ID and CH parameters will reflect the operating PAN ID and Channel. The MY parameter will reflect the 16-bit Network Address of the Router. The MP command returns the 16-bit Network Address of the Router's parent (node it joined to).
If API is enabled (AP parameter > 0): The API Modem Status "Joined" is sent out the UART.
4. If the Router is not joining as expected, the AI (Association Indication) parameter can be read to determine the cause of failure.
Verify the PAN contains a Coordinator or nearby joined Router that has matching Channel (SC, CH) and PAN ID (ID) settings and is allowing nodes to join to it (NJ parameter).
5. Once the Router has joined a PAN, the Router will allow joining based on the NJ parameter.
6. It is recommended that the Router be configured with a unique NI-String identifier. This NI-String identifier should be written to non-volatile memory using the WR (Write) command to be preserved through power-loss.

Transmit Data

1. Start a Coordinator (refer to instructions above).
2. Add one or more Child Router(s) to the Coordinator (refer to instructions above).
3. Once the Coordinator has started, all Routers and End Devices should join to a parent and their Associate LED should blink 2x per second.
4. If any nodes have not joined, read the AI command to determine why.
5. Issue the ATND command on the Coordinator to get a list of all nodes on the network.
6. Use the 'Terminal' tab of the X-CTU Software to send serial data between nodes. The data should be transmitted from the source to the destination node as specified by the DH & DL parameters.
7. (Optional) Change the Destination Address on any node to one of the 64-bit Addresses discovered using the ND command in step 5 (DH, DL Commands, or in the 'ZigBee Transmit Request' API Frame). Then repeat step 6 to transmit data.

4. RF Module Configuration

Two command mode protocols are supported by the XBee/XBee-PRO RF Modules: AT and API. The AT Command Mode protocol [p22] is printable and is intended for manual entry of commands and viewing parameter values. The API Command Mode protocol [p29] is a binary protocol and is intended for programmatic gets and sets of values.

Each command mode protocol requires its own firmware version. Refer to the VR (Firmware Version) command in the Diagnostics table to determine firmware versions.

4.1. AT Command Programming Examples

Refer to the 'X-CTU' section of the Development Guide [Appendix B] for more information regarding the X-CTU configuration software.

Setup

The programming examples in this section require the installation of MaxStream's X-CTU Software and a serial connection to a PC. (MaxStream stocks RS-232 and USB boards to facilitate interfacing with a PC.)

1. Install MaxStream's X-CTU Software to a PC by double-clicking the "setup_X-CTU.exe" file. (The file is located on the MaxStream CD and under the 'Software' section of the following web page: www.maxstream.net/support/downloads.php)
2. Mount the RF module to an interface board, then connect the module assembly to a PC.
3. Launch the X-CTU Software and select the 'PC Settings' tab. Verify the baud and parity settings of the Com Port match those of the RF module.

NOTE: Failure to enter AT Command Mode is most commonly due to baud rate mismatch. Ensure the 'Baud' setting on the 'PC Settings' tab matches the interface data rate of the RF module. By default, the BD parameter = 3 (which corresponds to 9600 bps).

Sample Configuration: Modify RF Module Destination Address

Example: Utilize the X-CTU "Terminal" tab to change the RF module's DL (Destination Address Low) parameter and save the new address to non-volatile memory.

After establishing a serial connection between the RF module and a PC [refer to the 'Setup' section above], select the "Terminal" tab of the X-CTU Software and enter the following command lines ('CR' stands for carriage return):

Method 1 (One line per command)

Send AT Command	System Response
+++	OK <CR> (Enter into Command Mode)
ATDL <Enter>	{current value} <CR> (Read Destination Address Low)
ATDL1A0D <Enter>	OK <CR> (Modify Destination Address Low)
ATWR <Enter>	OK <CR> (Write to non-volatile memory)
ATCN <Enter>	OK <CR> (Exit Command Mode)

Method 2 (Multiple commands on one line)

Send AT Command	System Response
+++	OK <CR> (Enter into Command Mode)
ATDL <Enter>	{current value} <CR> (Read Destination Address Low)
ATDL1A0D,WR,CN <Enter>	OK<CR> OK<CR> OK<CR>

Sample Configuration: Restore RF Module Defaults

Example: Utilize the X-CTU "Modem Configuration" tab to restore default parameter values. After establishing a connection between the module and a PC [refer to the 'Setup' section above], select the "Modem Configuration" tab of the X-CTU Software.

1. Select the 'Read' button.
2. Select the 'Restore' button.

4.2. Command Reference Tables

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

Special

Table 4-02. Special Commands

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

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

Networking & Security

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

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
CH	Networking (Addressing)	Operating Channel. Read the channel number used for transmitting and receiving between RF modules. Uses 802.15.4 channel numbers.	CRE	0, 0x0B-0x1A (XBee) 0, 0x0C-0x17 (XBee-PRO) [read-only]	0
ID	Networking (Addressing)	PAN ID. Set/Get the PAN (Personal Area Network) ID. <i>Coordinator</i> - Set the preferred Pan ID. Set (ID = 0xFFFF) to auto-select. <i>Router / End Device</i> - Set the desired Pan ID. When the device searches for a Coordinator, it attempts to only join to a parent that has a matching Pan ID. Set (ID = 0xFFFF) to join a parent operating on any Pan ID. Changes to ID should be written to non-volatile memory using the WR command. ID changes are not used until the module is reset (FR, NR or power-up).	CRE	0 - 0x3FFF, 0xFFFF	0x0123 (291d)
DH ²	Networking (Addressing)	Destination Address High. Set/Get the upper 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DL, it defines the destination address used for transmission. 0x000000000000FFFF is the broadcast address for the PAN. DH is not supported in API Mode. 0x0000000000000000 is the Coordinator's 16-bit Network Address.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF	0
DL ²	Networking (Addressing)	Destination Address Low. Set/Get the lower 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DH, DL defines the destination address used for transmission. 0x000000000000FFFF is the broadcast address for the PAN. DL is not supported in API Mode. 0x0000000000000000 is the Coordinator's 16-bit Network Address.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF	0xFFFF (Coordinator) 0 (Router/End Device)
MY	Networking (Addressing)	16-bit Network Address. Get the 16-bit Network Address of the module.	CRE	0 - 0xFFFE [read-only]	0xFFFE
MP	Networking (Addressing)	16-bit Parent Network Address. Get the 16-bit parent Network Address of the module.	RE	0 - 0xFFFE [read-only]	0xFFFE
SH	Networking (Addressing)	Serial Number High. Read high 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	factory-set
SL	Networking (Addressing)	Serial Number Low. Read low 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	factory-set
RN	Networking (Addressing)	Random Delay Slots. Set/Read the minimum value of the back-off exponent in the CSMA-CA algorithm (used for collision avoidance). If RN = 0, collision avoidance is disabled during the first iteration of the algorithm (802.15.4 - macMinBE).	CRE	0 - 3 [exponent]	3
NI	Networking (Identification)	Node Identifier. Stores a string identifier. The register only accepts printable ASCII data. In AT Command Mode, a string can not start with a space. A carriage return ends the command. Command will automatically end when maximum bytes for the string have been entered. This string is returned as part of the ND (Node Discovery) command. This identifier is also used with the DN (Destination Node) command.	CRE	20-Byte printable ASCII string	--

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

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
BH	Networking (Identification)	Broadcast Hops. Set/Read the maximum number of hops for each broadcast data transmission. Setting this to 0 will use the maximum number of hops.	CRE	0 - 7	
NT	Networking (Identification)	Node Discover Timeout. Set/Read the amount of time a node will spend discovering other nodes when ND or DN is issued.	CRE	0 - 0xFC [x 100 msec]	0x3C (60d)
ND	Networking (Identification)	Node Discover. Discovers and reports all RF modules found. The following information is reported for each module discovered. MY<CR> SH<CR> SL<CR> NI<CR> (Variable length) PARENT_NETWORK_ADDRESS (2 Bytes)<CR> DEVICE_TYPE<CR> (1 Byte: 0=Coord, 1=Router, 2=End Device) STATUS<CR> (1 Byte: Reserved) PROFILE_ID<CR> (2 Bytes) MANUFACTURER_ID<CR> (2 Bytes) <CR> After (NT * 100) milliseconds, the command ends by returning a <CR>. ND also accepts a Node Identifier (NI) as a parameter (optional). In this case, only a module that matches the supplied identifier will respond. If ND is sent through the API, each response is returned as a separate AT_CMD_Response packet. The data consists of the above listed bytes without the carriage return delimiters. The NI string will end in a "0x00" null character. Once the ND command has finished executing, the API will return one more AT_CMD_Response packet (with no data).	CE	optional 20-Byte NI or MY value	--
DN	Networking (Identification)	Destination Node. Resolves an NI (Node Identifier) string to a physical address (case-sensitive). The following events occur after the destination node is discovered: <AT Firmware> 1. DL & DH are set to the extended (64-bit) address of the module with the matching NI (Node Identifier) string. 2. OK (or ERROR) is returned. 3. Command Mode is exited to allow immediate communication <API Firmware> 1. The 16-bit network and 64-bit extended addresses are returned in an API Command Response frame. If there is no response from a module within (NT * 100) milliseconds or a parameter is not specified (left blank), the command is terminated and an "ERROR" message is returned. In the case of an ERROR, Command Mode is not exited.	CRE	up to 20-Byte printable ASCII string	--
SC	Networking (Joining)	Scan Channels. Set/Read the list of channels to scan. <i>Coordinator</i> - Bit field list of channels to choose from prior to starting network. <i>Router/End Device</i> - Bit field list of channels that will be scanned to find a Coordinator/Router to join. Changes to SC should be written using WR command. SC changes are not used until the module is reset (FR, NR or power-up). Bit (Channel): 0 (0x0B) 4 (0x0F) 8 (0x13) 12 (0x17) 1 (0x0C) 5 (0x10) 9 (0x14) 13 (0x18) 2 (0x0D) 6 (0x11) 10 (0x15) 14 (0x19) 3 (0x0E) 7 (0x12) 11 (0x16) 15 (0x1A)	CRE	1 - 0xFFFF[bitfield] (bits 0, 13, 14, 15 not allowed for XBee-PRO)	0x1FFE (All XBee-PRO channels)
SD	Networking (Joining)	Scan Duration. Set/Read the scan duration exponent. Changes to SD should be written using WR command. <i>Coordinator</i> - Duration of the Active and Energy Scans (on each channel) that are used to determine an acceptable channel and Pan ID for the Coordinator to startup on. <i>Router/End Device</i> - Duration of Active Scan (on each channel) used to locate an available Coordinator / Router to join during Association. Scan Time is measured as: (# Channels to Scan) * (2 ^ SD) * 15.36ms - The number of channels to scan is determined by the SC parameter. The XBee can scan up to 16 channels (SC = 0xFFFF) and the XBee-PRO can scan up to 12 channels (0x1FFE). Sample Scan Duration times (13 channel scan): If SD = 0, time = 0.200 sec SD = 2, time = 0.799 sec SD = 4, time = 3.190 sec SD = 6, time = 12.780 sec	CRE	0 - 7 [exponent]	3
NJ	Networking (Joining)	Node Join Time. Set/Read the time that a Coordinator/Router allows nodes to join. This value can be changed at run time without requiring a Coordinator or Router to restart. The time starts once the Coordinator or Router has started. The timer is reset on power-cycle or when NJ changes.	CR	0 - 0x40, 0xFF [x 1 sec]	0xFF (always allows joining)

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

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
AI	Networking (Joining)	Association Indication. Read information regarding last node join request: 0x00 - Successful completion - Coordinator started or Router/End Device found and joined with a parent. 0x21 - Scan found no PANs 0x22 - Scan found no valid PANs based on current SC and ID settings 0x23 - Valid Coordinator or Routers found, but they are not allowing joining (NJ expired) 0x24 - Router Full - Allow Join set, but cannot allow any more Routers to join 0x25 - Router Full - Allow Join set, but cannot allow any more End Devices to join 0x26 - Cannot join to a node because it was a child or descendent of this device 0x27 - Node Joining attempt failed 0x28 - Device is orphaned and is looking for its parent using Orphan Scans 0x29 - Router Start attempt failed 0x2A - Coordinator Start attempt failed 0xFF - Scanning for a Parent	CRE	0 - 0xFF [read-only]	-

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

RF Interfacing

Table 4-04. RF Interfacing Commands

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

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

Serial Interfacing (I/O)

Table 4-05. Serial Interfacing Commands

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

Table 4-05. Serial Interfacing Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
P0	Serial Interfacing	PWM0 Configuration. Select/Read function for PWM0.	CRE	0 - 1 0 = Disabled 1 = RSSI PWM	1
RP	Diagnostics	RSSI PWM Timer. Time RSSI signal will be output after last transmission. When RP = 0xFF, output will always be on.	CRE	0 - 0xFF [x 100 ms]	0x28 (40d)

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

Diagnostics

Table 4-06. Diagnostics Commands

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

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

AT Command Options

Table 4-07. AT Command Options Commands

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

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

4.3. API Operation

Non-API XBee/XBee-PRO RF Modules act as a serial line replacement (Transparent Operation) - all UART data received through the DI pin is queued up for RF transmission. When the module receives an RF packet, the data is sent out the DO pin with no additional information.

Inherent to Transparent Operation are the following behaviors:

- If module parameter registers are to be set or queried, a special operation is required for transitioning the module into Command Mode [refer to p22].
- In point-to-multipoint systems, the application must send extra information so that the receiving module(s) can distinguish between data coming from different remotes.

As an alternative to the default Transparent Operation, API (Application Programming Interface) Operations are available. API operation requires that communication with the module be done through a structured interface (data is communicated in frames in a defined order). The API specifies how commands, command responses and module status messages are sent and received from the module using a UART Data Frame.

4.3.1. API Frame Specifications

Two API modes are supported and both can be enabled using the AP (API Enable) command. Use the following AP parameter values to configure the module to operate in a particular mode:

- AP = 1: API Operation
- AP = 2: API Operation (with escaped characters)

API Operation (AP parameter = 1)

When this API mode is enabled (AP = 1), the UART data frame structure is defined as follows:

Figure 4-06. UART Data Frame Structure:



MSB = Most Significant Byte, LSB = Least Significant Byte

Any data received prior to the start delimiter is silently discarded. If the frame is not received correctly or if the checksum fails, the module will reply with a module status frame indicating the nature of the failure.

API Operation - with Escape Characters (AP parameter = 2)

When this API mode is enabled (AP = 2), the UART data frame structure is defined as follows:

Figure 4-07. UART Data Frame Structure - with escape control characters:



MSB = Most Significant Byte, LSB = Least Significant Byte

Escape characters. When sending or receiving a UART data frame, specific data values must be escaped (flagged) so they do not interfere with the data frame sequencing. To escape an interfering data byte, insert 0x7D and follow it with the byte to be escaped XOR'd with 0x20.

Data bytes that need to be escaped:

- 0x7E – Frame Delimiter
- 0x7D – Escape
- 0x11 – XON
- 0x13 – XOFF

Example - Raw UART Data Frame (before escaping interfering bytes):
0x7E 0x00 0x02 0x23 0x11 0xCB

0x11 needs to be escaped which results in the following frame:
0x7E 0x00 0x02 0x23 0x7D 0x31 0xCB

Note: In the above example, the length of the raw data (excluding the checksum) is 0x0002 and the checksum of the non-escaped data (excluding frame delimiter and length) is calculated as:
 $0xFF - (0x23 + 0x11) = (0xFF - 0x34) = 0xCB$.

Checksum

To test data integrity, a checksum is calculated and verified on non-escaped data.

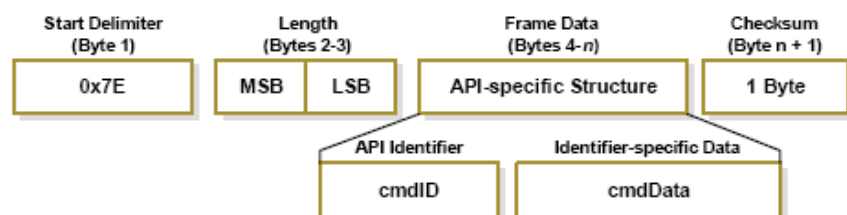
To calculate: Not including frame delimiters and length, add all bytes keeping only the lowest 8 bits of the result and subtract the result from 0xFF.

To verify: Add all bytes (include checksum, but not the delimiter and length). If the checksum is correct, the sum will equal 0xFF.

4.3.2. API Types

Frame data of the UART data frame forms an API-specific structure as follows:

Figure 4-08. UART Data Frame & API-specific Structure:



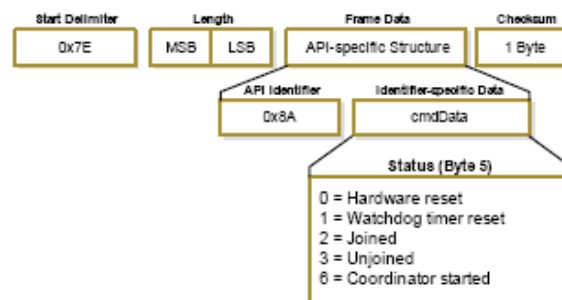
The cmdID frame (API-identifier) indicates which API messages will be contained in the cmdData frame (Identifier-specific data). Refer to the sections that follow for more information regarding the supported API types. Note that multi-byte values are sent big endian.

Modem Status

API Identifier: 0x8A

RF module status messages are sent from the module in response to specific conditions.

Figure 4-09. Modem Status Frames



AT Command

API Identifier Value: 0x08
 Allows for module parameter registers to be queried or set.

Figure 4-10. AT Command Frames

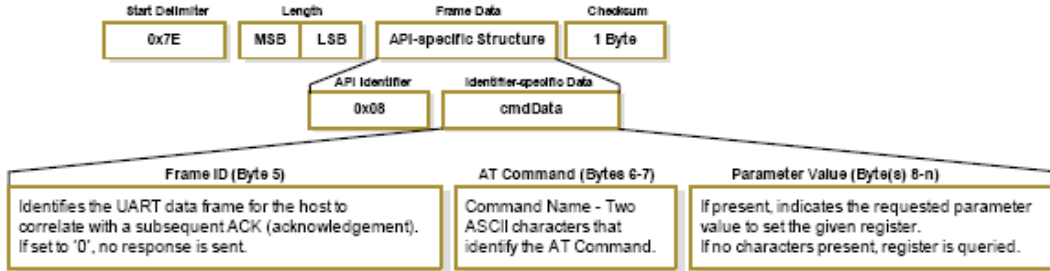


Figure 4-11. Example: API frames when reading the NJ parameter value of the module.

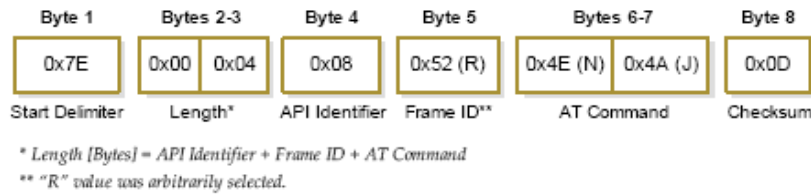
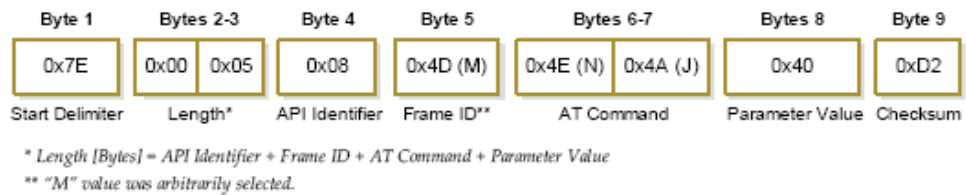


Figure 4-12. Example: API frames when modifying the NJ parameter value of the module.

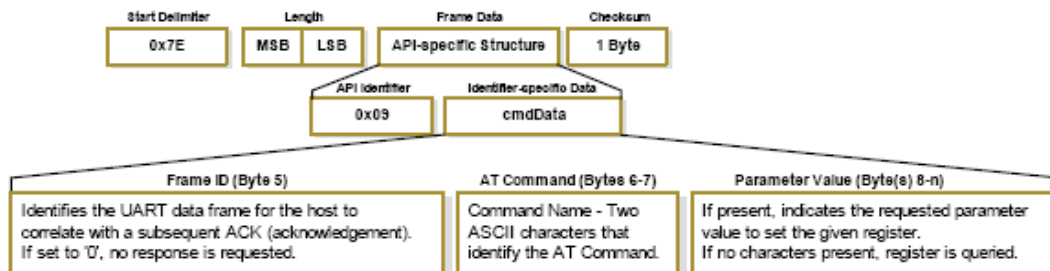


A string parameter used with the NI (Node Identifier), ND (Node Discover) and DH (Destination Address High) command is terminated with a 0x00 character.

AT Command - Queue Parameter Value

API Identifier Value: 0x09
 This API type allows module parameters to be queried or set. In contrast to the "AT Command" API type, new parameter values are queued and not applied until either the "AT Command" (0x08) API type or the AC (Apply Changes) command is issued. Register queries (reading parameter values) are returned immediately.

Figure 4-13. AT Command Frames
 (Note that frames are identical to the "AT Command" API type except for the API identifier.)

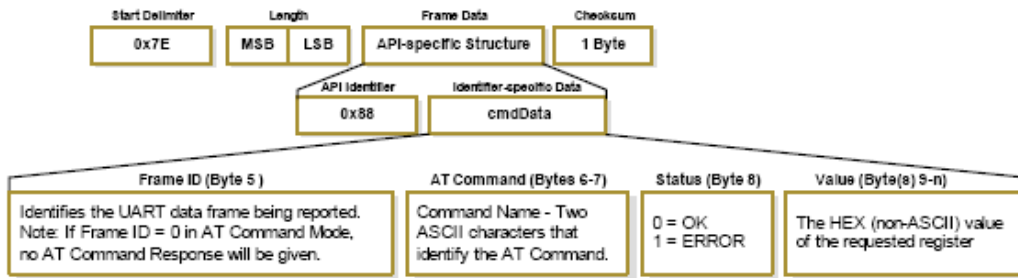


AT Command Response

API Identifier Value: 0x88
 Response to previous command.

In response to an AT Command message, the module will send an AT Command Response message. Some commands will send back multiple frames (for example, the ND (Node Discover) command). These commands will end by sending a frame with a status of ATCMD_OK and no cmdData.

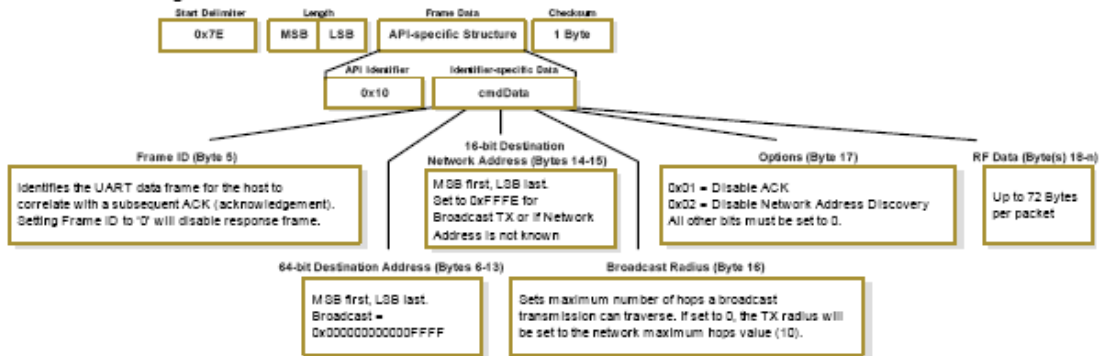
Figure 4-14. AT Command Response Frames.



ZigBee Transmit Request

API Identifier Value: 0x10
 A TX Request message will cause the module to send RF Data as an RF Packet.

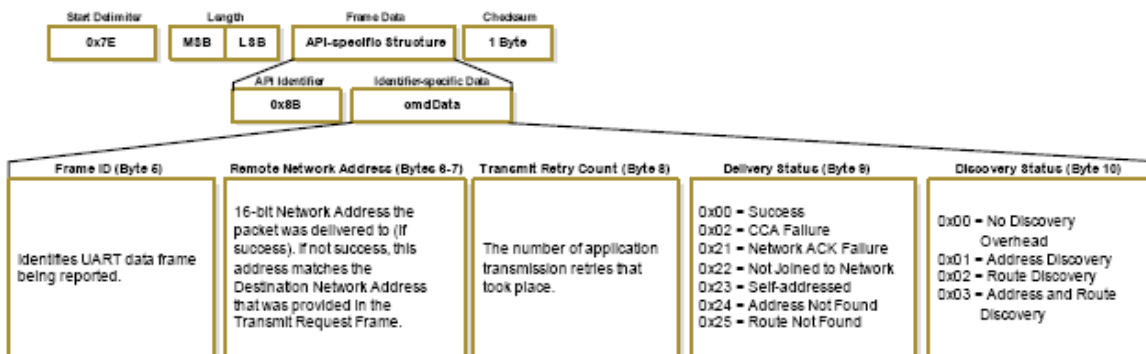
Figure 4-15. TX Packet Frames



ZigBee Transmit Status

API Identifier Value: 0x8B
 When a TX Request is completed, the module sends a TX Status message. This message will indicate if the packet was transmitted successfully or if there was a failure.

Figure 4-16. TX Status Frames

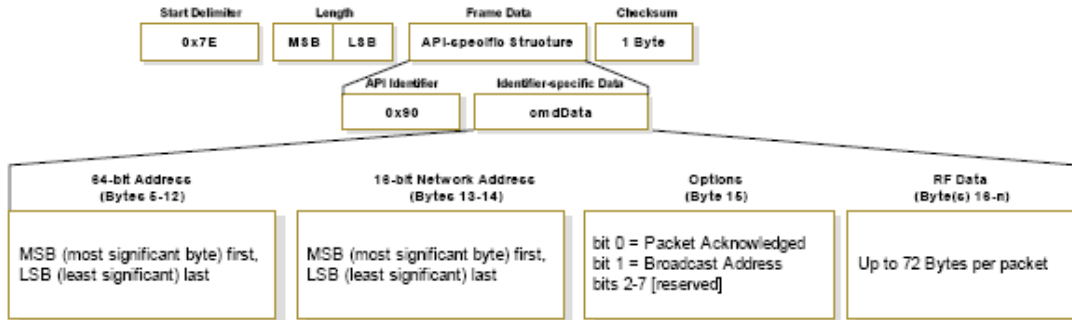


ZigBee Receive Packet

API Identifier Value: 0x90

When the module receives an RF packet, it is sent out the UART using this message type.

Figure 4-17. RX Packet Frames



Appendix A: Agency Certifications

FCC Certification

XBee/XBee-PRO RF Modules comply with Part 15 of the FCC rules and regulations. Compliance with the labeling requirements, FCC notices and antenna usage guidelines is required.

To fulfill FCC Certification requirements, the OEM must comply with the following regulations:

1. The system integrator must ensure that the text on the external label provided with this device is placed on the outside of the final product [Figure A-01].
2. XBee/XBee-PRO RF Modules may only be used with antennas that have been tested and approved for use with this module [refer to the antenna tables in this section].

OEM Labeling Requirements



WARNING: The Original Equipment Manufacturer (OEM) must ensure that FCC labeling requirements are met. This includes a clearly visible label on the outside of the final product enclosure that displays the contents shown in the figure below.

Figure A-01. Required FCC Label for OEM products containing the XBee/XBee-PRO RF Module

Contains FCC ID: OUR-XBEE/OUR-XBEEPRO*

The enclosed device complies with Part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions: (i) this device may not cause harmful interference and (ii) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

* The FCC ID for the XBee is "OUR-XBEE". The FCC ID for the XBee-PRO is "OUR-XBEEPRO".

FCC Notices

IMPORTANT: The XBee/XBee-PRO OEM RF Module has been certified by the FCC for use with other products without any further certification (as per FCC section 2.1091). Modifications not expressly approved by MaxStream could void the user's authority to operate the equipment.

IMPORTANT: OEMs must test final product to comply with unintentional radiators (FCC section 15.107 & 15.109) before declaring compliance of their final product to Part 15 of the FCC Rules.

IMPORTANT: The RF module has been certified for remote and base radio applications. If the module will be used for portable applications, the device must undergo SAR testing.

This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class B digital device, pursuant to Part 15 of the FCC Rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference in a residential installation. This equipment generates, uses and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instructions, may cause harmful interference to radio communications. However, there is no guarantee that interference will not occur in a particular installation.

If this equipment does cause harmful interference to radio or television reception, which can be determined by turning the equipment off and on, the user is encouraged to try to correct the interference by one or more of the following measures: Re-orient or relocate the receiving antenna, Increase the separation between the equipment and receiver, Connect equipment and receiver to outlets on different circuits, or Consult the dealer or an experienced radio/TV technician for help.

FCC-Approved Antennas (2.4 GHz)

XBee/XBee-PRO RF Modules can be installed using antennas and cables constructed with standard connectors (Type-N, SMA, TNC, etc.) if the installation is performed professionally and according to FCC guidelines. For installations not performed by a professional, non-standard connectors (RPSMA, RPTNC, etc) must be used.

The modules are FCC-approved for fixed base station and mobile applications on channels 0x0B - 0x1A (XBee) and 0x0C - 0x17 (XBee-PRO). If the antenna is mounted at least 20cm (8 in.) from nearby persons, the application is considered a mobile application. Antennas not listed in the table must be tested to comply with FCC Section 15.203 (Unique Antenna Connectors) and Section 15.247 (Emissions).

XBee OEM RF Modules (1 mW): XBee Modules have been tested and approved for use with all of the antennas listed in the tables below (Cable-loss IS NOT required).

XBee-PRO OEM RF Modules (60 mW): XBee-PRO Modules have been tested and approved for use with the antennas listed in the tables below (Cable-loss IS required when using antennas listed in Table A-02).

Table A-01. Antennas approved for use with the XBee/XBee-PRO RF Modules (Cable-loss is not required.)

Part Number	Type (Description)	Gain	Application*	Min. Separation
A24-RSM-450	Dipole (Half-wave articulated RPSMA - 4.5")	2.1 dBi	Fixed/Mobile	20 cm
A24-HABSM	Dipole (Articulated RPSMA)	2.1 dBi	Fixed	20 cm
A24-HABUF-P5I	Dipole (Half-wave articulated bulkhead mount U.F.L. w/ 5" pigtail)	2.1 dBi	Fixed	20 cm
A24-QI	Monopole (Integrated whip)	1.5 dBi	Fixed	20 cm

Table A-02. Antennas approved for use with the XBee/XBee-PRO RF Modules (Cable-loss is required)

Part Number	Type (Description)	Gain	Application*	Min. Separation	Required Cable-loss
A24-C1	Surface Mount	-1.5 dBi	Fixed/Mobile	20 cm	-
A24-Y4NF	Yagi (4-element)	6.0 dBi	Fixed	2 m	8.1 dB
A24-Y6NF	Yagi (6-element)	8.8 dBi	Fixed	2 m	10.9 dB
A24-Y7NF	Yagi (7-element)	9.0 dBi	Fixed	2 m	11.1 dB
A24-Y9NF	Yagi (9-element)	10.0 dBi	Fixed	2 m	12.1 dB
A24-Y10NF	Yagi (10-element)	11.0 dBi	Fixed	2 m	13.1 dB
A24-Y12NF	Yagi (12-element)	12.0 dBi	Fixed	2 m	14.1 dB
A24-Y13NF	Yagi (13-element)	12.0 dBi	Fixed	2 m	14.1 dB
A24-Y15NF	Yagi (15-element)	12.5 dBi	Fixed	2 m	14.6 dB
A24-Y16NF	Yagi (16-element)	13.5 dBi	Fixed	2 m	15.6 dB
A24-Y16RM	Yagi (16-element, RPSMA connector)	13.5 dBi	Fixed	2 m	15.6 dB
A24-Y18NF	Yagi (18-element)	15.0 dBi	Fixed	2 m	17.1 dB
A24-F2NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	2.1 dBi	Fixed/Mobile	20 cm	4.2 dB
A24-F3NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	3.0 dBi	Fixed/Mobile	20 cm	5.1 dB
A24-F5NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	5.0 dBi	Fixed/Mobile	20 cm	7.1 dB
A24-F6NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	8.0 dBi	Fixed	2 m	10.1 dB
A24-F9NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	9.5 dBi	Fixed	2 m	11.6 dB
A24-F10NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	10.0 dBi	Fixed	2 m	12.1 dB
A24-F12NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	12.0 dBi	Fixed	2 m	14.1 dB
A24-F15NF	Omni-directional (Fiberglass base station)	15.0 dBi	Fixed	2 m	17.1 dB
A24-W7NF	Omni-directional (Base station)	7.2 dBi	Fixed	2 m	9.3 dB
A24-M7NF	Omni-directional (Mag-mount base station)	7.2 dBi	Fixed	2 m	9.3 dB
A24-P8SF	Flat Panel	8.5 dBi	Fixed	2 m	8.6 dB
A24-P8NF	Flat Panel	8.5 dBi	Fixed	2 m	8.6 dB
A24-P13NF	Flat Panel	13.0 dBi	Fixed	2 m	13.1 dB
A24-P14NF	Flat Panel	14.0 dBi	Fixed	2 m	14.1 dB
A24-P15NF	Flat Panel	15.0 dBi	Fixed	2 m	15.1 dB
A24-P16NF	Flat Panel	16.0 dBi	Fixed	2 m	16.1 dB
A24-P19NF	Flat Panel	19.0 dBi	Fixed	2 m	19.1 dB

* If using the RF module in a portable application (For example - If the module is used in a handheld device and the antenna is less than 20cm from the human body when the device is operation): The integrator is responsible for passing additional SAR (Specific Absorption Rate) testing based on FCC rules 2.1091 and FCC Guidelines for Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, OET Bulletin and Supplement C. The testing results will be submitted to the FCC for approval prior to selling the integrated unit. The required SAR testing measures emissions from the module and how they affect the person.

RF Exposure



WARNING: To satisfy FCC RF exposure requirements for mobile transmitting devices, a separation distance of 20 cm or more should be maintained between the antenna of this device and persons during device operation. To ensure compliance, operations at closer than this distance is not recommended. The antenna used for this transmitter must not be co-located in conjunction with any other antenna or transmitter.

The preceding statement must be included as a CAUTION statement in OEM product manuals in order to alert users of FCC RF Exposure compliance.

European Certification

The XBee/XBee-PRO RF Module has been certified for use in several European countries. For a complete list, refer to www.maxstream.net.

If the XBee/XBee-PRO RF Modules are incorporated into a product, the manufacturer must ensure compliance of the final product to the European harmonized EMC and low-voltage/safety standards. A Declaration of Conformity must be issued for each of these standards and kept on file as described in Annex II of the R&TTE Directive.

Furthermore, the manufacturer must maintain a copy of the XBee/XBee-PRO user manual documentation and ensure the final product does not exceed the specified power ratings, antenna specifications, and/or installation requirements as specified in the user manual. If any of these specifications are exceeded in the final product, a submission must be made to a notified body for compliance testing to all required standards.

OEM Labeling Requirements

The 'CE' marking must be affixed to a visible location on the OEM product.

Figure A-02. CE Labeling Requirements



The CE mark shall consist of the initials "CE" taking the following form:

- If the CE marking is reduced or enlarged, the proportions given in the above graduated drawing must be respected.
- The CE marking must have a height of at least 5mm except where this is not possible on account of the nature of the apparatus.
- The CE marking must be affixed visibly, legibly, and indelibly.

Restrictions

Power Output: The power output of the XBee-PRO RF Modules must not exceed 10 dBm. The power level is set using the PL command and the PL parameter must equal "0" (10 dBm).

France: France imposes restrictions on the 2.4 GHz band. Go to www.art-telecom.fr or contact MaxStream for more information.

Norway: Norway prohibits operation near Ny-Alesund in Svalbard. More information can be found at the Norway Posts and Telecommunications site (www.npt.no).

Declarations of Conformity

MaxStream has issued Declarations of Conformity for the XBee/XBee-PRO RF Modules concerning emissions, EMC and safety. Files are located in the 'documentation' folder of the MaxStream CD.

Important Note

MaxStream does not list the entire set of standards that must be met for each country. MaxStream customers assume full responsibility for learning and meeting the required guidelines for each country in their distribution market. For more information relating to European compliance of an OEM product incorporating the XBee/XBee-PRO RF Module, contact MaxStream, or refer to the following web sites:

CEPT ERC 70-03E - Technical Requirements, European restrictions and general requirements: Available at www.ero.dk/.

R&TTE Directive - Equipment requirements, placement on market: Available at www.ero.dk/.

Appendix B: Development Guide

Migrating from the 802.15.4 Protocol

The following are some of the differences in the ZigBee firmware assuming familiarity with the 802.15.4 application:

- ZigBee Command Set
- Address Assignment
- API / AT Firmware Versions

Also, refer to the "Getting Started" section [p23] for more information.

ZigBee Command Set

Modified Commands

- CH - Read Only command that displays the operating channel that was selected from SC.
- MY - Read Only command that displays the assigned 16-bit Network Address of the device.
- AI - ZigBee definitions added to this command. See documentation.
- A1, A2 and CE commands are not supported.

New Commands

- NJ (Node Join Time) - This value determines how long a Coordinator or Router will allow other devices to join to it. This command is supported on Coordinators & Routers only.
- MP (16-bit Parent Network Address). This value represents the 16-bit parent Network Address of the module.
- BH (Broadcast Hops). This value sets the maximum number of hops for each broadcast data transmission. Setting this to 0 will use the maximum number of hops.

API / AT Firmware Versions

The 802.15.4 firmware supports the AP command for setting the module into No API (AP=0), API without escaping (AP=1), or API with escaping (AP=2) modes. The first digit in the 802.15.4 firmware versions is a '1'.

The ZigBee firmware comes in different versions to support the API interface (AP 1, 2 modes) or the AT command set (AP 0 mode). The first digit in the ZigBee firmware versions is an '8'.

The following is a list of firmware versions:

- 8.0xx - Coordinator, AT Command support (Transparent Mode)
- 8.1xx - Coordinator, API support (AP 1, 2)
- 8.2xx - Router, AT Command support (Transparent Mode)
- 8.3xx - Router, API support (AP 1, 2)
- 8.4xx - End Device, AT Command support (Transparent Mode)
- 8.5xx - End Device, API support (AP 1, 2)

XBee/XBee-PRO Development Kits

The XBee Professional Development Kit includes the hardware and software needed to rapidly create long range wireless data links between nodes (XBee and XBee-PRO Starter Kits that contain fewer modules and accessories are also available).

Table B-01. Items Included in the Development Kit

Item	Qty.	Description	Part #
XBee-PRO Module	2	(1) OEM RF Module w/ U.FL antenna connector (1) OEM RF Module w/ attached wire antenna	XBP24-AUI-002 XBP24-AWI-002
XBee Module	3	(1) OEM RF Module w/ U.FL antenna connector (1) OEM RF Module w/ attached whip antenna (1) OEM RF Module w/ chip antenna	XB24-AUI-002 XB24-AWI-002 XB24-ACI-002
RS-232 Development Board	4	Board for interfacing between modules and RS-232 nodes (Converts signal levels, displays diagnostic info, & more)	XBIB-R
USB Development Board	1	Board for interfacing between modules & USB nodes (Converts signal levels, displays diagnostic info, & more)	XBIB-U
RS-232 Cable (6', straight-through)	1	Cable for connecting RS-232 interface board with DTE nodes (nodes that have a male serial DB-9 port - such as most PCs)	JD2D3-CDS-6F
USB Cable (6')	1	Cable for connecting USB interface board to USB nodes	JU1U2-CSB-6F
Serial Loopback Adapter	1	[Red] Adapter for configuring the module assembly (module + RS-232 interface board) to function as a repeater for range testing	JD2D3-CDL-A
NULL Modem Adapter (male-to-male)	1	[Black] Adapter for connecting the module assembly (module + RS-232 interface board) to other DCE (female DB-9) nodes	JD2D2-CDN-A
NULL Modem Adapter (female-to-female)	1	[Gray] Adapter for connecting serial nodes. It allows users to bypass the radios to verify serial cabling is functioning properly.	JD3D3-CDN-A
Power Adapter (9VDC, 1 A)	1	Adapter for powering the RS-232 development board	JP5P2-9V11-6F
Battery Clip (9V)	1	Clip for remotely powering the RS-232 board w/ a 9V battery	JP2P3-C2C-4I
RPSMA Antenna	2	RPSMA half-wave dipole antenna (2.4 GHz, 2.1 dB)	A24-HASM-450
RF Cable Assembly	2	Adapter for connecting RPSMA antenna to U.FL connector	JF1R6-CR3-4I
CD	1	Documentation and Software	MD0030
Quick Start Guide	1	Step-by-step instruction on how to create wireless links & test range capabilities of the modules	MD0026

Interfacing Options

The development kit includes RS-232 and USB interface boards. The boards provide a connection to PC ports and therefore give access to the RF module registries. Parameters stored in the registry allow OEMs and integrators to customize the modules to suite the needs of their data radio systems.

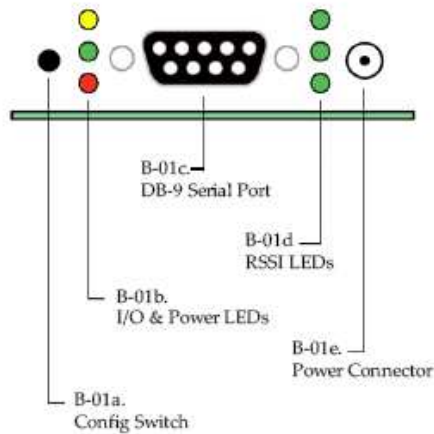
The following sections illustrate how to use the interface boards for development purposes. The MaxStream Interface board provides means for connecting the module to any node that has an available RS-232 or USB connector. Since the module requires signals to enter at TTL voltages, one of the main functions of the interface board is to convert signals between TTL levels and RS-232 and USB levels.

Note: In the following sections, an OEM RF Module mounted to an interface board will be referred to as a "Module Assembly".

RS-232 Development Board

External Interface

Figure B-01. Front View



B-01a. Reset Switch

The Reset Switch is used to reset (re-boot) the RF module. This switch only applies when using the configuration tabs of MaxStream's X-CTU Software.

B-01b. I/O & Power LEDs

LEDs indicate RF module activity as follows:

- Yellow (top LED) = Serial Data Out (to host)
- Green (middle) = Serial Data In (from host)
- Red (bottom) = Power/Association Indicator (Refer to the D5 (DIOS Configuration) parameter)



B-01c. Serial Port

Standard female DB-9 (RS-232) connector.

B-01d. RSSI LEDs

RSSI LEDs indicate the amount of fade margin present in an active wireless link. Fade margin is defined as the difference between the incoming signal strength and the module's receiver sensitivity.

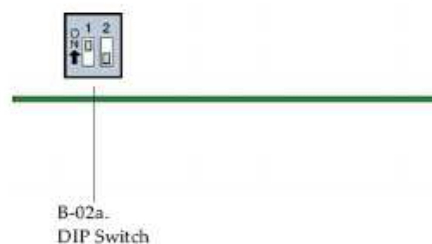
- 3 LEDs ON = Very Strong Signal (> 30 dB fade margin)
- 2 LEDs ON = Strong Signal (> 20 dB fade margin)
- 1 LED ON = Moderate Signal (> 10 dB fade margin)
- 0 LED ON = Weak Signal (< 10 dB fade margin)

B-01e. Power Connector

5-14 VDC power connector.

B-02a. DIP Switch

Figure B-02. Back View



DIP Switch functions are not supported in this release. Future downloadable firmware versions will support DIP Switch configurations.

RS-232 Pin Signals

Figure B-03. Pins used on the female RS-232 (DB-9) Serial Connector

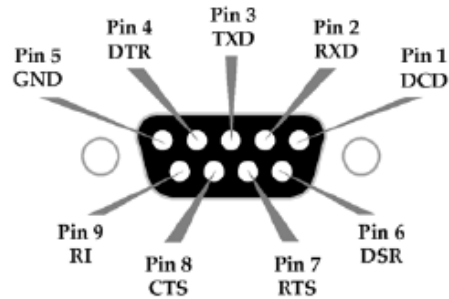


Table B-02. Pin Assignments and Implementations

DB-9 Pin	RS-232 Name	Description	Implementation*
1	DCD	Data-Carrier-Detect	Connected to DSR (pin6)
2	RXD	Receive Data	Serial data exiting the module assembly (to host)
3	TXD	Transmit Data	Serial data entering into the module assembly (from host)
4	DTR	Data-Terminal-Ready	Can enable Power-Down on the module assembly
5	GND	Ground Signal	Ground
6	DSR	Data-Set-Ready	Connected to DCD (pin1)
7	$\overline{\text{RTS}} / \text{CMD}$	Request-to-Send / Command Mode	Provides $\overline{\text{RTS}}$ flow control or enables Command Mode
8	$\overline{\text{CTS}}$	Clear-to-Send	Provides $\overline{\text{CTS}}$ flow control
9	RI	Ring Indicator	Optional power input that is connected internally to the positive lead of the front power connector

* Functions listed in the implementation column may not be available at the time of release.

Wiring Diagrams

Figure B-04. DTE node (RS-232, male DB-9 connector) wired to a DCE Module Assembly (female DB-9)

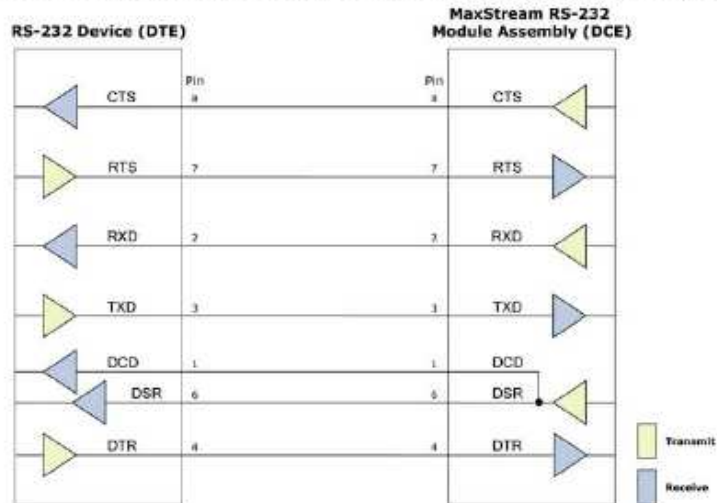
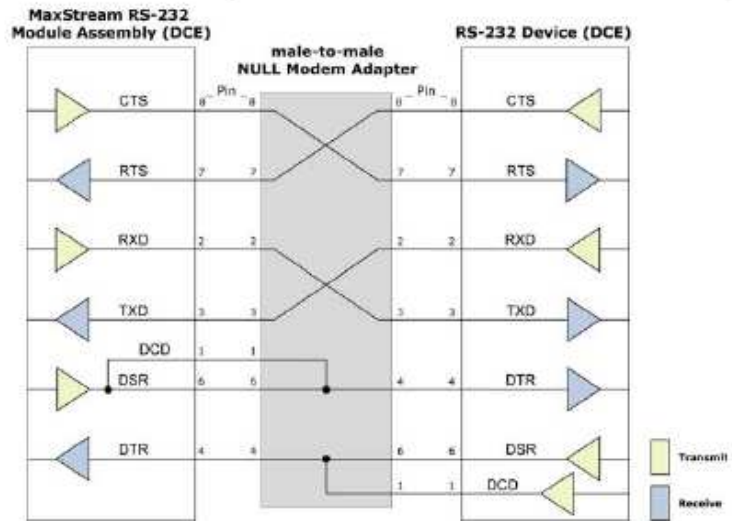
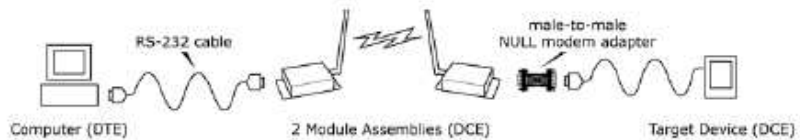


Figure B-05. DCE Module Assembly (female DB-9 connector) wired to a DCE node (RS-232, male DB-9)



Sample Wireless Connection: DTE <--> DCE <--> DCE <--> DCE

Figure B-06. Typical wireless link between DTE and DCE nodes



Adapters

The development kit includes several adapters that support the following functions:

- Performing Range Tests
- Testing Cables
- Connecting to other RS-232 DCE and DTE nodes
- Connecting to terminal blocks or RJ-45 (for RS-485/422 nodes)

NULL Modem Adapter (male-to-male)

Part Number: JD2D2-CDN-A (Black, DB-9 M-M) The male-to-male NULL modem adapter is used to connect two DCE nodes. A DCE node connects with a straight-through cable to the male serial port of a computer (DTE).

Figure B-07. Male NULL modem adapter and pinouts

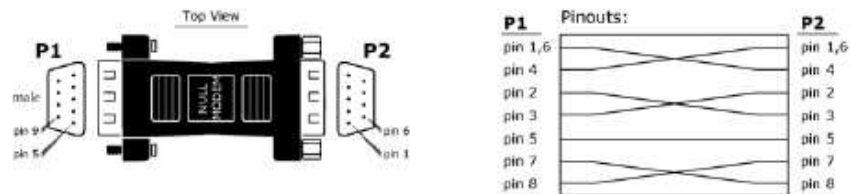
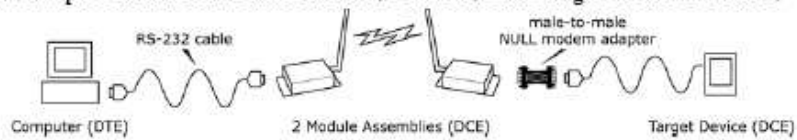


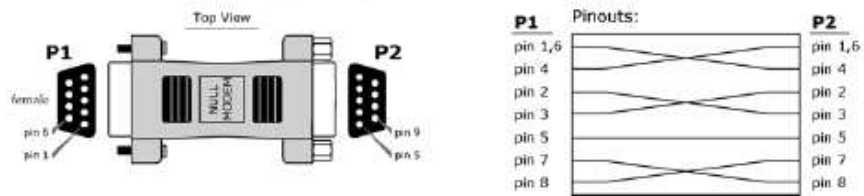
Figure B-08. Example of a MaxStream Radio Modem (DCE node) connecting to another DCE node



NULL Modem Adapter (female-to-female)

Part Number: JD3D3-CDN-A (Gray, DB-9 F-F) The female-to-female NULL modem adapter is used to verify serial cabling is functioning properly. To test cables, insert the female-to-female NULL modem adapter in place of a pair of module assemblies (RS-232 interface board + XTend Module) and test the connection without the modules in the connection.

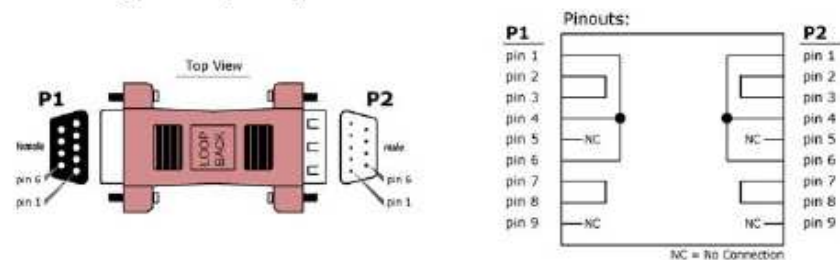
Figure B-09. Female NULL modem adapter and pinouts



Serial Loopback Adapter

Part Number: JD2D3-CDL-A (Red, DB-9 M-F) The serial loopback adapter is used for range testing. During a range test, the serial loopback adapter configures the module to function as a repeater by looping serial data back into the radio for retransmission.

Figure B-10. Serial loopback adapter and pinouts

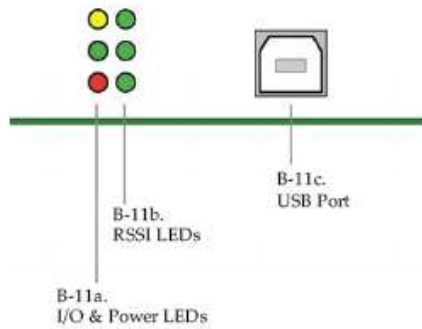


USB Development Board

External Interface

B-11a. I/O & Power LEDs

Figure B-11. Front View



LEDs indicate RF module activity as follows:

- Yellow (top LED) = Serial Data Out (to host)
- Green (middle) = Serial Data In (from host)
- Red (bottom) = Power/Association Indicator (Refer to the D5 (DIO5 Configuration) parameter)



B-11b. RSSI LEDs

RSSI LEDs indicate the amount of fade margin present in an active wireless link. Fade margin is defined as the difference between the incoming signal strength and the module's receiver sensitivity.

- 3 LEDs ON = Very Strong Signal (> 30 dB fade margin)
- 2 LEDs ON = Strong Signal (> 20 dB fade margin)
- 1 LED ON = Moderate Signal (> 10 dB fade margin)
- 0 LED ON = Weak Signal (< 10 dB fade margin)

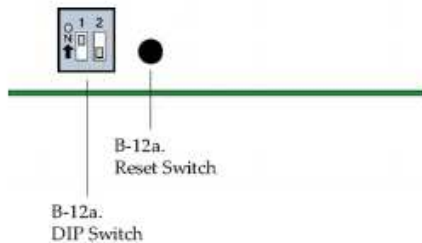
B-11c. USB Port

Standard Type-B OEM connector is used to communicate with OEM host and power the RF module.

B-12a. DIP Switch

DIP Switch functions are not supported in this release. Future downloadable firmware versions will support the DIP Switch configurations.

Figure B-12. Back View



B-12b. Reset Switch

The Reset Switch is used to reset (re-boot) the RF module.

USB Pin Signals

Table B-03. USB signals and their implementations on the XBee/XBee-PRO RF Module

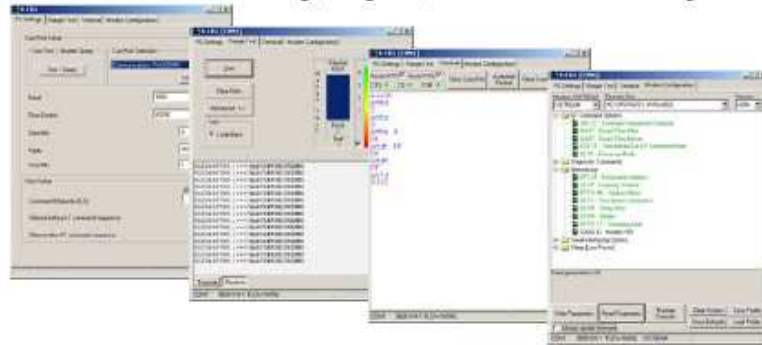
Pin	Name	Description	Implementation
1	VBUS	Power	Power the RF module
2	D-	Transmitted & Received Data	Transmit data to and from the RF module
3	D+	Transmitted & Received Data	Transmit data to and from the RF module
4	GND	Ground Signal	Ground

X-CTU Software

X-CTU is a MaxStream-provided software program used to interface with and configure Max-Stream RF Modules. The software application is organized into the following four tabs:

- PC Settings tab - Setup PC serial ports for interfacing with an RF module
- Range Test tab - Test the RF module's range and monitor packets sent and received
- Terminal tab - Set and read RF module parameters using AT Commands
- Modem Configuration tab - Set and read RF module parameters

Figure B-13. X-CTU User Interface (PC Settings, Range Test, Terminal and Modem Configuration tabs)



NOTE: PC Setting values are visible at the bottom of the Range Test, Terminal and Modem Configuration tabs. A shortcut for editing PC Setting values is available by clicking on any of the values.

Install

Double-click the "setup_X-CTU.exe" file and follow prompts of the installation screens. This file is located in the 'software' folder of the MaxStream CD and also under the 'Downloads' section of the following web page: www.maxstream.net/support/downloads.php

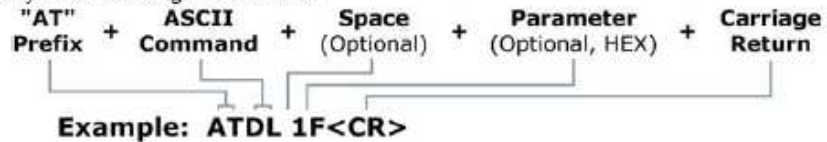
Setup

To use the X-CTU software, a module assembly (An RF module mounted to an interface Board) must be connected to a serial port of a PC. The interface data rate and parity settings of the serial port ("PC Settings" tab) must match those of the module (BD (Baud Rate) and NB (Parity) parameters).

Serial Communications Software

A terminal program is built into the X-CTU Software. Other terminal programs such as "HyperTerminal" can also be used. When issuing AT Commands through a terminal program interface, use the following syntax:

Figure B-14. Syntax for sending AT Commands



NOTE: To read a parameter value stored in a register, leave the parameter field blank.

The example above issues the DL (Destination Address Low) command to change destination address of the module to "0x1F". To save the new value to the module's non-volatile memory, issue WR (Write) command after modifying parameters.

Appendix C: Additional Information

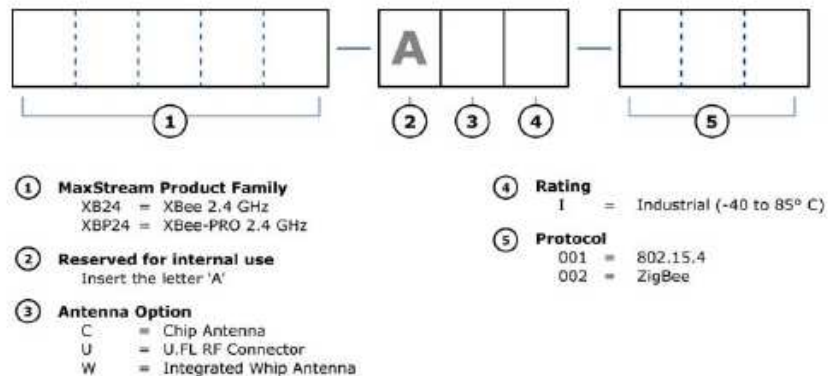
1-Year Warranty

XBee/XBee-PRO RF Modules from MaxStream, Inc. (the "Product") are warranted against defects in materials and workmanship under normal use, for a period of 1-year from the date of purchase. In the event of a product failure due to materials or workmanship, MaxStream will repair or replace the defective product. For warranty service, return the defective product to MaxStream, shipping prepaid, for prompt repair or replacement.

The foregoing sets forth the full extent of MaxStream's warranties regarding the Product. Repair or replacement at MaxStream's option is the exclusive remedy. THIS WARRANTY IS GIVEN IN LIEU OF ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, AND MAXSTREAM SPECIFICALLY DISCLAIMS ALL WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. IN NO EVENT SHALL MAXSTREAM, ITS SUPPLIERS OR LICENSORS BE LIABLE FOR DAMAGES IN EXCESS OF THE PURCHASE PRICE OF THE PRODUCT, FOR ANY LOSS OF USE, LOSS OF TIME, INCONVENIENCE, COMMERCIAL LOSS, LOST PROFITS OR SAVINGS, OR OTHER INCIDENTAL, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF THE USE OR INABILITY TO USE THE PRODUCT, TO THE FULL EXTENT SUCH MAY BE DISCLAIMED BY LAW. SOME STATES DO NOT ALLOW THE EXCLUSION OR LIMITATION OF INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES. THEREFORE, THE FOREGOING EXCLUSIONS MAY NOT APPLY IN ALL CASES. This warranty provides specific legal rights. Other rights which vary from state to state may also apply.

Ordering Information

Figure C-01. Divisions of the XBee/XBee-PRO RF Module Part Numbers



For example:

XP24-AWI-002 = XBee-PRO OEM RF Module, 2.4 GHz, integrated whip antenna, Industrial temperature rating, ZigBee protocol

Contact MaxStream

Free and unlimited technical support is included with every MaxStream Radio Modem sold. For the best in wireless data solutions and support, please use the following resources:

Documentation:	www.maxstream.net/support/downloads.php	
Technical Support:	Phone.	(866) 765-9885 toll-free U.S.A. & Canada (801) 765-9885 Worldwide
	Live Chat.	www.maxstream.net
	E-Mail.	rf-xperts@maxstream.net

MaxStream office hours are 8:00 am - 5:00 pm [U.S. Mountain Standard Time]

ANEXO 2

MANUAL DEL SOFTWARE X-CTU

X-CTU

Configuration & Test Utility Software

User's Guide

Contents

Introduction	2
PC Settings Tab	3
COM port setup:	3
Host Setup:	4
User COM ports:	4
Range Test Tab	4
Packet Data and Size	4
RSSI:	6
API Function:	6
The Terminal Tab	7
The main terminal window	7
Assemble Packet	8
Modem Configuration tab	9
Reading the Radios firmware	9
Making changes to the radios firmware	9
Writing firmware to the radio	10
Downloading updated firmware files	11
Modem Profiles	12



Technical Support:

Online support: <http://www.digi.com/support/eservice/login.jsp>

Phone: (801) 765-9885

90001003_A
2008.08.20

Introduction

This User's Guide is intended to discuss the functions of Digi's X-CTU software utility. Each function will be discussed in detail allowing a better understanding of the program and how it can be used.

X-CTU is a Windows-based application provided by Digi. This program was designed to interact with the firmware files found on Digi's RF products and to provide a simple-to-use graphical user interface to them.

X-CTU is designed to function with all Windows-based computers running Microsoft Windows 98 SE and above. X-CTU can either be downloaded from Digi's Web site or an installation CD. When properly installed it can be launched by clicking on the icon on the PC desktop (see Figure 1) or selecting from the Start menu (see Figure 2).



Figure 1

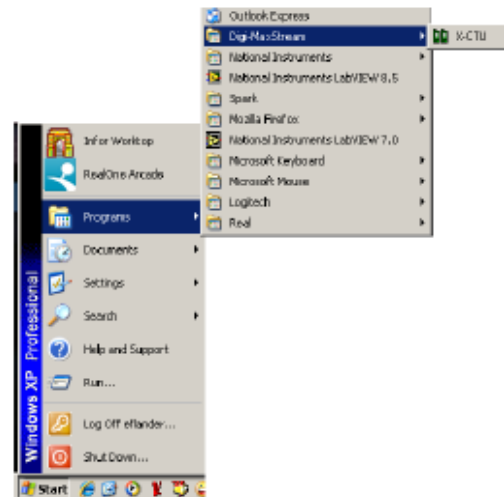


Figure 2

When launched, you will see four tabs across the top of the program (see Figure 3). Each of these tabs has a different function. The four tabs are:

PC Settings: Allows a customer to select the desired COM port and configure that port to fit the radios settings.

Range Test: Allows a customer to perform a range test between two radios.

Terminal: Allows access to the computers COM port with a terminal emulation program. This tab also allows the ability to access the radios' firmware using AT commands (for a complete listing of the radios' AT commands, please see the product manuals available online).

Modem Configuration: Allows the ability to program the radios' firmware settings via a graphical user interface. This tab also allows customers the ability to change firmware versions.



Figure 3

PC Settings Tab

When the program is launched, the default tab selected is the "PC Settings" tab. The PC Setting tab is broken down into three basic areas: The COM port setup, the Host Setup, and the User Com ports.

COM port setup:

The PC settings tab allows the user to select a COM port and configure the selected COM port settings when accessing the port. Some of these settings include:

Baud Rate:	Both standard and non-standard
Flow Control:	Hardware, Software (Xon/Xoff), None
Data bits:	4, 5, 6, 7, and 8 data bits
Parity:	None, Odd, Even, Mark and Space
Stop bit:	1, 1.5, and 2

To change any of the above settings, select the pull down menu on the left of the value and select the desired setting. To enter a non-standard baud rate, type the baud rate into the baud rate box to the left.

The **Test / Query** button is used to test the selected COM port and PC settings. If the settings and COM port are correct, you will receive a response similar to the one depicted in Figure 4 below.

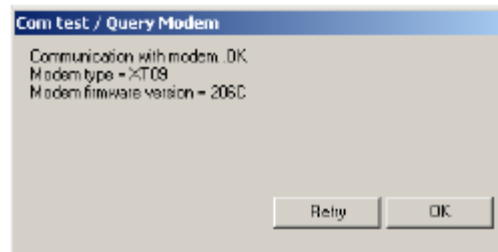


Figure 4

Host Setup:

The Host Setup tab allows the user to configure how the X-CTU program is to interface with a radio's firmware. This includes determining whether API or AT command mode will be used to access the module's firmware as well as the proper command mode character and sequence.

By default, the Host Settings are as follows:

API mode:	not enabled (Not checked)
Command mode Character:	+ (ASCII) 2B (Hex).
Before Guard Time:	1000 (1 Sec)
After Guard Time:	1000 (1 Sec)

This is the default value of our radios. If this is not the value of the AT, BT, or GT commands of the connected radio, enter the respective value here.

User COM ports:

The user COM port option allows the user to "Add" or "Delete" a user-created COM port. This is only for temporary use. Once the program has closed, the user-created COM port will disappear and is no longer accessible to the program.

Range Test Tab

The range test tab is designed to verify the range of the radio link by sending a user-specified data packet and verifying the response packet is the same, within the time specified. For performing a standard range test, please follow the steps found in most Quick Start or Getting Started Guides that ship with the product.

Packet Data and Size

By default, the size of the data packet sent is 32 bytes. This data packet specified can be adjusted in either size or the text sent.

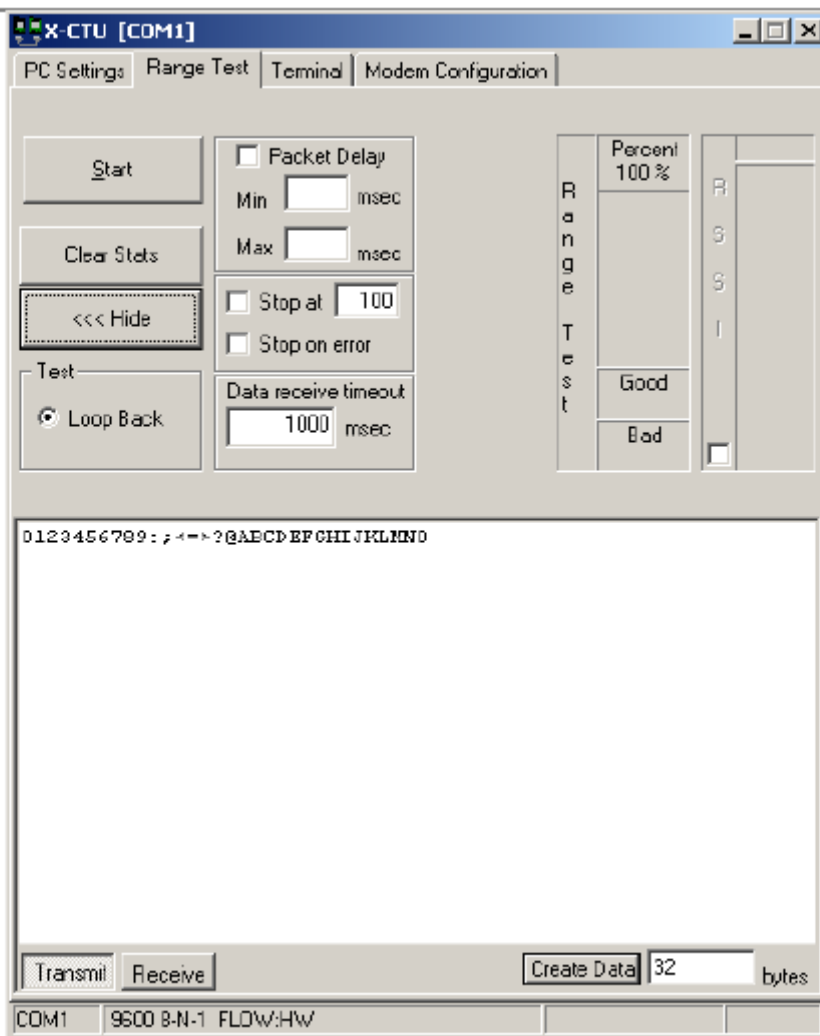


Figure 5

To modify the size of the packet sent, change the value next to the "Create Data" box and click on the "Create Data" button (see Figure 5). If you want to change the data sent, delete the text in the transmit window and place in your desired text.

By modifying the text, data packet size, packet delay and the data receive timeout; the user is able to simulate a wide range of scenarios.

RSSI:

The RSSI option of the X-CTU allows the user to see the RSSI (Received Signal Strength Indicator) of a received packet when performing a range test.

API Function:

The X-CTU also allows the user to test the API function of a radio during a range test.

To perform a range test with the API function of the radio, follow the steps outlined below:

- 1: Configure the Base with API enabled and a unique 16 bit or 64 bit source address.
- 2: Configure the remote radio with a unique source address and set the Destination address to equal the Base radio's source address.
- 3: Enable the API option of the X-CTU on the PC Settings tab and connect the base radio to the PC (See Figure 3).
- 4: Connect the red loopback adapter to the remote radio and place them a distance apart.
- 5: Enter either the 16 bit or 64 bit destination address of the remote radio into the Destination Address box on the Range Test tab (See figure 6).
- 6: Create a data packet of your choosing by typing in the data in the Transmit box
- 7: To start a Range test, click on Start.

You will notice the TX failures, Purge, CCA, and ACK messages will increment accordingly while the range test is performed.

To stop a range test, click on the Stop button.

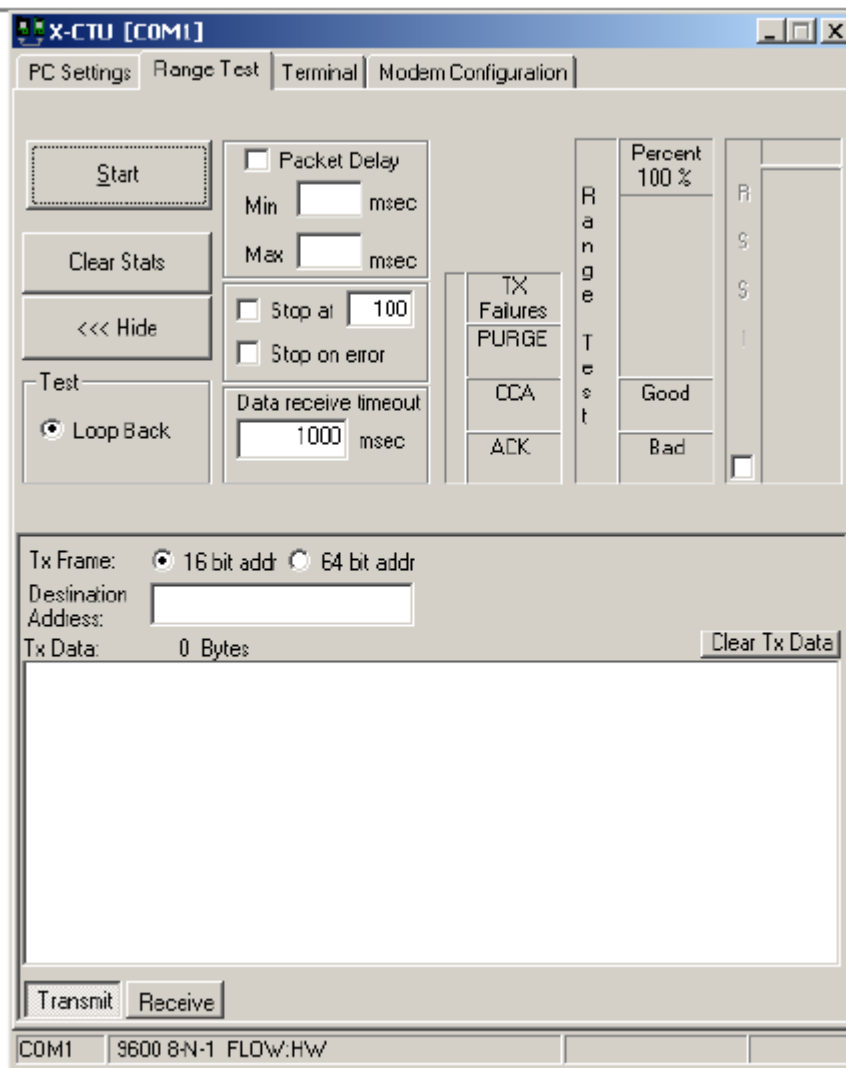


Figure 6

The Terminal Tab

The Terminal tab has three basic functions:

- Terminal emulator
- Ability to send and receive predefined data packets (Assemble packet)
- Ability to send and receive data in Hex and ASCII formats (Show/Hide hex)

The main terminal window

The main white portion of this tab is where most of the communications information will occur while using X-CTU as a terminal emulator. The text in **blue** is what has been typed in and directed out to the radio's serial port while the **red** text is the incoming data from the radio's serial port (see Figure 7).

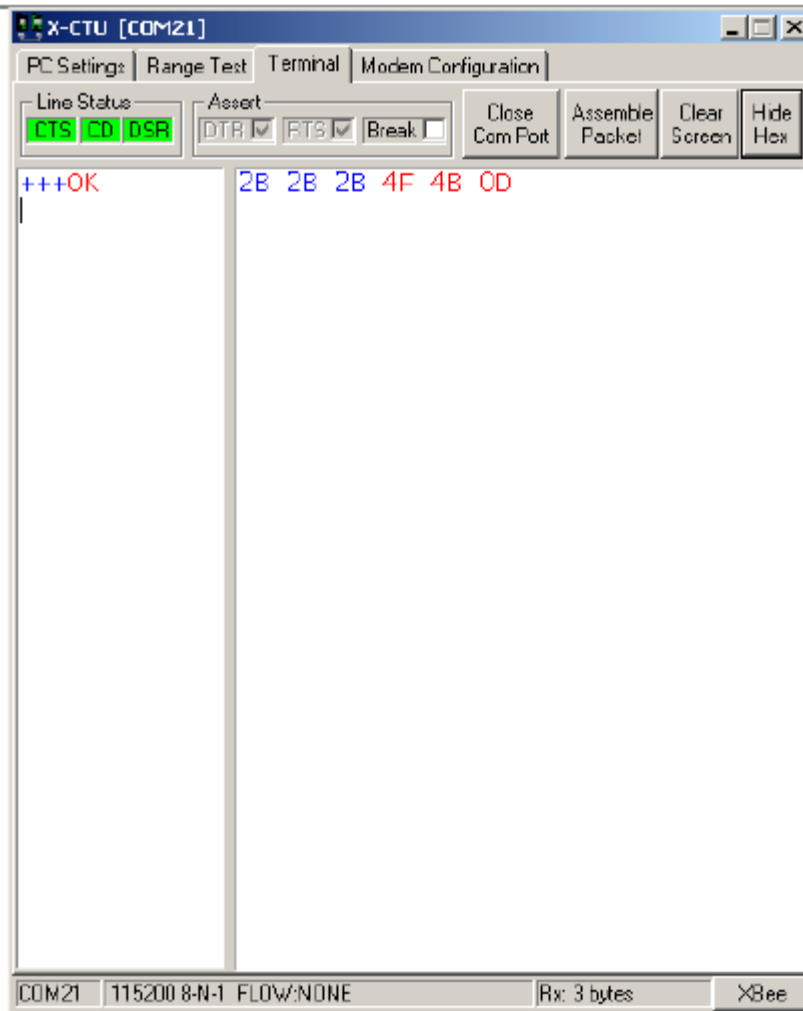


Figure 7

Assemble Packet

The Assemble Packet option on the Terminal tab is designed to allow the user to assemble a data packet in either ASCII or Hex characters. This is accomplished by selecting the Assemble packet window and choosing either ASCII (default) or Hex. Once selected, the data packet is assembled by typing in the desired characters as depicted in Figure 8.

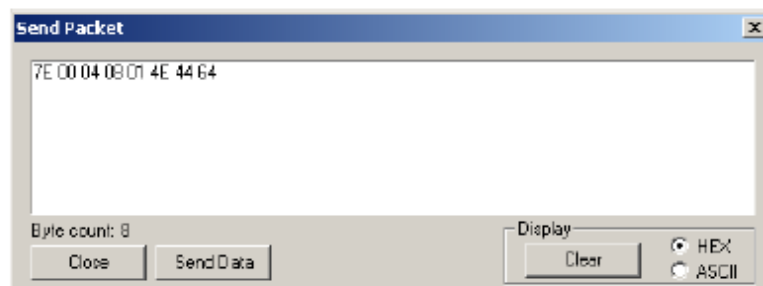


Figure 8

The Line Status indicators depicted in Figure 5 shows the status of the RS-232 hardware flow control lines. Green indicates the line is asserted while black indicates de-asserted.

The **Break** option is for engaging the serial line break. This can be accomplished by checking or asserting the Break option. Asserting the Break will place the DI line high and prevent data from being sent to the radio.

Modem Configuration tab

The Modem configuration tab has four basic functions:

- 1: Provide a Graphical User Interface with a radio's firmware
- 2: Read and Write firmware to the radio's microcontroller
- 3: Download updated firmware files from either the web or from a compressed file
- 4: Saving or loading a modem profile

Reading a radio's firmware

To read a radio's firmware, follow the steps outlined below:

- 1: Connect the radio module to the interface board and connect this assembly or a packaged radio (PKG) to the PC's corresponding port (IE: USB, RS232, Ethernet etc.).
- 2: Set the PC Settings tab (see Figure 3) to the radio's default settings.
- 3: On the Modem Configuration tab, select "Read" from the Modem Parameters and Firmware section (see Figure 9).

Making changes to a radio's firmware

Once the radio's firmware has been read, the configuration settings are displayed in three colors (see Figure 10):

- Black - not settable or read-only
- Green - Default value
- Blue - User-specified

To modify any of the user-settable parameters, click on the associated command and type in the new value for that parameter. For ease of understanding a specific command, once the command is selected, a quick description along with its limits is provided at the bottom of the screen. Once all of the new values have been entered, the new values are ready to be saved to the radio's non-volatile memory.

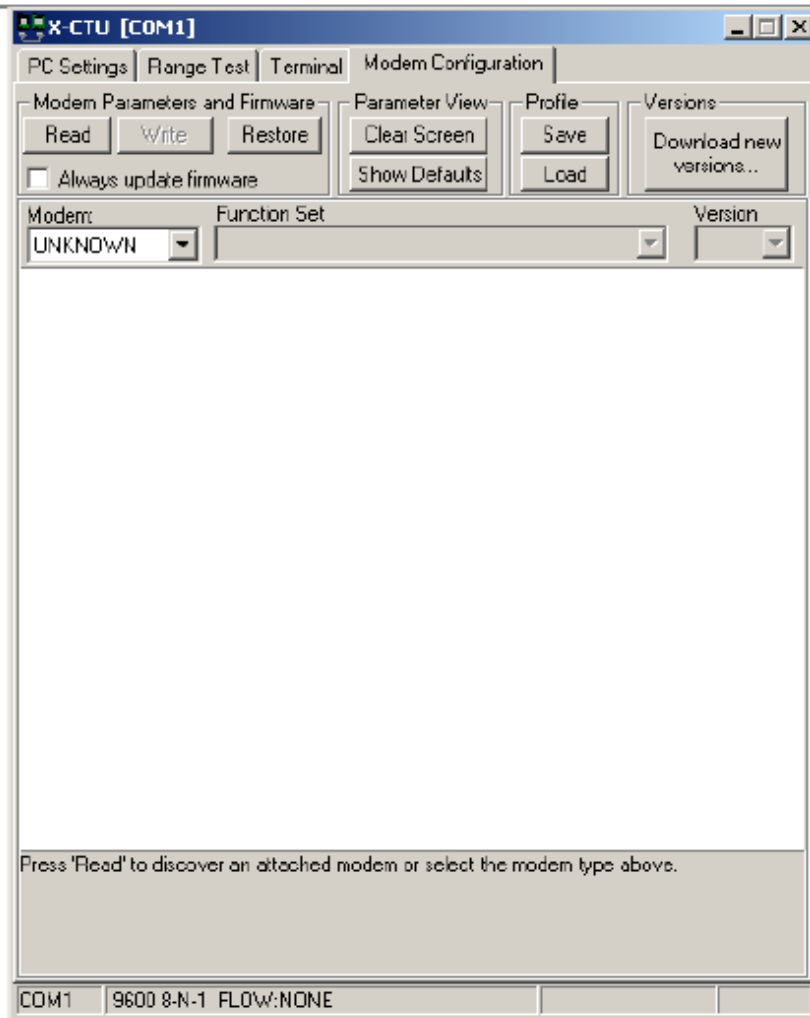


Figure 9

Writing firmware to the Radio

To write the parameter changes to the radio's non-volatile memory, click on the Write button located in the Modem Parameters and Firmware section (see Figure 10)

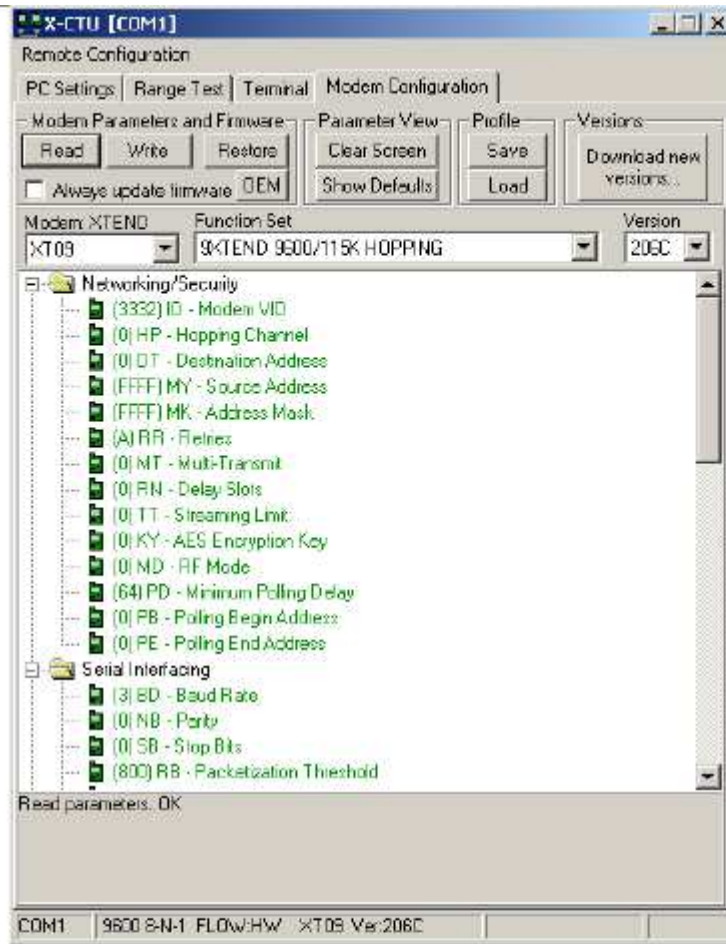


Figure 10

Downloading Updated Firmware Files

Another function of the Modem Configuration tab is allowing the user to download updated firmware files from either the web or install them from a disk or CD. This is accomplished by following the steps below:

- 1: Click on the Download New Versions... option under the Version section
- 2a: Click on Web for downloading new firmware files from the web
- 2b: Click on the File when installing compressed firmware files from a CD or saved file (see Figures 11 and 12)
 - 2bi: Browse to the location the file is saved at and click on Open (see Figure 13)
- 3: Click on OK and Done when prompted

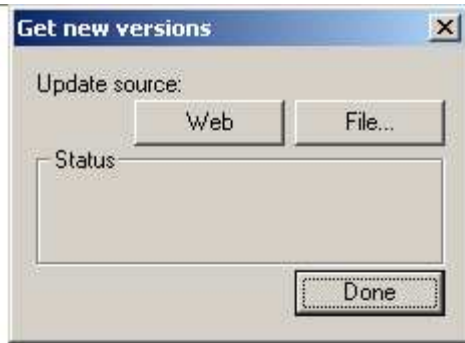


Figure 11

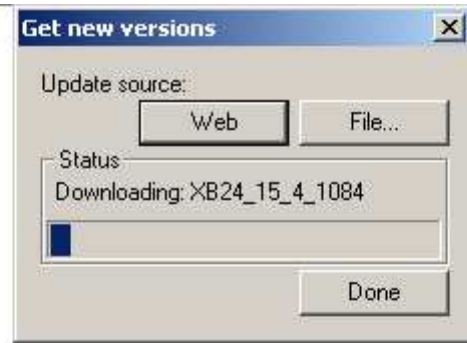


Figure 12

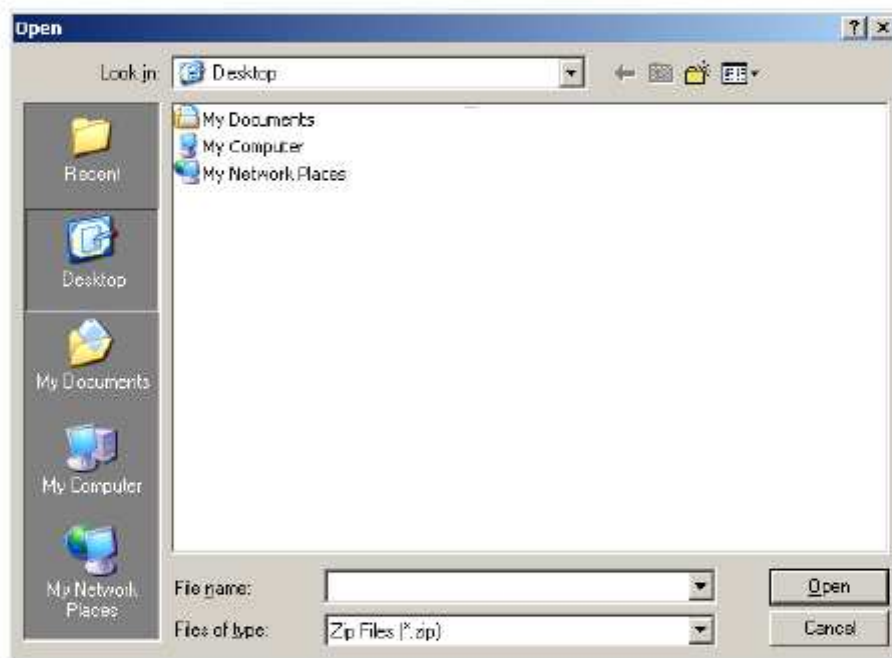


Figure 13

Modem Profiles

The X-CTU has the ability to save and write saved modem profiles or configuration to the radio. This function is useful in a production environment when the same parameters need to be set on multiple radios.

How to save a profile:

- 1: Set the desired settings within the radio's firmware as described in the Making changes to the radios firmware section
- 2: Click Save in the Profile section
- 3: Type in the desired name of this profile in the File Name box (see Figure 14)
- 4: Browse to the location where you wish to save your profile
- 5: Click Save

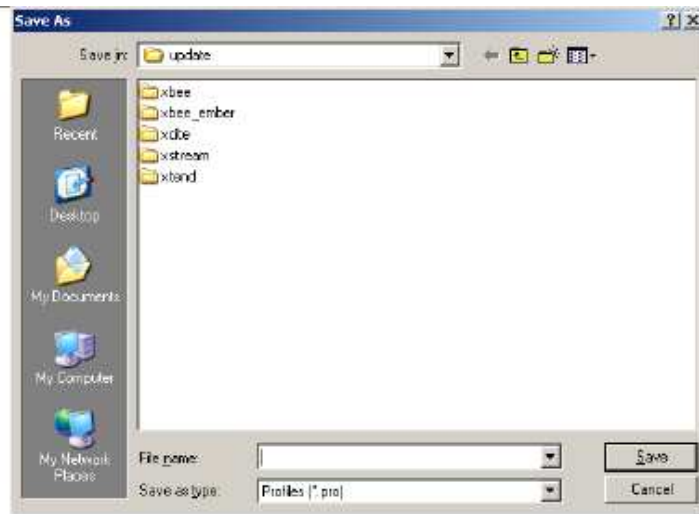


Figure 14

How to load a saved profile:

- 1: Click on Load from the profile section
- 2: Browse to the location of the file and click on the desired file (see Figure 15)
- 3: Click Open

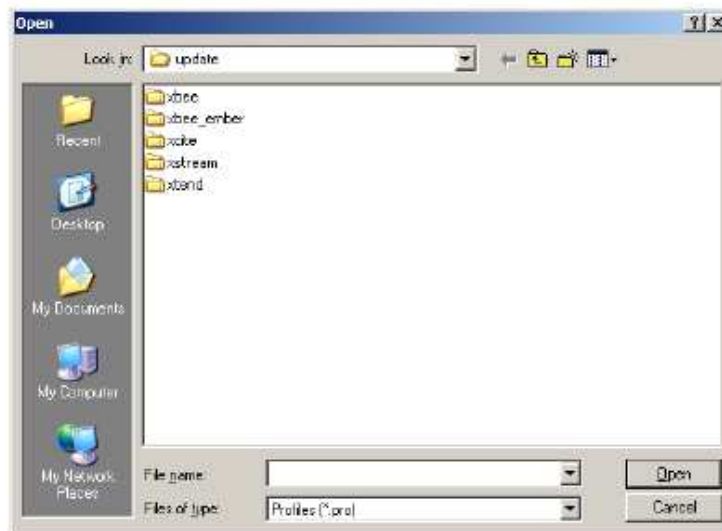


Figure 15

To save the loaded profile to the radio once you have loaded the file, follow the steps outlined in the [Writing firmware to the radio](#) section above.

To find out how to load the saved profiles in a production environment from a DOS prompt, please follow the steps outlined in Digi's online Knowledgebase at <http://www.maxstream.net/support/knowledgebase/article.php?kb=126>

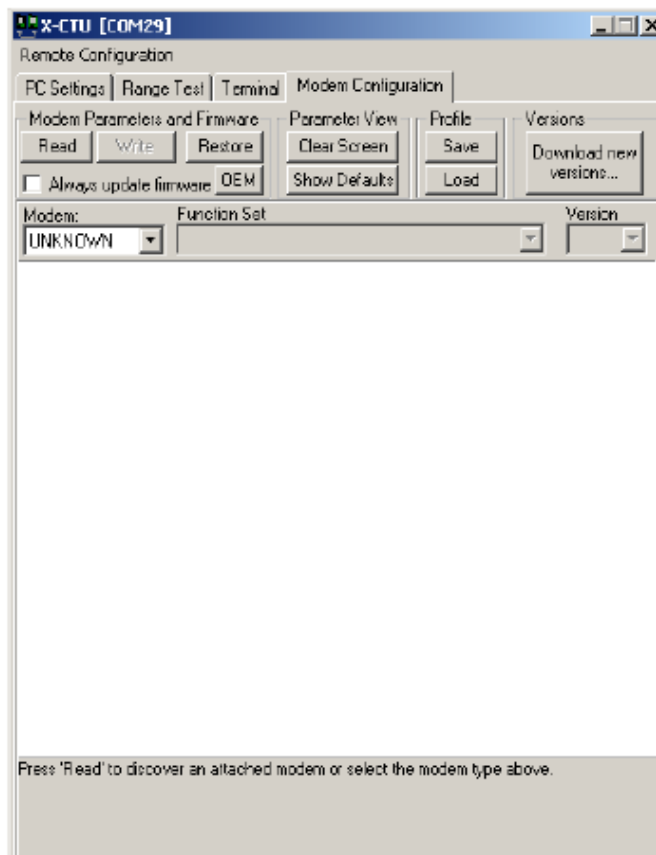
Remote Modem Management

XBee 802.15.4 modules with firmware version 1xCx and above, XBee ZNet 2.5 modules, and XBee ZB modules offer the ability to be configured with over the air commands. With the addition of this new feature, the user is able to configure remote radio parameters with X-CTU or API packets. To use the remote configuration tool, the following is required:

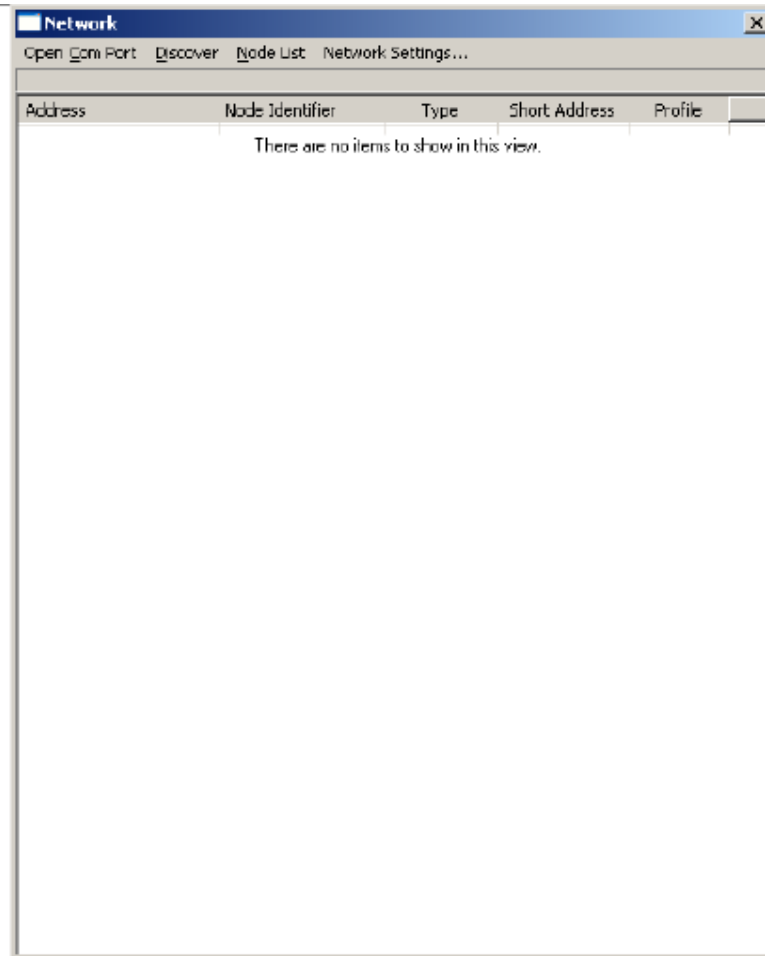
- The radio connected to the PC must be in API mode
- The remote radio must be associated or within range of the base radio

To access remote radios through X-CTU's Modem Configuration tab, perform the steps below:

- Enable API on the PC Settings tab
- Verify the COM port selection and settings
- On the Modem Configuration tab, select the Remote Configuration option on the top left corner of the program



- Select Open Com port
- Select Discover



- Select the desired modem from the discovered node list
- On the Modem configuration tab, select Read

The remote radio's configuration is now displayed on the Modem Configuration tab. At this point, the same options exist with respect to Read and Write parameter changes. Please note that the ability to change firmware versions is still limited to the radio's UART.

To clear the discovered node list, click on Node List and Clear.

The Node List option provides several additional options, including:

- Ability to print the discovered list
- Ability to remove a specific node from a list
- Ability to add additional nodes that have not been discovered
- Save the Node List
- Load a saved Node List
- Select/filter All, Routers, or End nodes

For specific questions related to the X-CTU configuration and test utility software, please contact our Support department, Mon - Fri, 8am - 5pm U.S. Mountain Time:

US and Canada Toll free:

(866)765-9885

Local or International calls:

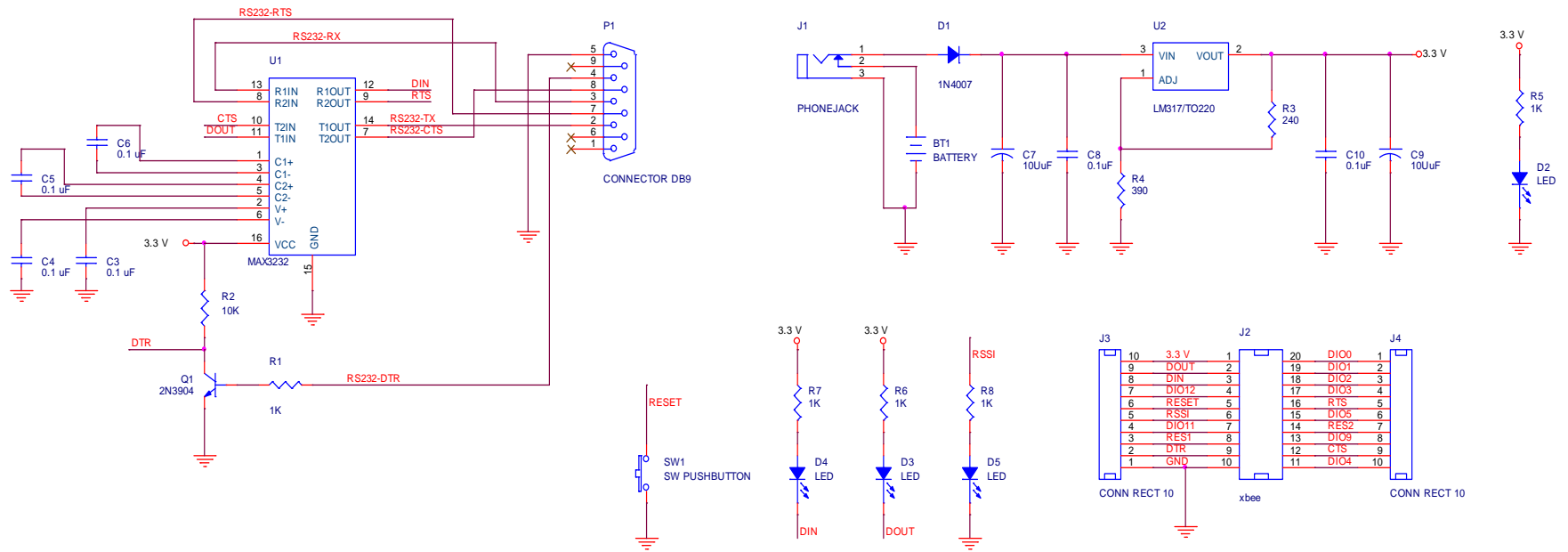
(801) 765-9885

Online support: <http://www.digi.com/support/eservice/login.jsp>

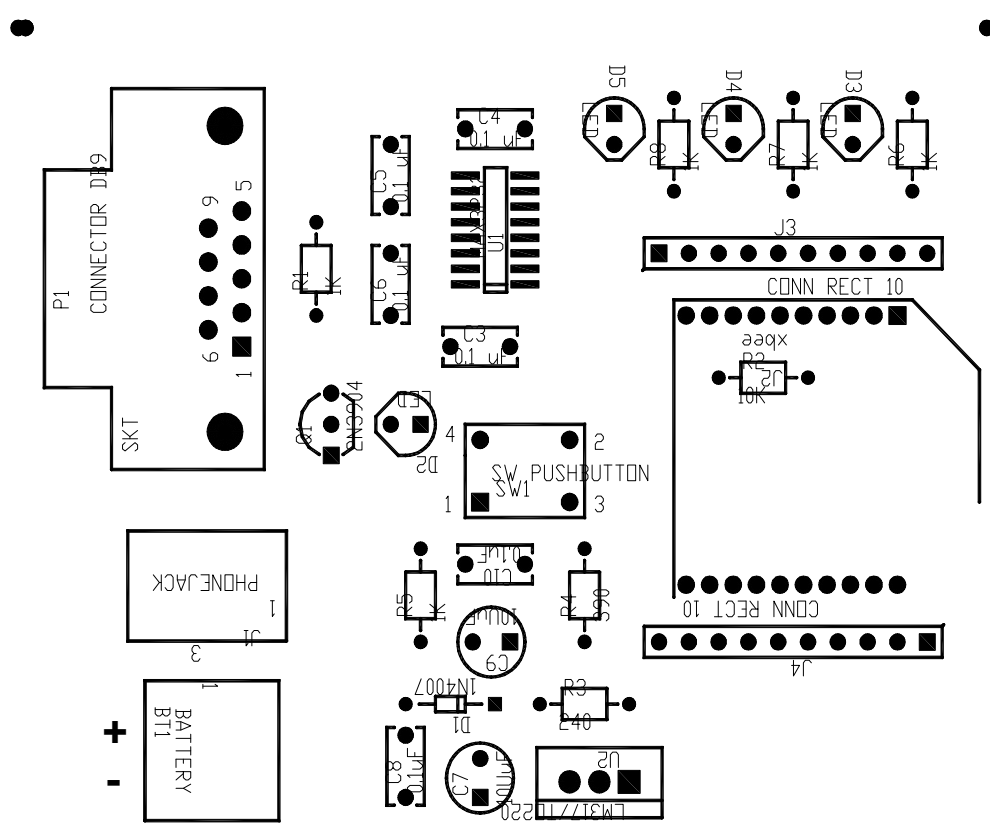
ANEXO 3

ESQUEMA DEL CIRCUITO DE LAS TARJETAS XBEE

CIRCUITO DE LAS TARJETAS XBEE



CIRCUITO IMPRESO DE LAS TARJETAS XBEE



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aragón Álvarez, Salvador, El cambiante escenario de las redes PAN, http://convergence.blogs.ie.edu/archives/convergence/2006/07/el_cambiante_es.php, 18/06/2010, 06/08/2010.
- [2] Linares Puerto, Daniel Alexander, Cholo Algecira, Diego Armando, <http://zigbee-tags.wikispaces.com/file/view/Borrador+IEEE.pdf>, Diseño e Implementación de un sistema de administración y control de activos a partir de un estudio de factibilidad entre tecnologías Wi-Fi, Bluetooth y Zigbee, 06/08/2010.
- [3] ZigBee & The Jetsons, <http://www.cyberf.org/blog/archives/2004/02/index.php>, 25/02/2005, 06/08/2010.
- [4] Andrango Díaz, Wilmer Rafael, Borja Ramírez, Edwin Santiago, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA PARA SUFRAGIO ELECTRÓNICO BASADA EN EL ESTÁNDAR ZIGBEE (IEEE 802.15.4), <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/233/1/CD-0631.pdf>, 03/2007, 06/08/2010.
- [5] Baca Torres, Roberto Patricio, Checa Soria, Danny Robert, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA PARA CIERRE DE CAJA DE MESAS DE JUEGO DEL BEST WESTERN HOTEL CASINO PLAZA, UTILIZANDO TECNOLOGÍA ZIG-BEE, <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1488/1/CD-2688.pdf>, 02/02/2010, 06/08/2010.
- [6] Ruiz Flores, Marco Antonio, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL DE TEMPERATURA MEDIANTE EL ESTÁNDAR ZIGBEE, <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/523/1/CD-1016.pdf>, 09/2007, 06/08/2010.
- [7] Mantilla Paredes, Paola del Carmen, MONITOREO Y CONTROL DE TEMPERATURA AMBIENTAL Y HUMEDAD DEL SUELO EN UN INVERNADERO DE TOMATE RIÑÓN, UTILIZANDO COMUNICACIÓN INALÁMBRICA, [http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/700/1/CD-1648\(2008-08-05-09-47-33\).pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/700/1/CD-1648(2008-08-05-09-47-33).pdf), 07/2008, 06/08/2010.
- [8] Moreno Pallo, Cynthia Vanessa, CONSTRUCCIÓN DE UNA RED ZIGBEE PROTOTIPO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DESDE TRANSMISORES DE CORRIENTE DE DOS HILOS, <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/handle/123456789/1238>, 03/2009, 06/08/2010.

- [9] Guevara Alvear, Lenin Eduardo, Vinueza García, Jorge Ramiro, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA LOCALIZACIÓN DE UN OBJETO EN MOVIMIENTO MEDIANTE ZIGBEE, <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/374/1/38T00183.pdf>, 22/06/2010, 06/08/2010.
- [10] Reinoso Pérez, Esteban Santiago, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA UNA RED DE DOMÓTICA Y SEGURIDAD PARA UN HOGAR UTILIZANDO EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4 ZIGBEE, [http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/938/1/CD-1838\(2009-01-21-12-2509\).pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/938/1/CD-1838(2009-01-21-12-2509).pdf), 11/2008, 06/08/2010.
- [11] Carrera Izurieta, Miguel Ángel, DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DOMÓTICO BASADO EN EL PROTOCOLO IEEE 802.15.4 ZIGBEE, <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1300/1/CD-2660.pdf>, 20/01/2010, 06/08/2010.
- [12] Naranjo Ordoñez, Mercedes Cristina, Chiliquinga Chiliquinga, Diego Marcelo, ZIGBEE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA SALA DE CONFERENCIAS INTELIGENTE EN LA EMPRESA ELÉCTRICA RIOBAMBA S.A, <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/378/1/38T00187.pdf>, 23/06/2010, 06/08/2010.
- [13] Cepeda Ortiz, Gabriela Rocío, Guerra Chicango, Jorge Esteban, DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD CONTRA INTRUSOS PARA EL LABORATORIO DE INFORMATICA UTILIZANDO EL ESTANDAR IEEE 802.15.4 ZIGBEE COMO TECNOLOGIA DE COMUNICACIÓN, <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/handle/123456789/1345>, 07/2009, 06/08/2010.
- [14] Carrera Cadena, Carlos Andrés, Guaiña Mejía, Luis Miguel, CONTROL REMOTO DE ROBOTS USANDO MÓDULOS DE RADIOFRECUENCIA XBEE A 2.4GHZ CON CAPACIDAD DE COMUNICACIÓN SERIAL A DATALOGGER E INTERFAZ GRÁFICA, <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/11180>, 23/07/2010, 06/08/2010.
- [15] WPAN, <http://es.wikipedia.org/wiki/WPAN>, 02/06/2010, 04/07/2010.
- [16] Camargo Olivares, José Luis, Modelo de cobertura para redes inalámbricas de interiores Capítulo 2: Redes inalámbricas de Area Personal, [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11761/fichero/Vol%FAmen1%252F6-Cap%EDtulo2+-+Redes+inalambricas+de+area+personal+\(WPAN\).pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11761/fichero/Vol%FAmen1%252F6-Cap%EDtulo2+-+Redes+inalambricas+de+area+personal+(WPAN).pdf), 05/2009, 04/07/2010.
- [17] Grado Caffaro, Angeles, Grado Caffaro, Martín, Las Redes Inalámbricas de Area personal: WPANs, http://www.umtsforum.net/mostrar_articulos.asp?u_action=display&u_log=21, 04/07/2010.

- [18] WPAN Red Inalámbrica de Área Personal, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/valle_i_lf/capitulo2.pdf, 04/07/2010.
- [19] Introducción a las WPANs, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo1.pdf, 04/07/2010.
- [20] Camacho Domínguez, Sara Ángela, Barroso, Juan Manuel Eugenio, El estándar Bluetooth, http://www.investigalog.com/ingenierias_y_sistemas_de_gestion/Juan/el-estandar-bluetooth/?lang=es&PHPSESSID=c381a3e1dae55110711242d4fd4d0c00, 14/10/2009, 04/07/2010.
- [21] El estándar IEEE 802.15.3, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo5.pdf, 04/07/2010.
- [22] Campos Garrido, Gonzalo, CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO EN REDES ZIGBEE/802.15.4, http://webpersonal.uma.es/~ECASILARI/Docencia/Memorias_Presentaciones_PFC/49_Memoria_GonzaloCampos.pdf, 2009, 05/07/2010.
- [23] El estándar IEEE 802.15.4, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo4.pdf, 05/07/2010.
- [24] El zumbido de las abejas, ZIGBEE, <http://www.domodesk.com/content.aspx?co=97&t=21&c=47>, 05/07/2010.
- [25] ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org/About/OurMission.aspx>, 04/07/2010.
- [26] Redes de sensores y ZigBee, <http://vidateleco.wordpress.com/2009/07/20/redes-de-sensores-y-zigbee/>, 20/07/2009, 04/07/2010.
- [27] “ZIGBEE” VS “BLUETOOTH”, <http://dspace.epn.edu.ec/bitstream/123456789/815/1/T10110CAP4.pdf>, 04/07/2010.
- [28] Ortega Huembes, Carlos Alberto, Zigbee: El nuevo estándar global para la domótica e inmótica, <http://www.monografias.com/trabajos61/zigbee-estandar-domotico-inmotica/zigbee-estandar-domotico-inmotica2.shtml#xzig>, 28/07/2008, 03/07/2010.
- [29] Santiago Claudia, http://www.acis.org.co/memorias/JornadasTelematica/IIJNT/BlueTooth_Zigbee.pdf, 03/07/2010.
- [30] ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org/Markets/Overview.aspx>, 04/07/2010.
- [31] Valverde Rebaza, Jorge Carlos, El Estándar Inalámbrico ZigBee, <http://www.seccperu.org/files/ZigBee.pdf>, 2007, 04/07/2010.

- [32] Manual de Usuario, XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules, <http://www.digi.com/support/productdetl.jsp?pid=3430&osvid=0&s=365&tp=3>, 04/01/2007.
- [33] Digi technical support, X-CTU Configuration & Test Utility Software, http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf, 20/08/2008, 06/08/2010.
- [34] XCTU ver. 5.1.4.1 installer, <http://www.digi.com/support/productdetl.jsp?pid=3430&osvid=0&s=365&tp=5&tp2=0>, 06/08/2010.

FECHA DE ENTREGA: _____

Srta. María Belén Tituaña

AUTOR

Ing. Gonzalo Olmedo

**DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERÍA
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**