

**Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del
protocolo IEEE 802.15.4**



Biblioteca
Campus Ciudad de México

Tecnológico de Monterrey

Campus Ciudad de México

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Mecatrónica

***Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del
protocolo IEEE 802.15.4***

Presentado por:

Alfredo Esquivel Jaramillo

Eduardo Bolivar Gaytán

Patricio García Zavala

Asesor: Dr. Martín Rogelio Bustamante Bello

Presentado el día: 13 de mayo de 2010

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Tabla de contenido

Capítulo 1 Aspectos Generales	8
1.1 Introducción	8
1.2 Antecedentes	8
1.3 Problemática	9
1.4 Objetivo	9
1.4.1 Objetivo General	9
1.4.2 Objetivos Específicos	10
1.5 Justificación	10
Capítulo 2 Marco Teórico	12
2.1 Estado del arte en monitoreo de redes o cadenas frías	12
2.2 Clasificación de redes de datos	14
2.3 Redes WPAN de bajas tasas de datos	16
2.4 Fundamentos de ZigBee	17
2.5 ZigBee contra Bluetooth y IEEE802.11	17
2.6 Frecuencias de operación y tasas de datos	18
2.7 Interoperabilidad, tipos de dispositivos y roles de dispositivos	19
2.8 Topologías de redes ZigBee	19
2.9 Fundamentos de comunicaciones en ZigBee	21
2.10 Asociación y disociación	23
2.11 Autoformación de ZigBee y características de autocuración	24
2.12 Capas del protocolo IEEE 802.15.4	24
2.13 El Gateway ZigBee	26
2.14 Seguridad en ZigBee	26
2.15 Requerimientos de transceptor (transmisor/receptor)	26
2.16 Sensibilidad del receptor	28

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

2.17	Métodos de dispersión para la operación a 2.4 GHz	28
2.18	Pérdida por trayectoria	30
2.19	Problemas asociados con la propagación de señales	32
2.20	Consideraciones de selección de antenas	33
2.21	Coexistencia de ZigBee	37
2.22	Ejemplos de redes ZigBee	38
2.23	Comparación entre tecnologías	42
2.24	Red Fría	42
2.24.1	Administración de la red fría en hospitales	43
2.24.2	Monitoreo de la red fría de un hospital	43
2.24.3	Transporte y mantenimiento de vacunas	44
Capítulo 3	Pruebas y Resultados	51
3.1	Desarrollo	51
3.2	Herramientas	52
3.2.1	Programa X-CTU	52
3.2.2	Módulos de radio frecuencia Xbee	53
3.3	Pruebas y Resultados	54
3.3.1	Prueba de comunicación de datos	54
3.3.2	Pruebas de comunicación entre módulos y terminal	55
3.3.3	Prueba de comunicación entre módulos (Xbee)	56
3.3.4	Pruebas de Topologías	64
3.3.4.1	Topología Punto-Punto	64
3.3.4.2	Topología de estrella	65
3.3.4.3	Topología de árbol	66
3.3.5	Interfaz gráfica	66
3.3.6	Software de usuario	69
3.3.6.1	Resultados	72
3.3.7	Análisis de resultados	73

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

3.3.8	Lista de componentes	74
3.3.8.1	Por módulo	74
3.3.9	Esquemático y PCB	75
3.3.10	Costos de desarrollo	76
Capítulo 4	Conclusiones	78
4.1	Conclusiones Generales	78
4.2	Trabajo a futuro	78
	Referencias	79
	ANEXO I: Patrón de radiación de las antenas XBee	81
	ANEXO II: Hojas de datos	84
	ANEXO III: Código del programa.	86

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Listado de Acrónimos

ADC	Analog to Digital Converter
AES	Advanced Encryption Standard
AHR	APS Header
AM	Amplitude Modulation
AMR	Automatic Meter Reading
ATM	Asynchronous Transfer Mode
APS	Application Support Sublayer
CCA	Clear Channel Assessment
CS	Carrier Sense
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance
DSL	Digital Subscriber Line
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full Function Device
FM	Frequency Modulation
GTS	Guaranteed Time Slot
GPIO	General Purpose Input/Output
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
IR	Infra Red
ISM	Industrial, Scientific and Medical

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

I/O	Input/Output
LAN	Local Area Network
LQI	Link Quality Indicator
MAC	Medium Access Control
MACA	MAC Accelerator
MAN	Metropolitan Area Network
MIC	Message Integrity Code
MHR	MAC Header
MFR	MAC Footer
NHR	NWK Header
NJ	Node Join Time
NWK	Network Layer
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open System Interconnect
PA	Power Amplifier
PAN	Personal Area Network
PHR	PHY Header
PPDU	PHY Protocol Data Unit
PSD	Power Spectral Density
PSSS	Parallel Sequence Spread Spectrum
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RSSI	Receive Signal Strength Indication

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

RFD	Reduced Function Device
SC	Scan Channel
SD	Scan Duration
SNR	Signal to Noise Ratio
SHR	Synchronization Header
SM	Sequence Manager
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WAN	Wide Area Network
Wi-Fi	Wireless-Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless personal Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Capítulo 1

Aspectos Generales

1.1 Introducción

En nuestro quehacer cotidiano, nos encontramos inundados con una gran variedad de dispositivos de control remoto. Hasta hace algunos años, los únicos dispositivos remotos en los hogares eran los controles remotos de TV. Hoy en día, es más amplio todo lo que podemos controlar remotamente en el hogar: TV, DVD, Home Cinema, cámara digital, satélite, garaje, alarmas, aire acondicionado, controles de luz, etc. La interacción remota con todos estos dispositivos requiere un único estándar para que funcionen bajo una misma red; un protocolo prometedor en cuestión es ZigBee, basado en el estándar IEEE 802.15.4. La idea del nombre de ZigBee vino de "una colmena de abejas pululando alrededor de su panal y comunicándose entre ellas, algo así como la comunicación que se produce con el zumbido de las abejas" (Domodesk, 2009). La tecnología de ZigBee resulta ser de gran utilidad en aplicaciones que requieran bajo consumo energético y bajas tasas de transmisión de datos, y actualmente se encuentra inmersa en una gran variedad de aplicaciones domóticas, en la realización de control industrial, recolección de datos médicos, detección de intrusos, etc.

Las redes sensoriales inalámbricas es un área de investigación que está creciendo rápidamente y a la cual se le ha dado una especial atención en los últimos años. Esto ha sido posible gracias a los avances tecnológicos en el desarrollo de dispositivos sensoriales de bajo costo equipados con interfaces de red inalámbricas. La creación de redes sensoriales incluso en una mayor escala conduce a nuevos retos técnicos y posibilidades de aplicación inmensas. Las redes sensoriales encuentran aplicaciones que involucran dominios diversos como redes militares, médicas, industriales y del hogar. En el presente proyecto se buscará desarrollar una red sensorial inalámbrica que opere bajo el protocolo ZigBee.

1.2 Antecedentes

Para la realización de este proyecto comenzó con el interés del uso de las redes inalámbricas personales. Por ello en un principio se investigó sobre las tecnologías existentes, los fabricantes, configuraciones de redes, etc. Una vez que se tenía suficiente información empezó la búsqueda de la aplicación, donde surgieron distintas ideas como la domótica. La idea de aplicarlo al monitoreo de variables ambientales y especialmente en una red fría surgió como recomendación de un profesor el cual nos expuso algunos de los problemas que se presentaban en hospitales y laboratorios acerca del cuidadoso control que se necesita de la temperatura así como la necesidad de recibir alertas en caso de fallas en los equipos.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Nuestro objetivo entonces fue tratar de conjuntar los conocimientos adquiridos en la primera parte del proyecto acerca del protocolo de Zigbee y aplicarlo de la mejor forma posible a una aplicación ya en específico.

1.3 Problemática

La red fría en la actualidad es vital tanto en la industria, como en la sociedad, ya que, es la encargada de conservar los alimentos, químicos, reactivos, medicamentos, materias primas, en óptimas condiciones para su proceso o consumo.

Para este proyecto nos enfocaremos en la red fría de un hospital, la cual debe de tener un constante monitoreo debido a los materiales con los que se cuenta. En la actualidad en muchos hospitales, el monitoreo se sigue haciendo de forma manual, donde una persona pasa con una gráfica y pone a manera de puntos la temperatura que está registrando el refrigerador en un momento dado. Esto no siempre se hace a un intervalo razonable, ya que la falla puede venir de un momento a otro, y tan sólo una ligera desviación de 0.1°C por encima o debajo de los umbrales aceptados, podría echar a perder estas vacunas o medicinas. A menudo esto se hace de forma manual ya que la implementación de un monitoreo automático es muy costosa y difícil de instalar.

Con el monitoreo automático se lograría medir y visualizar las temperaturas recopiladas en tiempo real, además con la información obtenida se podrían hacer estadísticas más precisas sobre el comportamiento de la temperatura de cada equipo de refrigeración. En caso de alguna falla se mandaría una alerta inmediata al encargado del área. Para poder monitorear los diferentes equipos de refrigeración en un hospital y que, alguna persona encargada pueda detectar cualquier falla de inmediato, es posible crear una red sensorial inalámbrica que pueda recopilar los datos en tiempo real, durante un intervalo de tiempo razonable, y poder enviar la notificación al encargado. Las redes sensoriales inalámbricas son ampliamente usadas en el control industrial y en aplicaciones comerciales, y a partir del protocolo que se maneja, será necesario desarrollar la formación de la red para que se logre el monitoreo de la temperatura como variable ambiental.

1.4 Objetivo

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar, implementar y monitorear una red con el protocolo 802.15.4 (Zigbee), en especial una cadena fría en su parte de almacenaje.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar sobre las redes inalámbricas personales, así como sus protocolos, topologías y funcionamiento en general.
- Conocimiento amplio sobre los módulos Xbee.
- Analizar y verificar sobre los parámetros de la propagación de radiofrecuencia (RF).
- Conocer de forma completa el funcionamiento del software X-CTU para la comunicación de los módulos.
- Implementar una red sensorial en la cadena fría en su parte de almacenaje con módulos XBee.
- Crear una interfaz amigable al usuario con un lenguaje de programación de alto nivel.

1.5 Justificación

La integración de un procesamiento simple, almacenamiento, detección sensorial, y capacidades de comunicación en dispositivos de bajo costo, a pequeña escala y que se unan entre ellos en redes sensoriales inalámbricas (WSNs, por sus siglas en inglés) da pie al desarrollo de una gran variedad de aplicaciones. Para poder lograr la integración de diversos nodos sensoriales a través de una topología de red, es necesario entender diferentes áreas, desde aspectos de bajo nivel de hardware y comunicación de radiofrecuencia, hasta conceptos de alto nivel, como pueden ser el manejo de bases de datos o el desarrollo de aplicaciones. Este tipo de redes, como se detallará más adelante, son de bajo costo, transmiten a una tasa baja de datos, ofrecen una vida eficiente de la batería. El presente proyecto hace la integración de varios nodos sensoriales para el establecimiento de una WSN en una topología tipo estrella, donde el nodo central se conecta a una computadora. La infraestructura desarrollada hasta el momento se muestra en la Figura 1.1. Con un mayor número de nodos sensoriales, es posible hacer otras topologías, como árbol y de malla.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4



Figura 1.1. Topología de red para el monitoreo de una red fría de un hospital.

Cada uno de los radio módulos, que adoptan una función en específica en la red, tienen una arquitectura integrada, y estando colocados dentro del equipo del hospital, monitorean la temperatura mediante un sensor, y la envía al dispositivo central. En el software de aplicación que se desarrolla, se pueden ver las variaciones de temperatura en tiempo real y en caso de que la temperatura caiga debajo de un umbral mínimo o por encima de un umbral máximo, se enviará un correo electrónico al encargado del área. Esto evita que un personal vaya al refrigerador a registrar constantemente la temperatura, y además asegura que las vacunas y medicinas estén disponibles en todo momento. Esto puede solucionar otras problemáticas en la red fría, y se pueden ver situaciones donde una falta de monitoreo adecuado cause una catástrofe, como en el caso de frascos de la vacuna contra el influenza AH1N1, donde varios de estos frascos se echaron a perder. “El secretario de salud, José Ángel Córdova Villalobos, confirmó que debido un descuido de funcionarios en Colima se echaron a perder 2670 dosis de la vacuna contra la influenza AH1N1” (“El universal, 7 de diciembre de 2009). Como se puede ver, es un caso real, que fue de la parte de transporte, que también se puede implementar, aunque en el presente proyecto pretende monitorear en la parte de almacenaje.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Estado del arte en monitoreo de redes o cadenas frías

Se han usado diferentes técnicas para el monitoreo de cadenas frías dentro de la industria. El control de la cadena fría está incrementándose cada vez con más fuerza debido al número creciente de fármacos y comida empaquetada que requieren ser mantenidas bajo refrigeración y bajo condiciones controladas. De hecho, el control inadecuado y/o monitoreo de almacenamiento y transporte de productos sensibles a la temperatura le puede costar demasiado a la industria y puede causar a veces envenenamiento por comida en la población. Hay muchas soluciones logísticas dentro del área de la cadena fría, pero para tener una solución barata y reusable, a menudo se ha decidido integrar sensores en las plataformas que albergan a los productos.

Las redes de sensores han sido exploradas como soluciones poderosas para muchas aplicaciones, como vigilancia, monitoreo, ubicación, medición y cuidado médico, etc. La tecnología emergente de sensores inalámbricos promete la tarea de monitoreo en tiempo real. Un avance importante en cuestión es con los bancos de sangre, los cuales son responsables de asegurar el control de calidad de la sangre para el transporte.

El proceso completo desde la extracción de la sangre hasta un trasplante debe de ser validado. El plasma sanguíneo y las muestras de sangre en particular son extremadamente sensibles, así que se requiere un cuidado especial durante su almacenamiento y transporte, especialmente en lo que concierne a su temperatura de almacenamiento. Por ejemplo, la sangre útil debe ser mantenida a temperaturas entre 2 y 6 °C, y el plasma sanguíneo debe mantenerse debajo de -20 °C y asegurar su calidad. La exposición a temperaturas fuera del rango resultará rápidamente en el deterioro de la sangre. Ha habido algunos sistemas tradicionales de monitoreo limitados al patrón cliente-servidor, lo cual tenía mucha inconveniencia al compararse con un sistema de browser-server. Algunos sistemas basados en web han sido presentados en otros campos: se han detallado sistemas basados en web de monitoreo de temperatura de capturas de marisco y sistema de monitoreo ambiental. Muy rara vez las aplicaciones tienen mecanismos de alarmas en tiempo real.

En soluciones de redes inalámbricas sensoriales para camiones refrigerados, se han integrado sensores en los contenedores de los productos, y se han organizado en cadena sin una estación base y alternan entre modo activo y modo de "sleep", donde los periodos de sleep son más largos que los periodos de actividad. De esta forma, el número de sensores que se comunican al mismo tiempo es muy reducido.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Como ejemplos de sistemas que ya se han desarrollado, se encontró uno que está basado en dos tipos de redes: red en exteriores en la cual un número de sensores individuales transmite datos usando RF inalámbrica a un repetidor inalámbrico que se comunica con un servidor remoto de datos vía una red GSM, y una red en interiores en la que los sensores inalámbricos en bancos de sangre transmiten datos usando RF inalámbrica a un repetidor que envía los datos a un servidor de datos a través de Intranet. Esta topología puede verse en la Figura 2.1.

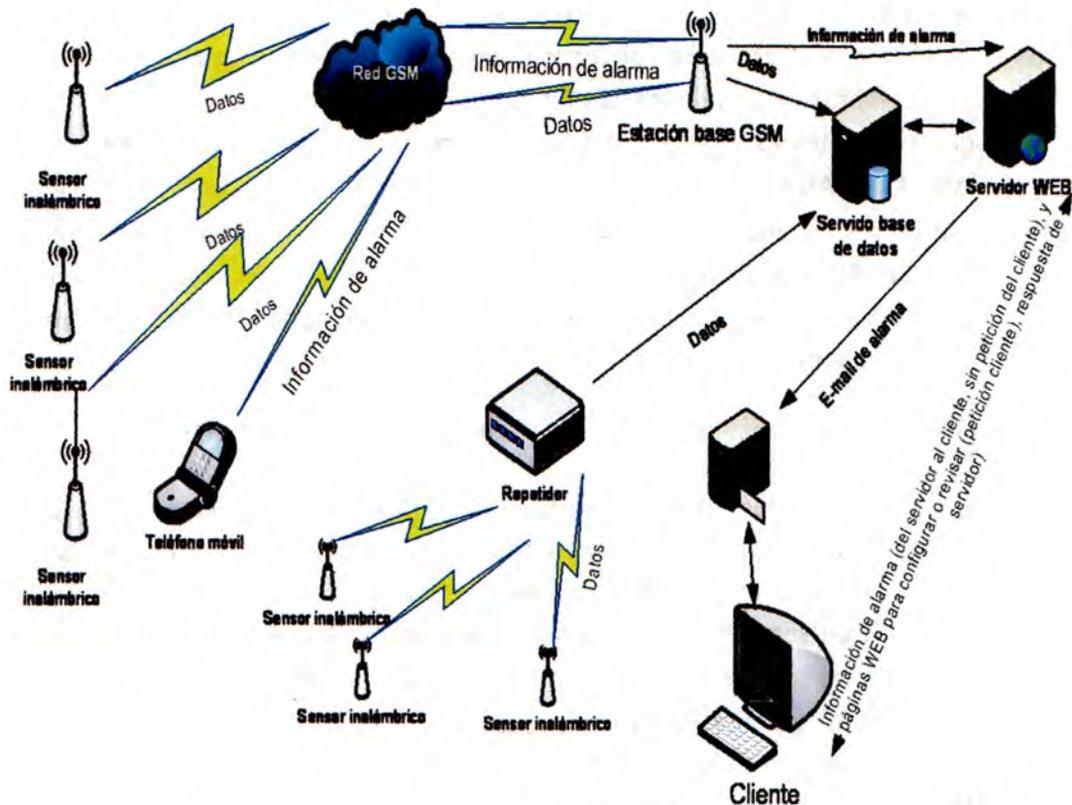


Figura 2.1: Diagrama esquemático de un sistema de monitoreo de cadena fría [15]

También se han hecho aplicaciones usando la tecnología RFID en un sistema de monitoreo de temperatura de cadena fría asegurando la calidad de los productos de la cadena fría y que cumplan con los requerimientos de las provisiones durante su transporte. Para este programa se hace uso completo de etiquetas de RFID, sensores de temperatura, sistemas GPS y otras ventajas técnicas, incluyendo el sistema de monitoreo de temperatura de cadena fría, diseño de software y procedimiento de flujo de sistema. El sistema puede ubicar y monitorear en tiempo real la ubicación y la temperatura de los productos, para lograr un mejor aseguramiento de la calidad. Sin embargo, la tecnología RFID en el campo de la logística de la cadena fría está muy lejos de alcanzar el punto de aplicación de larga escala. A nivel técnico, los costos RFID son relativamente altos y las restricciones no uniformes del estándar son un factor clave en el

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

desarrollo. A nivel de aplicación, aún necesitan mejorar la seguridad de datos. El reconocimiento adecuado de las etiquetas RFID sólo es del 80%. El problema de reciclamiento de etiquetas y de reuso sigue bajo investigación.

2.2 Clasificación de redes de datos

Hoy en día es imprescindible comunicar datos entre dos o más dispositivos que están separados cierta distancia. Por ello, es necesario tener un concepto de red, que es un conjunto de dispositivos interconectados entre sí con la finalidad de poder compartir datos que son transmitidos a través de un medio físico, ya sea alámbrico o inalámbrico. Las redes que transportan datos, generalmente se basan en la conmutación de paquetes y se pueden clasificar de diferentes maneras: de acuerdo a su tamaño o alcance (redes PAN, LAN, WAN y MAN), a su topología física (bus, estrella, anillo, malla completa, malla parcial o árbol), por la direccionalidad de los datos (simplex, half-duplex o full-duplex), entre otras. Para que los dispositivos remotos puedan tener comunicación entre sí, es necesario definir un conjunto de reglas que especifiquen cómo se intercambiarán los datos durante el proceso de comunicación. A este conjunto de reglas se le conoce como protocolo.

De acuerdo al alcance o tamaño de la red, se adopta la siguiente clasificación:

- **Redes de área local (LAN):** son redes que están limitadas a un área relativamente pequeña, como un único cuarto, un edificio, un avión o una oficina corporativa. A menudo, estas redes pueden ser segmentadas en grupos lógicos de acuerdo a la funcionalidad en una empresa o área de trabajo. Estas subdivisiones se conocen como grupos de trabajo, que son agrupaciones de computadoras que comparten un sistema común de recursos dentro de la LAN [2]
- **Redes de área metropolitana (MAN):** son redes que están diseñadas para la conexión de equipos a lo largo de una ciudad completa. Puede ser una red única que interconecte varias redes LAN resultando en una red de mayor tamaño. [1]
- **Redes de área amplia (WAN):** son redes de comunicaciones que abarcan un área geográfica con amplio alcance y que con frecuencia usa las instalaciones de transmisión que proveen compañías proveedoras de servicios, como las del teléfono. Entre las diferentes tecnologías WAN que interconectan dispositivos entre un área geográfica muy grande, o por ejemplo, enlazan diferentes oficinas corporativas dentro de una organización, se encuentran líneas dedicadas o de arrendamiento, Frame Relay, ATM, xDSL, cable modem, o incluso el enlace satelital o de microondas. Las tecnologías WAN trabajan en las capas más inferiores del modelo OSI: capa física y capa de enlace de datos.
- **Redes de área personal (PAN):** son redes que permiten comunicar e intercambiar información entre computadoras, PDAs, impresoras, teléfonos móviles y otros dispositivos dentro de un

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

área limitada a unos pocos metros de distancia. Las tecnologías más comunes es por infrarrojos o módulos de Bluetooth o ZigBee por radiofrecuencia, que a menudo funcionan en la banda no licenciada ISM de 2.4 GHz. [3]

En el presente proyecto se buscará desarrollar una aplicación con sensores inalámbricos que utilizan el protocolo ZigBee. No es necesario el uso de algún medio cableado para la transmisión de una señal inalámbrica, haciendo así de la comunicación inalámbrica una forma versátil de construir una red. Las tecnologías inalámbricas existen desde hace muchos años. La televisión por satélite, la radio AM/FM, los teléfonos celulares, dispositivos de control remoto, radares, sistemas de alarma, estaciones meteorológicas y teléfonos inalámbricos están integrados en nuestra vida diaria. Actualmente, las tecnologías inalámbricas son parte elemental de los negocios y la vida personal. En el contexto de las redes inalámbricas, se encuentra la siguiente clasificación:

- **WLANs (Redes inalámbricas de área local):** Usan la radiofrecuencia y varias técnicas de modulación de espectro expandido, definidas por el conjunto de estándares IEEE802.11 para la transmisión de datos. Puede funcionar de modo independiente o como una extensión de la red cableada. Suelen tener mayor capacidad de ancho de banda que las WWANs. Estas redes requieren un punto de acceso al cual se conecten todos los dispositivos inalámbricos, el cual se conecta a la red cableada. El área de cobertura de un punto de acceso inalámbrico puede ser de hasta 100m en interiores. Se emplean en edificios, o campus escolares, o en hogares, permitiendo a varios usuarios acceso compartido a una conexión de Internet. Otro nombre de las redes WLAN son redes WiFi; hay diferentes versiones: 802.11b transmite datos a velocidades de hasta 11 Mbps en la banda de 2.4 GHz. 802.11a puede transferir datos a velocidades de hasta 54 Mbps en la banda de 5 GHz. Es una tecnología popular y exitosa, que se ha logrado incorporar en muchas laptops como equipo estándar. [6]
- **WMANs (Redes inalámbricas de área metropolitana):** Es una red inalámbrica de instalación fija que interconecta edificios o ubicaciones. Las redes WMAN de back haul son para redes de empresas, conexión de torres celulares y hotspots de Wi-Fi. Es una opción para las empresas que no pueden contratar el servicio de fibra sobre una ciudad, o cuando no sea justificable el costo de una conexión de 10 Mbps que requiera 6 líneas arrendadas T1 a 50,000 dólares al año. En tal caso, el servicio inalámbrico cuesta la mitad, sin una carga mensual. [3]
- **WWANS (Redes inalámbricas de área amplia):** pueden puentear oficinas de una organización y cubrir un área más extensiva que las redes locales, facilitando así la conectividad para usuarios móviles como el hombre de negocios que viaja continuamente. En general, permiten a los usuarios mantener acceso a aplicaciones relacionadas a su empleo e información mientras están fuera de la oficina (servicio de teletrabajo). La conectividad WWAN requiere módems inalámbricos y una infraestructura de red inalámbrica, provista por una cuota por servicio por

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

un proveedor de servicios inalámbricos. El módem tiene interfaz directamente con las torres de radio, que transportan la señal al centro de conmutación móvil, donde la señal es transportada al enlace de red público o privado correspondiente (por ejemplo, el teléfono, una línea de alta velocidad, o el acceso a Internet). De aquí, la señal puede ser transferida a una red existente de alguna organización. Las señales de redes WWAN son susceptibles a problemas de interferencia debido a las condiciones climáticas y del terreno. [5]

- WPANs (Redes inalámbricas de área personal): son redes de corto alcance que contemplan un área de algunas decenas de metros. Se usan generalmente para conectar dispositivos periféricos (por ejemplo, teléfonos móviles, impresoras y electrodomésticos) o un PDA a una computadora sin conexión por cable. [7]

2.3 Redes WPAN de bajas tasas de datos

Una red WPAN es una red de comunicación simple de bajo costo que permite una conectividad inalámbrica en aplicaciones con potencia limitada y requerimientos relajados de desempeño. Los principales objetivos de este tipo de redes son facilidad de instalación, transmisión de datos confiable, operación de corto alcance, costo extremadamente bajo y vida de la batería razonable, mientras se pueda mantener un protocolo simple y flexible.

Algunas de las características de las WPAN, que manejan bajas tasas de datos, son [10]:

- Tasas de datos sobre el aire de 250 Kb/s, 40 Kb/s y 20 Kb/s.
- Operación en estrella o en peer-to-peer.
- Direcciones asignadas de 16 bits o 64 bits.
- Asignación de ranuras de tiempo garantizado (GTS)
- Acceso del canal mediante CSMA-CA.
- Protocolo que usa "acknowledging" para confiabilidad de la transferencia.
- Bajo consumo de potencia.
- Detección de energía.
- Indicación de la calidad del enlace (LQI).
- 16 canales en la banda 2450 MHz, 10 canales en la banda 915 MHz y 1 canal en la banda 868 MHz.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

2.4 Fundamentos de ZigBee

ZigBee es un estándar que define un conjunto de protocolos de comunicación para networking inalámbrico para bajas tasas de datos de corto alcance. Los dispositivos inalámbricos de ZigBee operan en las bandas de frecuencias de 868 MHz, 915 MHz, y 2.4 GHz. La máxima tasa de datos es de 250 kilobits por segundo. Los transceptores son half-duplex, lo cual significa que están transmitiendo o recibiendo, pero no ambos al mismo tiempo. ZigBee está enfocado principalmente a aplicaciones alimentadas por batería donde los requerimientos principales son baja tasa de datos, costo bajo y vida larga de la batería. La mayoría de los casos, estos dispositivos están en modo de ahorro de potencia o modo "sleep", lo cual da larga vida a los dispositivos. [8]

La especificación ZigBee fue desarrollada por la ZigBee Alliance, un cuerpo estándar con más de 250 compañías miembro de cada continente en el mundo. La ZigBee Alliance también especifica un conjunto de pruebas, que evalúan casos que refuerzan la compatibilidad entre vendedores. Para que los vendedores reciban la certificación ZCP (ZigBee Compliant Platform), deben pasar este conjunto de pruebas rigurosas. Además de la compatibilidad a nivel de stack, ZigBee también define compatibilidad en el nivel de aplicación a través de perfiles de aplicación. [13].

El estándar ZigBee ha adoptado a 802.15.4 como sus protocolos de capa física y de control de acceso (MAC). En muchas aplicaciones de ZigBee, los dispositivos tienen ciclos de trabajo menores a 1% para asegurar algunos años para la vida de la batería. Este ciclo de trabajo es la razón de tiempo que el dispositivo está activo contra el tiempo total. [8]

ZigBee provee capacidad de broadcast confiable, como técnica para distribuir un mensaje a muchos nodos en una red. ZigBee también provee multicasting, que puede enviar un mensaje a cualquier grupo de nodos. [13]

2.5 ZigBee contra Bluetooth y IEEE802.11

IEEE802.11 es una familia de estándares, y específicamente el estándar IEEE802.11b opera en la banda de 2.4 GHz, que es común a Bluetooth y ZigBee. IEEE802.11b tiene una alta tasa de datos (de hasta 11 Mbps) y provee conexión inalámbrica a Internet; su rango interno está entre 30 y 100 metros. Por otro lado, Bluetooth tiene una menor tasa de datos (menor a 3 Mbps) y su rango en interiores es menor a 10 metros. Una aplicación popular de Bluetooth es proveer comunicación entre un móvil y auriculares. ZigBee tiene la menor tasa de datos y complejidad entre estos tres estándares y provee significativamente una mayor vida de la batería.

La baja tasa de datos de ZigBee implica que no es la mejor opción para implementar una conexión a Internet inalámbrica u otras aplicaciones donde se deseen más de 1 Mbps. Sin embargo, si

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

el objetivo de la comunicación inalámbrica es transmitir y recibir comandos simples o reunir información de sensores de humedad o temperatura, ZigBee provee la solución más poderosa y eficiente en costo en comparación con Bluetooth e IEEE 802.11b.

Una de las formas de establecer una red de comunicaciones es el uso del concepto de capas de networking. Cada capa es responsable de ciertas funciones en la red. Las capas normalmente pasan datos y comandos solamente a las capas directamente encima y debajo de ellas. La capa física y la capa MAC están definidas por el estándar IEEE 802.15.4, el cual no especifica requerimientos para capas superiores. Las características de nivel físico de la red están determinadas por la especificación de capa física; así, parámetros como la frecuencia de operación, la tasa de datos y requerimientos de sensibilidad de receptor así como tipos de dispositivos se especifican en el estándar IEEE 802.15.4. [8]

2.6 Frecuencias de operación y tasas de datos

Hay tres bandas de frecuencias en la versión más reciente del IEEE 802.15.4, lanzada en septiembre del 2006: 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz. En el presente proyecto se emplea la banda de 2.4 GHz, la cual está caracterizada por los siguientes parámetros (Tabla 2.1):

Frecuencia (MHz)	Número de canales	Modulación	Chip rate (Kchip/s)	Bit rate (Kb/s)	Symbol rate (Ksímbolo/s)	Método de dispersión
2400-2483.5	16	O-QPSK	2000	250	62.5	16-array ortogonal

Tabla 2.1: Parámetros de la operación de ZigBee en la banda de 2.4 GHz. [8]

La banda de 2.4 GHz está aceptada alrededor del mundo y tiene la máxima tasa de datos y número de canales, con respecto a las otras bandas. Por esta razón, el desarrollo de transceptores en la banda 2.4 GHz es una opción popular para muchos fabricantes. Sin embargo, 802.11b opera en la misma banda y la coexistencia puede ser un problema en algunas aplicaciones, por lo cual algunos usuarios pudieran preferir el uso en las otras dos bandas, ya que además mientras menor sea la banda de frecuencia, mejor es la penetración de la señal en paredes y objetos. El tipo de modulación empleado es Offset-QPSK, en donde los datos digitales están en la fase de la señal. Los métodos de comunicación inalámbrica toman ventaja de las técnicas de espectro disperso en secuencia directa (DSSS) o espectro disperso en secuencia paralela (PSSS), las cuales ayudan a mejorar el desempeño de los receptores en ambientes de multitrayectoria. [8]

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

2.7 Interoperabilidad, tipos de dispositivos y roles de dispositivos

Es importante que los dispositivos basados en ZigBee de varios fabricantes puedan interactuar con los de otros fabricantes, es decir, deben ser interoperables. La interoperabilidad es una de las ventajas clave de la pila de protocolos de ZigBee. Los dispositivos ZigBee son interoperables aun cuando los mensajes estén encriptados por razones de seguridad.

Hay dos tipos de dispositivos en una red inalámbrica IEEE 802.15.4: dispositivos de función completa (FFD) y dispositivos de función reducida (RFD). Un FFD es capaz de hacer todas las tareas descritas en el estándar IEEE 802.15.4 y puede aceptar cualquier rol en la red. Un RFD, por otro lado, tiene capacidades limitadas. Un FFD se puede comunicar con cualquier dispositivo en la red pero un RFD solo puede hablar con un FFD. Un FFD puede adoptar tres distintos roles: coordinador, coordinador de PAN, y dispositivo. Un coordinador es un dispositivo FFD que es capaz de pasar mensajes. Si el coordinador es también el controlador principal de una PAN, se llama coordinador PAN. Si un dispositivo no actúa como coordinador, es simplemente un dispositivo. El estándar ZigBee usa la terminología de coordinador, router y dispositivo final. Un coordinador ZigBee es un coordinador PAN IEEE 802.15.4. Un router ZigBee es un dispositivo que puede actuar como coordinador IEEE 802.15.4. Un dispositivo final ZigBee es un dispositivo que no es coordinador ni router, y es aquel con el menor tamaño de memoria y menores capacidades de procesamiento. [8]

2.8 Topologías de redes ZigBee

La capa de red es la que maneja la formación de redes, las cuales se encuentran en diferentes topologías. En la topología de estrella, (Figura 2.1), cada dispositivo en la red se puede comunicar con el coordinador PAN. Cuando el coordinador PAN es activado y empieza a establecer la red, lo primero que hace es escoger un identificador PAN único que no se use por otra red en la región alrededor del dispositivo en la que su esfera de radio se pueda comunicar con otros. Es decir, se asegura que no se reúsen los identificadores PAN.



Figura 2.1 Topología de estrella [8]

En una topología peer-to-peer, cada dispositivo se puede comunicar directamente con otro dispositivo si los dispositivos están lo suficientemente cercanos para establecer un enlace de

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

comunicación exitoso. Cualquier FDD en una red peer-to-peer puede jugar el rol de coordinador PAN. Una forma de decidir quién será el coordinador PAN es tomar el primer dispositivo FFD que se empiece a comunicar como el coordinador PAN. Todos los dispositivos que liberan mensajes son FFDs. Los RFDs pueden ser parte de la red y solo se comunican con un dispositivo en particular (un coordinador o router) en la red. Si no hay restricción de los dispositivos la red peer-to-peer se conoce como topología de malla, como en la Figura 2.2.

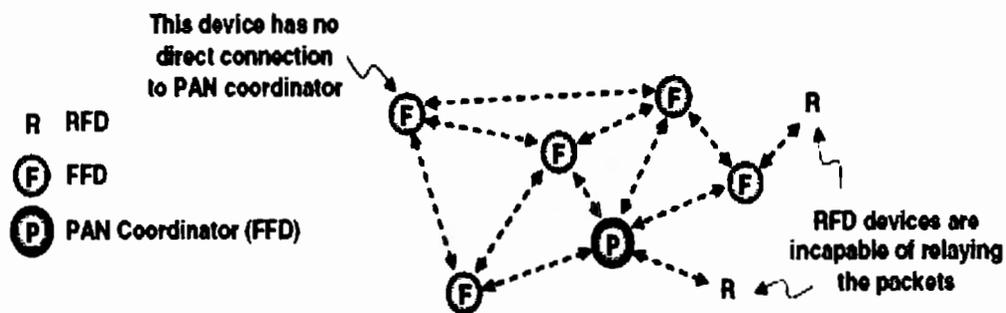


Figura 2.2: Topología de red en malla [8]

Otra forma de red ZigBee peer-to-peer es una topología de árbol, en la cual un coordinador ZigBee (coordinador PAN) establece la red inicial. Los routers ZigBee forman las ramas y liberan los mensajes. Los dispositivos finales actúan como hojas del árbol y no participan en el enrutamiento de mensajes. En estas redes se hace "multihopping" para alcanzar a dispositivos muy alejados, ya que un mensaje salta de un nodo a otro hasta alcanzar su destino. [8]

Una red IEEE 802.15.4, independientemente de la topología, siempre es creada por un coordinador PAN, el cual controla la red y hace las siguientes tareas elementales:

- Asigna una dirección única (16 bits o 64 bits) a cada dispositivo en la red.
- Inicia, termina y enruta los mensajes a través de la red.
- Escoge un único identificador PAN para la red. Este identificador permite a los dispositivos dentro de una red usar el método de direccionamiento corto de 16 bits y poderse seguir comunicando con otros dispositivos a través de redes independientes.

Como a menudo un coordinador PAN requiere tener periodos activos largos; usualmente se conecta a una fuente principal en vez de una batería. Todos los otros dispositivos se alimentan comúnmente con batería. La red más pequeña posible incluye un coordinador PAN y un dispositivo. [8]

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

2.9 Fundamentos de comunicaciones en ZigBee

IEEE 802.15.4 implementa un método simple para permitir a varios dispositivos usar el mismo canal de frecuencia para su medio de comunicación. El mecanismo de acceso del canal es CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), en el cual siempre que un dispositivo quiera transmitir primero hace un CCA (evaluación de canal preparado) para asegurarse que el canal no está en uso por otro dispositivo. Luego, el dispositivo empieza a transmitir su propia señal. La decisión de declarar a un canal listo o no, puede basarse en la medición de la energía espectral en el canal de frecuencia de interés o detectar el tipo de señal en ocupación.

Cuando un dispositivo planea transmitir una señal, primero entra en modo receptor para detectar y estimar el nivel de la energía de la señal en el canal deseado; esta tarea se llama detección de energía (ED). En ED, el receptor no trata de decodificar la señal, y sólo se estima el nivel de energía. Si ya hay una señal en la banda de interés, ED no determina si está o no es una señal IEEE 802.15.4. Una forma alternativa de declarar a un canal de frecuencia como listo u ocupado es detección de portadora (CS). En CS, el tipo de señal en ocupación se determina, si la señal es una señal IEEE 802.15.4, el dispositivo puede decidir considerar al canal como ocupado aún si la energía de la señal está debajo de un umbral definido por el usuario. Si el canal no está listo, el dispositivo se retrasa un periodo aleatorio y reintenta nuevamente. El retraso aleatorio y el reintento se repiten hasta que cualquier canal esté listo o el dispositivo alcance su máximo número de intentos definidos por el usuario.

Existen dos métodos para acceso al canal: basado en contención o libre de contención. En el acceso de canal basado en contención, todos los dispositivos que quieren transmitir en el mismo canal de frecuencia usan el mecanismo CSMA-CA, y el primero que encuentra al canal listo, empieza a transmitir. En el método libre de contención, el coordinador PAN dedica una ranura específica de tiempo a un dispositivo en particular. Esto se llama GTS (guaranteed time slot). Para proveer un GTS, el coordinador PAN debe asegurarse que todos los dispositivos en la red estén sincronizados. El beacon es un mensaje con un formato específico que es usado para sincronizar los relojes de los nodos en la red. Un coordinador tiene la opción de enviar señales beacon para sincronizar a los dispositivos conectados a éste; esto se conoce como PAN con beacons habilitados. La desventaja de los beacons es que todos los dispositivos en la red se deben levantar en una base regular, escuchar al beacon, sincronizar sus relojes y regresar al estado de sleep. Esto implica que muchos dispositivos se levantarían solo para sincronizarse y no harían otra tarea mientras están activos. Así, la vida de la batería se ve reducida. [8]

Existen tres tipos de transferencia de datos en IEEE 802.15.4:

- Transferencia de datos de un dispositivo a un coordinador.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Transferencia de datos de un coordinador a un dispositivo.
- Transferencia de datos entre dos dispositivos peer.

En una topología peer-to-peer se pueden usar estos tres métodos. En una topología estrella sólo se usan los dos primeros. En una red con beacons, cuando un dispositivo quiere transmitir datos al coordinador, el dispositivo sincroniza su reloj en una base regular y transmite los datos al coordinador usando el método CSMA-CA. El coordinador reconocería la recepción de dato sólo si es solicitada por el transmisor de datos. El diagrama de secuencia se muestra en la Figura 2.3(a). En la Figura 2.3 (b), el dispositivo transmite tan pronto como el canal está listo. La transmisión de un ACK por el coordinador PAN es opcional. [10]

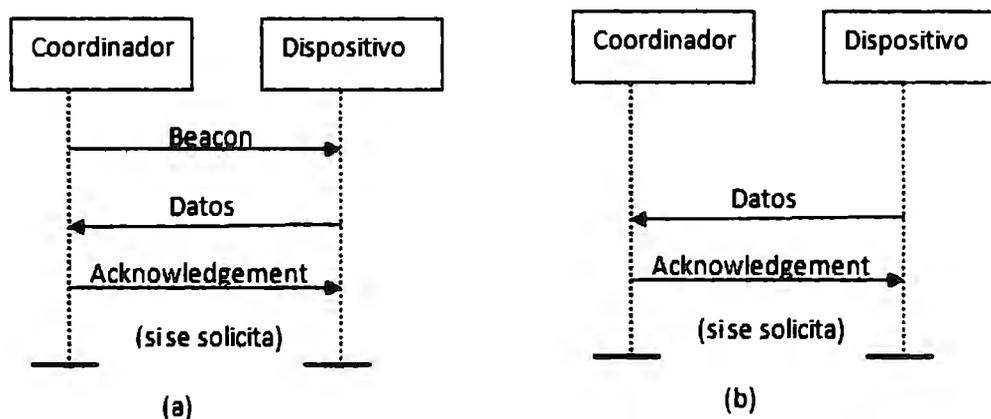


Figura 2.3: Transferencia de datos a un coordinador en IEEE 802.15.4 (a) con beacon, y (b) sin beacon [8]

La Figura 2.4(a) ilustra los pasos de transmisión de datos para transferir datos de un coordinador a un dispositivo en una red con beacons. Si el coordinador necesita transmitir datos a un dispositivo particular, indica en su mensaje beacon que un mensaje de datos está pendiente para ese dispositivo. El dispositivo luego envía un mensaje de petición de datos al coordinador indicando que está activo y está listo para recibir los datos. El coordinador reconoce la recepción de la petición de datos y envía los datos al dispositivo. El envío del "acknowledgment" por el dispositivo es opcional. En una red sin beacons (Figura 2.4 (b)), el coordinador requiere esperar a que el dispositivo solicite los datos. Si no hay dato para un dispositivo se envía un mensaje de ACK con un formato específico que indica que no hay datos para ese dispositivo (payload de longitud cero). [10]

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

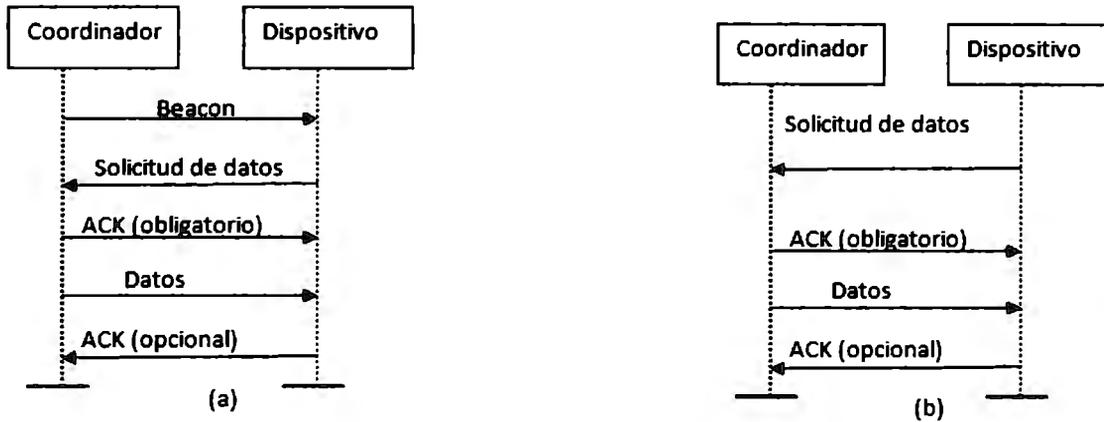


Figura 2.4: Transferencia de datos de un coordinador a un dispositivo: (a) con beacon, y (b) sin beacon [8]

En una topología peer-to-peer, cada dispositivo se comunica directamente con cualquier otro dispositivo. En muchas aplicaciones, los dispositivos están sincronizados.

Un paquete es un número de bits transmitidos juntos con un formato específico. El receptor requiere un mecanismo para verificar si cualquiera de los bits recibidos presenta error. IEEE 802.15.4 usa FCS de 16 bits basado en CRC para detectar posibles errores en el paquete de datos, asimismo usa 2 métodos de direccionamiento: direccionamiento corto de 16 bits y direccionamiento extendido de 64 bits. La dirección corta permite comunicación dentro de una red única, además de que reduce la longitud de los mensajes y ahorra memoria. La capa de red (NWK) del protocolo ZigBee asigna una dirección de 16 bits NWK además de la dirección IEEE. Una tabla simple de lookup se usa para mapear cada dirección IEEE de 64 bits a una única dirección NWK. [8]

2.10 Asociación y disociación

La asociación y disociación son servicios provistos por IEEE 802.15.4 para permitir a los dispositivos unirse o abandonar una red. Cuando un dispositivo se quiere unir a una PAN, envía una petición de asociación al coordinador, el cual puede aceptarla o rechazarla. Un dispositivo usa la disociación para notificar al coordinador de su intento de abandonar la red. El enlazado ("binding") es la tarea de crear enlaces lógicos entre las aplicaciones relacionadas; por ejemplo, un dispositivo ZigBee conectado a una lámpara está relacionado lógicamente a otro dispositivo ZigBee conectado al switch que controla la lámpara. La información sobre estos enlaces lógicos se almacena en una tabla de "binding". [8]

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

2.11 Autoformación de ZigBee y características de autocuración

En una red de malla, el primer dispositivo FFD que empieza la comunicación puede establecerse a sí mismo como el coordinador ZigBee, y los otros dispositivos se unen a la red enviando peticiones de asociación. Ya que no se requiere una supervisión adicional para establecer una red, las redes ZigBee se consideran redes de autoformación. Por otro lado, cuando se establece una red de malla, normalmente hay más de una forma para enviar un mensaje de un dispositivo a otro, siendo la más óptima la de enrutar el mensaje. Si un router deja de funcionar por el gasto de la batería o por la presencia de un obstáculo, la red puede escoger una red alternativa, por esto se dice que la red es auto-curativa.

2.12 Capas del protocolo IEEE 802.15.4

La capa menor es la capa física (PHY), la cual controla directamente y se comunica con el transceptor de radio y escoge el canal de frecuencia. Los comandos y datos son comunicados en forma de paquetes. La estructura general de un paquete se muestra (Figura 2.5). El paquete PHY tiene 3 componentes: el SHR (encabezado de sincronización), PHR (encabezado PHY) que contiene información de longitud de trama, y el payload que incluye datos o comandos.

La trama MAC tiene 3 componentes: el MHR (encabezado MAC) tiene información de direccionamiento y de seguridad. El payload de MAC contiene comandos o datos, y el MFR (MAC footer) tiene un FCS (Frame Check Sequence) de 16 bits para verificar datos. La trama NWK tiene un encabezado NWK (NHR) que tiene direccionamiento a nivel de red e información de control, y el payload NWK, provisto por la subtrama APS. En la subtrama APS, el AHR (encabezado APS) tiene control de capa de aplicación e información de direccionamiento. El HDR auxiliar contiene el mecanismo usado para dar seguridad a la trama. El payload APS tiene datos o comandos, y el MIC es un feature de seguridad para detectar cualquier cambio no autorizado en el contenido del mensaje.

La capa MAC es responsable de generar los beacons y proveer los servicios de asociación y disociación. Hay 4 estructuras de trama MAC: beacon, de datos, acknowledge y de comandos MAC. La trama beacon es usada por el coordinador para enviar beacons, los cuales son usados para la sincronización de todos los relojes. Los comandos MAC son transmitidos usando una trama de comandos MAC. La capa NWK constituye la interfaz entre la MAC y el APL y es responsable de manejar la formación de la red y el enrutamiento. El enrutamiento es un proceso de escoger el camino a través del cual viajará el mensaje para llegar a su dispositivo destino. El coordinador y los routers son responsables de descubrir y mantener las rutas en la red. Un dispositivo final no puede hacer descubrimiento de rutas. La capa NWK de un coordinador ZigBee es responsable de establecer una nueva red y escoger la topología de la red. El coordinador ZigBee además asigna las direcciones NWK a los dispositivos en su red.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

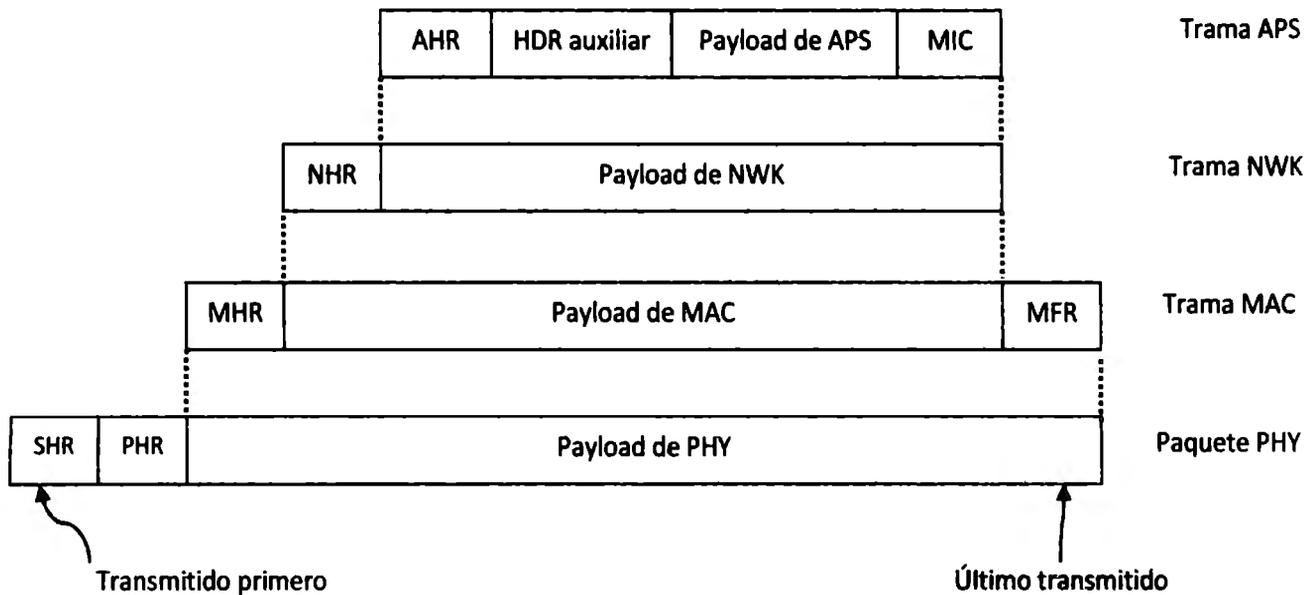


Figura 2.5: Estructura de paquete ZigBee [8]

La capa de aplicación (APL) es la capa más alta del protocolo en la red inalámbrica de ZigBee, y alberga a los objetos de aplicación. Los fabricantes desarrollan los objetos de aplicación para personalizar un dispositivo para varias aplicaciones. Los objetos de aplicación controlan y manejan las capas del protocolo en un dispositivo ZigBee. Puede haber hasta 240 objetos de aplicación en un único dispositivo. El estándar ZigBee ofrece la opción para usar perfiles de aplicación en el desarrollo de una aplicación. Un perfil de aplicación es un conjunto de acuerdos en formatos de mensaje de aplicación específica y acciones de procesamiento. El uso de un perfil de aplicación permite mayor interoperabilidad entre los productos desarrollados por diferentes vendedores para una aplicación específica. [8]

La especificación de ZigBee, que puede ser descargada, describe como una red de ZigBee trabaja como un protocolo de red. Lo que no se incluye es cómo las aplicaciones interactúan a través de los perfiles de aplicación. Para poder acceder a las especificaciones del perfil de aplicación, hay que volverse miembro del ZigBee Alliance. Los perfiles de aplicación describen el comportamiento sobre el aire de dispositivos en cada uno de los dominios de control inalámbrico. Incluyen las siguientes categorías:

- Automatización del hogar.
- Automatización de edificios comerciales.
- Monitoreo de una planta industrial.
- Aplicaciones de telecomunicaciones.
- Iniciativa de medición automática
- Hogar Personal y Cuidado de la Salud

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

2.13 El Gateway ZigBee

Un Gateway de ZigBee provee la interfaz entre una red ZigBee y otra red usando un estándar diferente (por ejemplo una red sensorial que reúna información de un paciente y la envíe vía Internet a una estación de monitoreo). El Gateway implementa el protocolo ZigBee y el protocolo IP para hacer la traducción de paquetes ZigBee a paquetes IP o viceversa.

2.14 Seguridad en ZigBee

Para asegurar la red, ZigBee usa el estándar AES de 128 bits, que es un cifrado de bloques que encripta y desencripta paquetes en una forma tal que es muy difícil de craquear. Las razones por las que fue adoptado por ZigBee son:

- Es un estándar confiable y reconocido internacionalmente.
- Está libre de infracciones de patentes.
- Es implementable en un procesador de 8 bits, a menudo usado por ZigBee.

ZigBee provee encriptación, lo cual significa que los paquetes no pueden ser entendidos por nodos en escucha que desconocen la clave, y autenticación, lo cual significa que un nodo malicioso no puede inyectar paquetes falsos en la red y esperar que los nodos ZigBee hagan algo con ellos más que desecharlos. ZigBee ha sido muy cuidadoso en asegurar la solución de seguridad [13].

El transmisor de un mensaje usa un algoritmo para encriptar el mensaje antes de la transmisión, y solamente el receptor al que le va dirigido sabe cómo recuperar el mensaje original. El mensaje sin encriptar se conoce como texto plano. El mensaje encriptado se llama texto cifrado. Si la encriptación se hace en un bloque de datos, el algoritmo se refiere como un "block cipher". ZigBee usa un block cipher de 128 bits. En AES, cada algoritmo de encriptación es asociado con una llave. El algoritmo por sí solo es de conocimiento público y disponible a cualquiera, pero el valor de la llave en cada transmisión es mantenida en secreto. Hay varias formas para adquirir una llave de seguridad. Por ejemplo, la llave puede estar embebida en el dispositivo mismo por el fabricante. Alternativamente, un nuevo dispositivo que se une a una red puede obtener una llave de seguridad de un dispositivo designado en la red [8].

2.15 Requerimientos de transceptor (transmisor/receptor)

Bloques constructores de un transceptor típico de IEEE 802.15.4

Un transceptor provee la forma comunicación de radio para dos nodos. Los ejemplos de bloques que pueden encontrarse sobre la interfaz de radio incluyen microcontroladores, memoria;

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

ADCs y puertos I/O de propósito general. La Figura 2.7 muestra el diagrama a bloques típico de un transceptor. Una antena convierte las señales electromagnéticas en corrientes eléctricas, y viceversa. La mayoría de las antenas tienen impedancias de terminación única de 50 ohms. El acoplamiento y el filtrado son los componentes pasivos que pueden mejorar el desempeño de receptor durante el modo receptor y durante el modo transmisor pueden reducir la emisión fuera de banda de la señal de salida. El transceptor no recibe y transmite simultáneamente, por lo que la antena puede ser compartida entre los caminos receptor y transmisor por medio de un conmutador T/R. Un cristal se usa como parte de la circuitería precisa de generación de reloj y puede estar dentro o fuera del empaquetado IC. [8]

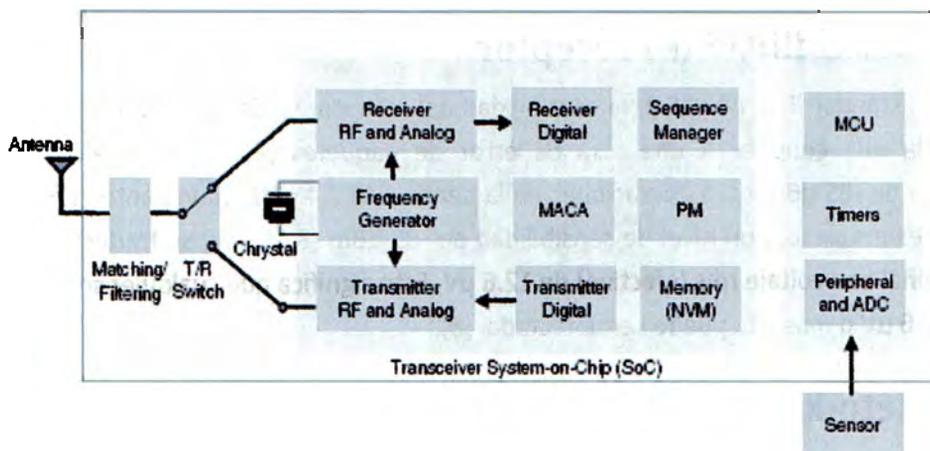


Figura 2.7: Diagrama de un transceptor típico 802.15.4 [8]

En el camino receptor, los bloques RF y analógico amplifican la señal recibida, convierten de bajada la señal a una menor frecuencia y filtran los componentes no deseados. El bloque receptor digital demodula la señal y extrae la información binaria, que es pasada al protocolo de capa física. El generador de frecuencia es responsable de proveer un reloj de referencia con alta precisión y un reloj de baja precisión para modo de operación de ahorro de potencia. Este bloque también genera una señal de frecuencia que el camino receptor usará para convertir de bajada a la señal y por el transmisor para generar la señal de salida.

En el camino transmisor, la sección digital del transmisor convierte los paquetes en señales moduladas. La porción RF del transmisor convierte en subida, amplifica y filtra estas señales [Obtenido el 19 de agosto de 2009] moduladas a la potencia de salida programable deseada y se asegura de que la señal transmitida cumpla con las regulaciones de emisión local. El administrador de secuencia (SM) es el encargado de manejar la prioridad de eventos, coordinar la temporización, y mantener el monitoreo del estado del IC en cualquier tiempo. El UART, SPI y los GPIOs son ejemplos de periféricos típicamente

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

disponibles en un transceptor IC. La mayoría de los sensores tienen salidas analógicas. Un ADC en el chip simplifica la reunión de información del sensor.

La unidad de manejo de potencia es muy simple y consta de un número de reguladores de voltaje. El MACA (acelerador de MAC) provee control de enlace físico y MAC, y puede incluir buffers para transmitir y recibir paquetes. La MACA puede reducir la carga del CPU y permitir que se ejecuten algunas funciones independientemente del procesador. Se requieren timers para proveer interrupción en tiempo real. Normalmente hay más de un timer en un transceptor. Algunas opciones de memoria son NVM, RAM y ROM. [8]

2.16 Sensibilidad del receptor

En el estándar IEEE 802.15.4, la sensibilidad del receptor se define como la menor potencia de señal recibida que conduce a una tasa de error de paquetes (PER) menor al 1%. Se requieren sensibilidades de -85 dBm para operaciones en la banda ISM 2.4 GHz. Si una antena de extremo único de 50 ohms es empleada, un nivel de sensibilidad de -85 dBm (3.16 pW) se traduce de acuerdo a $P = V^2/R$ a una señal con voltaje rms (efectivo) de 12.6 μV . Esto significa que cualquier señal recibida con un voltaje de 12.6 μV o más alta puede ser detectada. [8]

2.17 Métodos de dispersión para la operación a 2.4 GHz

La densidad espectral de potencia (PSD) es una gráfica de potencia contra frecuencia. La Figura 2.8 muestra una señal de ZigBee típica centrada en 2450 MHz (frecuencia de portadora). El ancho de banda de 3 dB se define como el rango de frecuencias por el cual la PSD de la señal cae 3 dB debajo de su valor máximo.

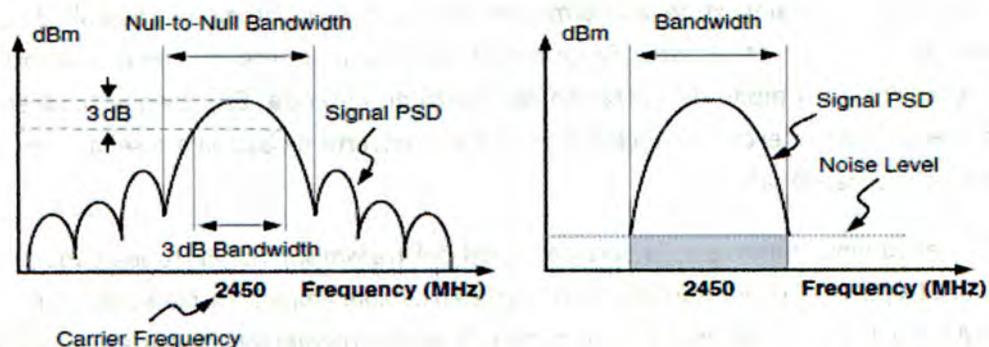


Figura 2.8: (a) Definición del ancho de banda de la señal y (b) Definición SNR [8]

Cuando el destino recibe la señal, el circuito receptor usará filtrado para remover contenido espectral fuera de la banda de interés. El ruido es modelado como una señal PSD plana (Figura 2.8 (b)).

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

La razón de la potencia de la señal contra la potencia total del ruido en la banda de interés se llama razón señal a ruido (SNR). Incrementar el SNR mejora el PER (Packet Error Rate) si el receptor no sufre de problemas de multitrayectoria.

IEEE 802.15.4 usa métodos de dispersión para mejorar el nivel de sensibilidad del receptor, incrementar la resistencia a la perturbación y reducir el efecto de multitrayectoria. El método de dispersión requerido por IEEE 802.15.4 para la banda 2.4 GHz es DSSS (espectro disperso de secuencia directa). En la implementación de DSSS, cada 4 bits de un octeto del PPDU son agrupados y referidos como un símbolo. Una tabla de lookup se usa para mapear cada símbolo a una secuencia de 32 bits (secuencia pseudoaleatoria o secuencia de chip). Cada una de las secuencias de chip se escoge mediante un procedimiento para minimizar su similitud con las otras secuencias. La similitud de dos secuencias se mide calculando la correlación cruzada de dos secuencias, que está definida por:

$$r_{xy}(0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n) \quad \dots (1)$$

Si este valor es cero, ambas secuencias son lo más contrarias posibles, y se dice que son ortogonales. Las secuencias usadas en IEEE 802.15.4 son secuencias cuasiortogonales. El ancho de banda se incrementará en un factor de 8. Mientras la señal con gran ancho de banda viaje sobre el aire, se agregarán perturbaciones y ruido no deseado. El receptor de la señal usará el método de des-dispersión para recuperar la señal original.

La des-dispersión de la señal incrementará el SNR efectivo. Este incremento en la señal mejorará directamente la sensibilidad del receptor. Esta mejora en SNR se llama ganancia de procesamiento, que es la razón entre la tasa de bit después de la dispersión contra la tasa de bit antes de la dispersión. En el caso de ZigBee, se tiene:

$$PG = 10 \log \left(\frac{2 \text{ Mbps}}{250 \text{ Kbps}} \right) = 9 \text{ dB} \quad \dots (2)$$

IEEE 802.15.4 usa la modulación OQPSK (QPSK offset) para el modo de operación 2.4GHz. QPSK permite el uso de 4 fases: 45°, 135°, -45° y -135°. Cada fase puede representar 2 bits, y la señal modulada contiene dos componentes: un componente en fase y un componente en cuadratura. Un problema importante a considerar es la forma de la PSD de la señal generada por el modulador QPSK. El espectro de frecuencia es compartido por muchos usuarios, y es importante minimizar el ancho de banda de la señal y suprimir la potencia de la señal fuera de la banda de interés. Se requiere filtrado en un modulador QPSK para dar forma a la PSD de la señal. IEEE 802.15.4 requiere el uso de ciertos filtros específicos como un filtro de coseno alzado, que son filtros de forma de pulso, que modifican la forma de pulsos binarios. Otro posible problema con el modulador QPSK es el máximo desfaseamiento de $s(t)$

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

cada vez que un nuevo par de bits entran al modulador. Los cambios abruptos en la fase pueden causar variaciones largas de amplitud en $s(t)$. Con lo cual, hay que modificar el esquema QPSK a uno OQPSK (off-set QPSK) para limitar el máximo desfase abrupto en $s(t)$.

En OQPSK, hay un offset de tiempo igual a la mitad del periodo del pulso entre los pulsos de fase y cuadratura. Esta pequeña diferencia entre OQPSK y QPSK limitará la máxima desviación de fase instantánea de una señal modulada usando OQPSK a 90° ; esta opción hace a OQPSK para muchas implementaciones prácticas. La Figura 2.9 muestra las operaciones en un transmisor para la operación de ZigBee en la banda de 2.4 GHz.

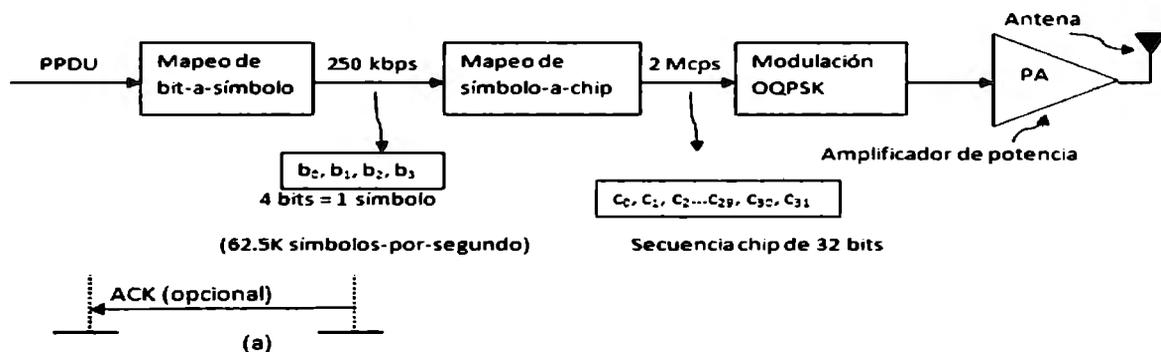


Figura 2.9: Esparcimiento y modulación para 2.4 GHz [8]

2.18 Pérdida por trayectoria

En el establecimiento de la red inalámbrica, una pregunta importante es qué tan lejos pueden estar dos nodos para poder mantener una conexión confiable. Esto depende de parámetros como sensibilidad del receptor, potencia de salida del transmisor, frecuencia de la señal y el entorno de propagación. En el espacio vacío la potencia de la señal recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación, además es función de la frecuencia. En un entorno de espacio libre, la potencia de la señal (en dBm) a una distancia "d" del transmisor está dada por:

$$P_d = P_0 - 20\log(f) - 20\log(d) + 27.56. \quad \dots(3)$$

Donde P_0 es la potencia inicial de la señal. Un incremento de frecuencia reduce la potencia de la señal. Si una antena operando en 2450 MHz transmite una señal de 0 dBm, en el receptor a 10 metros, la potencia se reducirá a -60 dBm.

En un entorno más real, como en una casa, la ecuación descrita no es conveniente, porque parte de la señal transmitida será absorbida por materiales, se reflejará varias veces por varios objetos,

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

y versiones retardadas de la señal se agregarán a la señal, lo cual hará variar los niveles de potencia de la señal. Experimentalmente [8] se ha mostrado que la ecuación de potencia recibida se expresa como:

$$P_d = P_0 - 10n \log(f) - 10n \log(d) + 30n - 32.44 \quad \dots(4)$$

En donde n es el exponente de pérdidas de trayectoria, que se ha determinado experimentalmente, de acuerdo a la siguiente tabla [8 y 11]:

N	Entorno
2	Espacio libre
1.6 a 1.8	Dentro de un edificio, línea de vista
1.8	Tienda de abarrotes
1.8	Edificio de fábrica de papel/cereal
2.09	Una sala de conferencia típica de 15 m x 7.6 m con mesa y sillas
2.2	Tienda
2 a 3	Dentro de una fábrica, sin línea de vista
2.8	Interiores residenciales
2.7 a 4.3	Dentro de una oficina típica de un edificio, sin línea de vista.

Tabla 2.2: Exponentes de pérdidas de trayectoria, determinados experimentalmente.

Un factor de “n” mayor debilita más a la señal.

Cuando una señal penetra a un objeto, parámetros como la temperatura, frecuencia de la señal y constante de atenuación de la señal, determinarán cuánto se atenúa una señal. Las señales de menor frecuencia penetran mejor los materiales comparadas a las señales de mayor frecuencia. La penetración de la señal en un objeto depende del ángulo al cual la señal golpee la superficie del objeto.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

2.19 Problemas asociados con la propagación de señales

- *Reflexión*: ocurre cuando una onda electromagnética incide sobre un objeto que tiene muy largas dimensiones en comparación con la longitud de onda de la señal. Ocurren en la superficie de la tierra, y por paredes y edificios [11].
- *Difracción*: ocurre cuando la trayectoria entre el transmisor y receptor es obstruida por una superficie que tiene irregularidades afiladas (esquinas). Las ondas secundarias que resultan de la superficie obstructora están presentes a través del espacio y aún detrás del obstáculo, dando lugar al desvío de ondas alrededor del obstáculo, aun cuando no haya un camino de línea de vista entre transmisor y receptor. En altas frecuencias, la difracción, así como la reflexión, dependen de la geometría del objeto así como de los parámetros de la señal. [11]
- *Refracción*: Cuando una señal RF cruza la frontera entre medios de dos diferentes densidades, sufre una refracción. Una señal refractada tendrá un ángulo diferente al de la original, y la velocidad de la onda se modifica. Una señal puede ser refractada cuando pasa a través de capas de aire que tienen diferentes densidades o a través de paredes de edificios con diferentes densidades. [22]
- *Scattering o dispersión*: ocurre cuando el medio a través del cual viaja la onda consiste de objetos con dimensiones que son pequeñas en comparación con la longitud de onda, y cuando el número de obstáculos por unidad de volumen es largo. Las ondas dispersadas son producidas por superficies ásperas, objetos pequeños y otras irregularidades en el canal. En la práctica, el follaje, los avisos en las calles, y postes de lámparas inducen el scattering en un sistema móvil de comunicaciones. [11]
- *Propagación multitrayectoria*: La presencia de objetos que provocan reflexión y dispersión en el canal crean un entorno variante en el tiempo que disipa la energía de la señal en amplitud, fase y tiempo. Estos efectos resultan en múltiples versiones de la señal transmitida que llegan en la antena receptora, desplazados con respecto a otro en tiempo y orientación espacial. La fase aleatoria y amplitudes de los diferentes componentes multitrayectoria, causan fluctuaciones en el nivel de la señal, induciendo desvanecimiento en pequeña escala o distorsión de la señal. [11]
- *Canal de desvanecimiento y margen de desvanecimiento*. En un entorno estacionario que no tiene ninguna multitrayectoria, la única imperfección es algún ruido adicional en banda ancha (ruido blanco). Este modelo se llama un canal AWGN (ruido blanco gaussiano aditivo). Este modelo no será exacto si existe la multitrayectoria; por lo cual se debiera usar el término de canal de desvanecimiento. El canal de desvanecimiento, a diferencia del canal AWGN, actúa

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

como un filtro selectivo de frecuencia y puede atenuar algunos de los componentes de frecuencia de la señal transmitida. Si la atenuación es muy alta, se dice que la señal está en desvanecimiento profundo. En el diseño de un sistema inalámbrico, a veces es necesario dejar un margen para tomar en cuenta el efecto de desvanecimiento. Esto se llama margen de desvanecimiento y su valor se determina experimentalmente. Por ejemplo, si la sensibilidad de un receptor es de -95 dBm y el margen de desvanecimiento recomendado para un entorno particular es 8 dB, el nivel de sensibilidad de -87 dBm debe ser usado en todos los cálculos del nivel del sistema. Se tiene un margen de desvanecimiento típico de 6 dB a 10 dB en aplicaciones de interiores. [8]

2.20 Consideraciones de selección de antenas

Un dispositivo inalámbrico tiene una antena que convierte las corrientes eléctricas generadas por los circuitos transceptores en ondas electromagnéticas y viceversa. Escoger la antena adecuada para la aplicación correcta mejora el desempeño y rango de los nodos inalámbricos [8]. Una antena isotrópica u omnidireccional radia uniformemente en todas direcciones, y aunque no existe idealmente, se usa como punto de referencia para comparar varias antenas. Una antena direccional tiene mayor fuerza de la señal en cierta dirección que en otras. La ganancia de una antena es la razón de la fuerza de la señal en la dirección de la radiación más fuerte contra la de una antena isotrópica. Una antena direccional con ganancia positiva en ciertas direcciones presentará ganancia negativa en otras direcciones. De acuerdo al principio de reciprocidad de las antenas, la ganancia de una antena es igual en modo transmisor que en receptor. La ganancia varía con la frecuencia; cada antena se diseña para entregar una máxima ganancia en ciertas bandas de frecuencia.

Una gráfica útil para comparar diversas antenas es la gráfica del patrón de radiación. Para una antena isotrópica ideal, la ganancia es un círculo con valor 0 dBi. Para cualquier antena práctica, la ganancia de la antena varía a diferentes ángulos de la antena. La ganancia puede exceder 0 dBi a ciertos ángulos, pero en otros cae debajo de ese valor para asegurarse que la suma de la ganancia de la antena en todos los ángulos no exceda la ganancia de una antena isotrópica. La eficiencia de radiación de una antena se define como la razón de la potencia disipada en el espacio contra la potencia neta entregada a la antena por los circuitos transmisores.

En muchos análisis se puede reemplazar la antena con una impedancia equivalente conectada a tierra y no referirse directamente a las propiedades electromagnéticas de la antena. A menudo se especifican las impedancias de las antenas en las hojas de especificaciones. La impedancia de una antena o resistencia de radiación es la misma en modo transmisor que receptor. Muchos diseñadores de transceptores IEEE 802.15.4 sugieren el uso de impedancias equivalentes de 50 o 200 ohms. La

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

impedancia equivalente de la antena cambia con frecuencia, y debido a que un transceptor se diseña para desempeñarse óptimamente con cierta impedancia de la antena; es importante saber si la impedancia de la antena es cercana al valor recomendado por el fabricante. Para cuantificar la cercanía, se define la figura de mérito de VSWR (razón de ondas estacionarias de voltaje). El VSWR es una medida de que tan eficientemente se transfiere la potencia de RF de una fuente de potencia hacia una carga. Cuando hay un desacoplamiento de impedancia entre la fuente y la carga, una porción de la señal regresa y genera una onda estacionaria no deseada. El VSWR es la razón del máximo contra el mínimo de esta señal no deseada. En un escenario ideal, el VSWR es 1, lo cual implica que no se genera una onda estacionaria, y que el voltaje o la corriente siempre se mantienen constantes, o que hay un acoplamiento efectivo. Si una antena se usa con un transceptor de la banda ISM 2.4 GHz, la degradación en la sensibilidad del receptor debido al desacoplamiento de la antena es menor que 0.5 dB.

Para conocer más detalles sobre las antenas, es necesario recordar que una onda electromagnética tiene un campo eléctrico y magnético que se propagan a la misma velocidad, y que el campo eléctrico define cómo se polariza la onda (circular, elíptica o lineal). La polarización inicial de una onda de radio se determina por cómo la antena dirige las ondas hacia el espacio; pero el entorno y varios obstáculos como la reflexión de una superficie, pueden causar cambios en la polarización. Es importante recordar, que de acuerdo al teorema de reciprocidad de las antenas, tanto las antenas del nodo transmisor y receptor, sobre todo en aplicaciones de línea de vista, deben tener la misma polarización para maximizar la transferencia de potencia entre las 2 antenas. Algunas opciones de antenas para aplicaciones de ZigBee son:

- Antena dipolo: es una de las antenas más simples y ampliamente usadas en aplicaciones ZigBee. Consiste de 2 alambres, cada uno tiene un tamaño de un cuarto de longitud de onda de la frecuencia de operación deseada. Para la banda ISM 2.4 GHz con una longitud de onda de 12 cm, el tamaño de cada cable será de 3 cm. Como la longitud total de esta antena es de media longitud de onda, se le conoce como una antena de dipolo de media onda. El patrón de radiación de un dipolo en 3 dimensiones se asemeja a una dona.



Figura 2.10: Antena dipolo

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Antena de cuarto de onda (monopolo). Si se quita la mitad de una antena dipolo y se coloca de forma perpendicular contra un plano de tierra conductor, se produce este tipo de antena. El plano de tierra actúa como un espejo y refleja el alambre de longitud de cuarto de onda. Como resultado, la característica de propagación de una antena de cuarto de onda es similar a la de un dipolo, encima del plano de tierra. Sin embargo, no hay propagación debajo del plano de tierra.

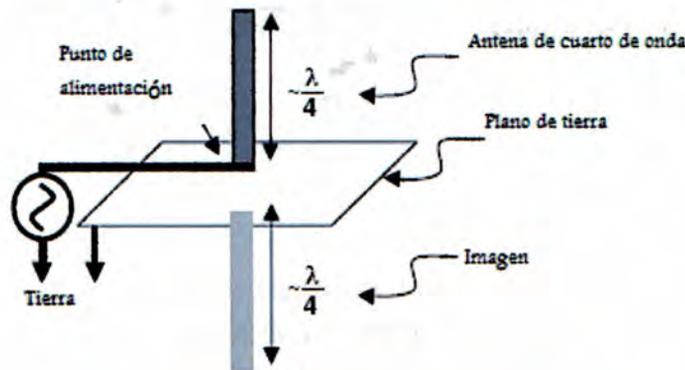


Figura 2.11: Antena (monopolo) de cuarto de onda.

- Antena tipo "tilted whip". Es una traza inclinada en un PCB con un tamaño ligeramente menor que un cuarto de onda. La longitud de la traza puede ser ajustada dependiendo del grosor del PCB y del dieléctrico. Mientras menor sea la distancia entre la traza y el ground plane, será menor la impedancia de la antena y la eficiencia. Esta distancia debe ser al menos un décimo de la longitud de onda. Esta antena tiene polarización lineal y el patrón de radiación es cercano a uno omnidireccional con ganancia de alrededor -10 dBi.

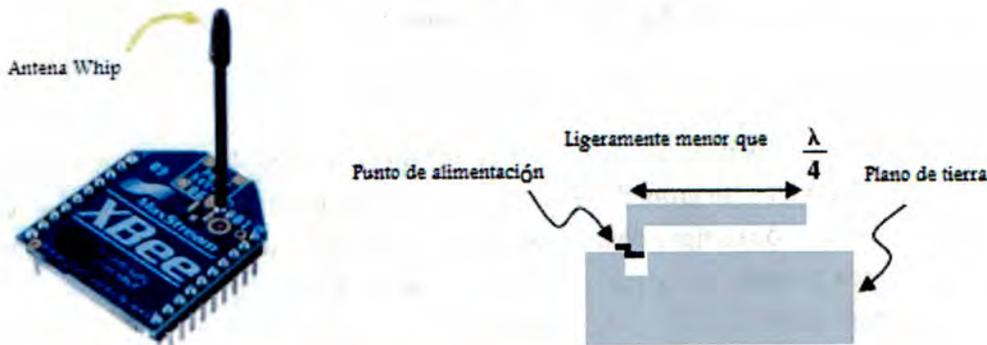


Figura 2.12: Antena "tilted whip" (con sección abierta)

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Antena F invertida: es una de las antenas comúnmente usadas en aplicaciones ZigBee debido a su simplicidad, tamaño, eficiencia y patrón de radiación casi omnidireccional. La impedancia puede ser ajustada cambiando la ubicación del punto de alimentación. La impedancia de la antena F invertida puede ser acoplada a 50Ω .

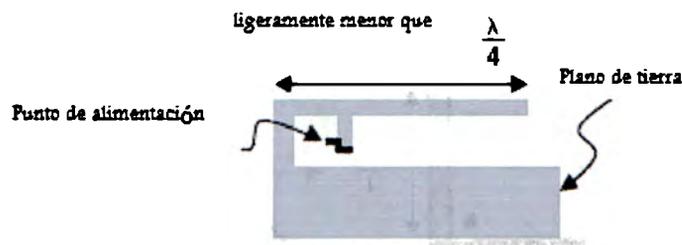


Figura 2.13: Antena F invertida

- Antena de ranura: se construye creando una ranura no conductora de aproximadamente media longitud de onda en una ranura de metal. La característica de propagación de esta antena es similar a la de una antena dipolo, pero la impedancia de la antena de ranura es alta (cientos de ohms). La impedancia de la antena es ajustada moviendo la ubicación de la alimentación. Si la antena es cortada en la mitad, se volverá una antena de ranura abierta con características de propagación similares a las de la antena monopolo.

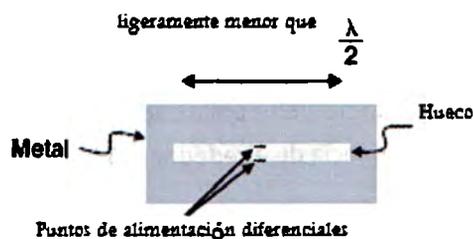


Figura 2.14: Antena de ranura de media onda

- Antenas de patch: vienen en varias formas y tamaños, y consisten de un patch de metal directamente encima de un ground plane. Su principal desventaja es su tamaño relativamente largo comparado con otros tipos de antenas. La polarización puede ser circular o lineal según el diseño del patch (metal). La mayoría de la propagación se da encima del plano de tierra y pueden tener una ganancia altamente direccional.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

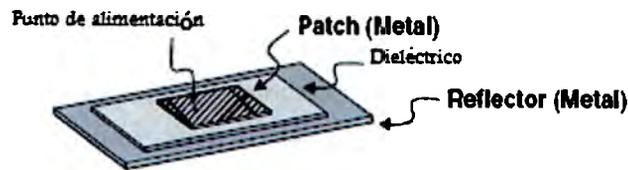


Figura 2.15: Capas básicas en una antena de patch

- Antenas de chip: son antenas montadas en una superficie de eficiencia razonable y con tamaño pequeño. Puede ser implementada como cualquiera de las antenas anteriores, pero la marca es típicamente más pequeña que la de antenas comunes. La banda de frecuencia de operación es normalmente angosta.



Figura 2.16: Antena de chip

Para conocer a detalle los patrones de radiación de las antenas de los módulos Xbee ver ANEXO I.

2.21 Coexistencia de ZigBee

La operación de ZigBee en una banda sin licencia trae el reto de compartirla con otras redes inalámbricas, con lo cual la operación de una red pudiera afectar a las otras. Algunos posibles ejemplos de posibles interferencias con las redes ZigBee son las redes inalámbricas Wi-Fi IEEE 802.11b/g, Bluetooth y algunos teléfonos inalámbricos. La coexistencia es la habilidad de operar en proximidad a otros dispositivos inalámbricos. Es decir, un sistema con capacidades de coexistencia puede hacer una tarea en un entorno compartido mientras que otros sistemas realizan sus propias tareas usando otro conjunto de reglas. El mecanismo de coexistencia ayuda a reducir la posible interferencia entre sistemas. Algunas propiedades de las redes ZigBee tales como baja potencia de transmisión RF, bajo ciclo de trabajo, el mecanismo de acceso al canal CSMA/CA ayudan a reducir el efecto de la presencia de una red inalámbrica ZigBee en otros sistemas cercanos.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Una posible fuente de interferencia para un nodo ZigBee es que otros nodos ZigBee transmitan al mismo tiempo en los mismos canales de frecuencia o en los canales adyacentes. Cada nodo ZigBee realiza un CCA antes de iniciar la transmisión durante el periodo de contención y evitará transmitir si el que canal está ocupado. De manera similar los nodos de Wi-Fi realizan CCA antes de cada transmisión, y pueden advertir la presencia de señales de otros nodos Wi-Fi. Pero las señales ZigBee tienen un menor ancho de banda y energía en comparación con las señales típicas de Wi-Fi, y el CCA desarrollado por un nodo Wi-Fi puede declarar a un canal de frecuencia como disponible cuando aún si el canal estuviera ocupado por una señal de ZigBee. En una red ZigBee habilitada con beacons, el coordinador puede asignar GTS y manejar el flujo de paquetes para reducir la posibilidad de una colisión de paquetes. Pero una red ZigBee puede no tener conocimiento del mecanismo de operación y de periodos activos de tiempo de una red cercano basado en otro estándar diferente al de ZigBee. [8]

Es importante notar que ZigBee trabaja en 16 canales, cuyas frecuencias están dadas en MHz de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_c = 2405 + 5x(k - 11) \text{ para } k = 11, 12, \dots, 26. \quad \dots(5)$$

Se pueden escoger 3 de estos canales de tal forma que no se traslapen con los canales de Wi-Fi en la banda ISM. El siguiente esquema (Figura 2.17) muestra que 4 canales ZigBee caen en las bandas de guarda de Wi-Fi, pero el problema de interferencia no es siempre totalmente resuelto ya que puede haber emisiones Wi-Fi fuera de banda. [12]

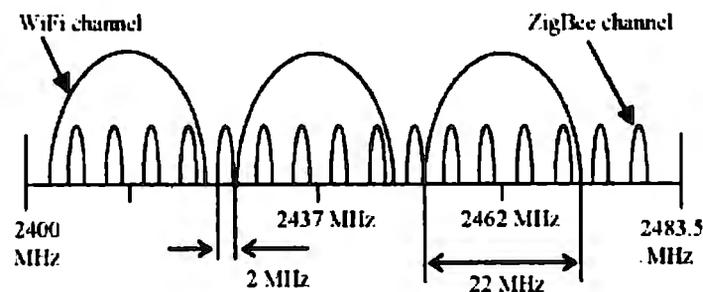


Figura 2.17: Canales de ZigBee y WiFi en la banda de 2.4 GHz [12]

2.22 Ejemplos de redes ZigBee

- *Automatización del Hogar.* La tasa de datos típica es de 10 Kbps. Se pueden tener aplicaciones como:

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- *Sistemas de seguridad.* Puede tener varios sensores, incluyendo detectores de movimiento, sensores de seguridad para vidrios y cámaras de seguridad. Los sistemas de seguridad basados en ZigBee simplifican la instalación y la actualización de sistemas de seguridad. A pesar de la baja tasa de datos, es posible transferir imágenes con calidad aceptable. [8]
- *Sistemas de lectura de métricas.* Las métricas de utilidad requieren ser leídas en una base regular para generar tarifas de utilidad. Una forma de hacerlo es leer las métricas manualmente en una casa y meter los valores a una base de datos. Un AMR (automatic meter-reading) basado en ZigBee crearía redes inalámbricas en malla a través de complejos residenciales para monitorear remotamente el uso de electricidad, gas y de agua, en una residencia. Un AMR podría hacer más que simplemente entregar los datos de uso mensual, podría juntar información de empleo, detectar automáticamente problemas y falla de equipo, y prevenir catástrofes. Los dispositivos ZigBee no solamente harían tareas de monitoreo, sino que manejarían el uso pico comunicándose con la aplicación dentro del hogar. Por ejemplo, si aumentara el uso de electricidad, un calentador de agua habilitado con ZigBee podría ser apagado por un periodo corto para reducir el consumo pico de potencia. [8]
- *Sistemas de irrigación.* Un sistema de irrigación basado en sensores podría resultar en un manejo eficiente del agua. Los sensores a través del campo pueden comunicar al panel de irrigación el nivel de humedad del suelo a diferentes profundidades. El controlador determina el tiempo de riego basado en nivel de humedad, tipo de planta, tipo de día, y estación. Una red de sensores inalámbricos elimina la dificultad de estaciones cableadas de sensores a través del campo y reduce el costo de mantenimiento. [8]
- *Sistemas de control de luz.* En la instalación tradicional de luz, para prender o apagar la luz es necesario traer un cable del foco al switch. La instalación de un nuevo foco requeriría nuevo cableado a un switch. Si el foco y el switch son equipados con dispositivos ZigBee, no se requeriría conexión cableada entre el foco y el switch. De esta forma, se le podría asignar a cualquier switch en la casa apagar y prender una luz específica. Otro ejemplo es cuando los dispositivos ZigBee integrados en los focos pueden actuar como routers para enviar un mensaje a través de la casa, o los focos pueden programarse para bajar su nivel de intensidad cuando se prenda la televisión. [8]

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- *Electrónica de consumo: control remoto.*

ZigBee puede usarse en controles remotos inalámbricos, controladores de juegos, un mouse inalámbrico para una computadora personal, y otras aplicaciones.

Un controlador remoto infrarrojo (IR) se comunica con televisiones, DVDs y otros dispositivos de entretenimiento vía señales infrarrojas. La limitación de IR es que provee solamente comunicación unidireccional del remoto al dispositivo de entretenimiento. Las señales IR no penetran paredes y otros objetos, y requieren línea de vista para operar apropiadamente. Las señales de RF pueden penetrar muy fácil. IEEE 802.15.4 es un reemplazo apropiado para tecnología IR en controles remotos debido a su bajo costo y vida larga de la batería. Con ZigBee es posible crear comunicación bidireccional entre el control remoto y el dispositivo de entretenimiento. Por ejemplo, la información de canción u opciones de programación en pantalla pueden ser descargadas en un dispositivo, aún si el control remoto no está en la misma habitación que el dispositivo de entretenimiento.

- *Automatización industrial y de procesos.* A nivel industrial, las redes ZigBee en malla ayudan en áreas como manejo de energía, control de luz y control de procesos. Una aplicación de gran ayuda es el monitoreo de ganado. El ganado es vulnerable a enfermedades, y es importante monitorear e identificar a un animal enfermo rápidamente. La respuesta rápida ante enfermedades reduce el número de productores afectados por un brote de enfermedad o eventos de salud de los animales. Se han usado tags pasivos de RFID como una solución no cara para monitoreo del ganado. Sin embargo los tags pasivos de RFID tienen rango limitado y solamente pueden proveer información previamente almacenada como un número de identificación. Los tags activos basados en ZigBee pueden costar más que los pasivos, pero los tags IEEE 802.15.4 tienen rango extendido y pueden dar información adicional como latido del corazón de los animales y la ubicación aproximada del animal. (8)
- *Cuidado de la salud.* Una aplicación es el monitoreo remoto de información vital de un paciente que, por ejemplo, debe ser monitoreado en su frecuencia cardiaca y presión sanguínea continuamente, por parte de su médico. Una red de ZigBee puede usarse para obtener datos de varios sensores conectados al paciente, y con el uso de la tecnología de 128 bits AES (Advanced Encryption Standard) es posible tener una transferencia segura de los datos. Se requeriría un Gateway para proveer la interfaz entre la red ZigBee y otras redes como la red IP. (8)

Las aplicaciones posibles de ZigBee en diferentes productos o servicios cotidianos, pueden verse resumidos a continuación (Figura 2.18).

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4



Figura 2.18: Mercados de aplicación de ZigBee [13]

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

2.23 Comparación entre tecnologías

Tecnología	Tasa de datos	Frecuencia	Ventajas	Desventajas
RFID	Hasta 4 Mbps	433 MHz 868-950 MHz 2.4 GHz	Tags pasivos y activos, lecturas rápidas y precisas	A grandes distancias, grandes requerimientos de energía, implementación complicada, sistemas cerrados
Bluetooth	Hasta 3 Mbps	2.4 GHz	Cobertura baja Basada en transceptores de bajo costo	Rango en interiores menor a 10 metros
Wi-Fi	Hasta 54 Mbps	2.4 GHz 5 GHz	Rango interno entre 30 y 100 metros	Propenso a ataques de seguridad
ZigBee	Máximo 250 Kb/s	2.4 GHz 915 MHz 868 MHz	Bajo consumo de potencia Los datos pueden ser encriptados (AES) Alcances de hasta 100 metros	Baja tasa de datos, sistemas propietarios

Figura 2.19: Comparativo entre diferentes tecnologías inalámbricas.

En la Figura 2.19 se pueden observar algunas de las ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías que se podrían utilizar en este proyecto, dadas las características y la aplicación en redes frías donde no se requieren grandes tasas de datos, pero a cambio se buscaría diferentes configuraciones de red, así como bajos consumos de energía y distintos alcances; los módulos de radiofrecuencia con tecnología Zigbee resultan adecuados.

2.24 Red Fría

La red fría está constituida por cuatro aspectos fundamentales: procesamiento de refrigeración, almacenaje, transporte y ventas.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Una red fría es una cadena de suministros la cual debe garantizar los requerimientos óptimos para crear un ambiente de baja temperatura, con el propósito de mantener íntegramente la calidad de los bienes, por lo tanto, necesita de requerimientos superiores en comparación con otras cadenas de logística. Los requerimientos de tiempo para los bienes perecederos necesitan de una mayor organización y coordinación con cada uno de los enlaces de la red fría. La logística, operación y consumos de energía siempre están asociados.

2.24.1 Administración de la red fría en hospitales

La administración de la red fría en hospitales cuenta con los siguientes parámetros para una correcta operatividad.

- **Calificación:** Proporciona pruebas de que los productos permanecen en las condiciones necesarias para mantener su integridad.
- **Mapeo de temperatura:** Identifica gradientes de temperatura, puntos máximos y mínimos y determina los intervalos del monitoreo.
- **Calibración:** Toma de los parámetros de frecuencia, tolerancia, certificados de calibración, registros y evaluación de las diferentes especificaciones.
- **Monitoreo de dispositivos:** Registros de temperatura en un determinado punto de tiempo, determina promedios de temperaturas.
- **Alarmas:** Ajuste de alarmas para altas y bajas temperaturas, pruebas continuas del funcionamiento de las alarmas, sistemas de comunicación de estos dispositivos.
- **Mantenimiento:** Evaluación de riesgos para los diferentes dispositivos, revisión de los informes de servicio, entre otros.

2.24.2 Monitoreo de la red fría de un hospital

La temperatura de los refrigeradores, congeladores, ultra congeladores e incubadoras que almacenan sangre, componentes sanguíneos, muestras o reactivos, se deberá registrar cuando menos cada ocho horas, a no ser que tengan graficador automático y un sistema de alarma audible. Los equipos se deben clasificar dependiendo de sus intervalos de temperatura tabla (2.3)

Equipo de refrigeración para aplicaciones medicas	Intervalo de temperatura
Refrigerador	+2°C a +8°C

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Congelador	0°C a -20°C
Ultra congelador	-40°C a -86°C

Tabla 2.3: Equipos de refrigeración para aplicaciones medicas

2.24.3 Transporte y mantenimiento de vacunas

La cadena fría se entiende como un conjunto de procedimientos que se necesitan para conservar, distribuir y manejar vacunas dentro de temperaturas apropiadas para garantizar su capacidad inmunogénica. Su funcionamiento marca la diferencia entre vacunar a la población en forma efectiva o con elementos biológicos inútiles. Esta diferencia implica la salud de muchos elementos de la población. La experiencia ha probado que la cadena fría no ha sido manejada apropiadamente, con lo cual se disminuye dramáticamente el poder inmunológico de las vacunas. Es así necesario que las vacunas se conserven con todo su poder inmunológico. Se da así la necesidad de que las vacunas se manipulen y transporten cuidadosamente desde el laboratorio que las produce hasta el lugar donde es suministrada.

Se tienen así las siguientes operaciones fundamentales de una red fría: almacenamiento, transporte y distribución. Los tres elementos fundamentales para cumplir con el objetivo de la cadena fría son:

- Recurso humano: son las personas que de forma directa o indirecta, pueden manipular, transportar, distribuir, vacunar o vigilar que los elementos donde se conservan y transportan las vacunas, cumplan con las condiciones dadas.
- Recurso técnico: son elementos y aparatos para almacenar y distribuir.
- Recurso financiero: para asegurar el recurso humano y material.

El almacenamiento de los biológicos en un nivel local se debe hacer en refrigeradores, y si son domésticos, es preferible que sean de una sola puerta, típicos (que generen escarcha) y con capacidad entre 9 y 11 pies. Se deben seguir algunas recomendaciones para el mantenimiento de refrigeradores y neveras domésticas, asegurando así la calidad de las vacunas:

- Instalar la nevera en sombra y lejos de toda fuente de calor, a la sombra, a 15 cm de distancia como mínimo de la pared y del techo, en una posición nivelada. Una forma de saber si hay desnivel en el piso es colocar sobre la nevera un plato con agua y observar la posición del líquido.
- Si la nevera se detiene, revisar los fusibles antes de llamar al técnico
- Verificar si el refrigerador está bien enchufado.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Todas las neveras deben tener un monitoreo térmico que consiste en un termómetro.
- Diariamente, registrar la temperatura de la nevera, en la hoja de control de temperatura de la red fría.
- Se debe tener claro cuáles son las áreas aptas de almacenamiento biológico en cada refrigerador.
- No amontonar vacunas. Dejar el espacio entre ellas para que circule aire frío entre las vacunas.
- Los frascos de vacuna se deben acomodar en bandejas, que se colocan en los estantes centrales de la nevera. No guardar vacunas en los estantes inferiores ni en la puerta. Mantener la puerta siempre bien cerrada.
- Hay que programar aseo como parte del mantenimiento preventivo periódico a cargo del responsable del equipo.

También se tienen cajas térmicas, como la que se ilustra en la siguiente imagen (Figura 2.20). Son cajas con estructura aislante de poliuretano inyectado, recubiertas con plástico u otro material similar, con cierre hermético, y con la capacidad de acomodar los paquetes fríos alrededor de las vacunas. Se usa en el transporte del nivel nacional al regional y en general si se necesitan transportar y conservar biológicos de 16 a 60 horas o más.



Figura 2.20: Capa fría

Los termos son recipientes de cortas dimensiones hecho con paredes aislantes de poliuretano y polietileno, usados para el transporte de vacunas entre el nivel central, regional y/o local. Están destinados a cumplir actividades de vacunación intra y extramural. Según su calidad, puede mantener y conservar vacunas por lapsos de 4 a 8 horas.

La planeación en el manejo de la cadena fría tiene como fin el definir y programar las acciones de las vacunas desde que se fabrican hasta su aplicación. El procedimiento de producción y distribución consiste en:

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Determinación de dosis y equipos que se requieren para transporte y conservación en cada nivel.
- Programación de vehículos, rutas y tiempos en el transporte
- Definir sistemas de almacenaje, suministro y aplicación a la población.

Se considera que hay éxito en la cobertura de vacunación si hay una estimación correcta de las dosis de vacunas requeridas, su manejo adecuado en el transporte y conservación. Un uso inadecuado en uno de estos procesos puede traer consigo graves consecuencias en el estado de la vacuna, y así en la población. Las vacunas deben mantenerse regularmente a temperatura óptima, entre 2 °C y 8 °C, desde el lugar donde se fabrican hasta el sitio donde se usan. Y como se ha visto, esto supone un desafío logístico. Si no se dispone de electricidad, se pueden usar refrigeradores o congeladores que funcionen con gas o con queroseno, o con energía solar.

2.25 Sensores y medición de temperatura.

Sin el uso de sensores, una red sensorial inalámbrica estaría fuera de lugar completamente. Ante la gran variedad de aplicaciones, es muy vasto el rango posible de sensores. Los sensores pueden ser categorizados dentro de tres categorías.

- Sensores pasivos, omnidireccionales. Estos sensores pueden medir una cantidad física en el punto del nodo sensorial sin manipular el entorno, a través de monitoreo activo – en este sentido son pasivos. Más aún, algunos de los sensores actualmente son autoalimentados en el sentido de que obtienen la energía que necesitan del entorno – la energía sólo se requiere para amplificar la señal. No hay una noción de dirección involucrada en estas mediciones. Los ejemplos típicos para tales sensores incluyen termómetro, sensores de luz, vibración, micrófonos, humedad, fuerza mecánica o tensión en materiales, sensores químicos sensibles para sustancias químicas dadas, detectores de humo, presión de aire, etc.
- Sensores pasivos, de haz angosto. Tienen una noción bien definida de dirección de medición. Un ejemplo típico es una cámara, que puede tomar mediciones en una dirección dada, pero requiere rotarse si lo necesita.
- Sensores activos. Este tipo de sensores sondea activamente el entorno, por ejemplo un sensor de sonar o radar o algunos tipos de sensores sísmicos, que generan ondas de choque por pequeñas explosiones.

La mayoría del trabajo teórico en WSNs considera sensores pasivos omnidireccionales. Una suposición a menudo hecha es que cada nodo sensorial tiene una cierta área de cobertura para la cual puede reportar confiable y exactamente la cantidad particular que está observando. Más elaboradamente,

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

un modelo de detección sensorial es usado, relacionando la distancia entre un sensor y el evento u objeto a ser detectado a una probabilidad de detección [21].

En el presente proyecto, la variable del sensor a considerar será de temperatura. Para la medición de temperatura se hará uso del chip LM35. El LM35 es un circuito integrado que funciona como sensor de temperatura, cuyo voltaje de salida es linealmente proporcional a la temperatura Celsius. El LM35 no requiere ninguna calibración externa para proveer exactitudes de $\pm 3/4$ °C sobre un rango de temperatura de -55 a 150 °C. La baja impedancia de salida del LM35, su salida lineal y la calibración inherentemente precisa hacen el proceso de interfaz para la lectura o el control de la circuitería especialmente fáciles. Puede usarse con fuentes de alimentación únicas, o con fuentes positivas y negativas. Tiene una garantía de exactitud de 0.5 °C, es adecuado para aplicaciones remotas y opera de 4 a 30 volts.

La siguiente figura muestra el sensor, así como la salida de voltaje que proporciona, y se conecta además a una resistencia, en nuestro caso de 180 K Ω , según la fórmula $R_1 = -V_s / 50\mu A$, ya que $V_s = 9$ V.

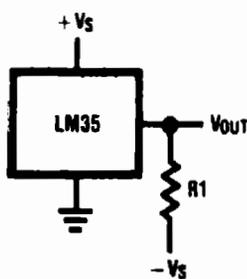


Figura 2.21: Sensor de temperatura en grados centígrados de rango completo

Para mediciones más profesionales donde se necesite mayor precisión y confiabilidad, se recomendaría el uso de termopares

2.26 Fuente de alimentación de los nodos sensoriales.

Para nodos sensoriales inalámbricos sin ataduras, la fuente de alimentación es un componente crucial del sistema. Hay esencialmente 2 aspectos: primero, almacenar energía y proveer potencia en la forma requerida; segundo, intentar reponer la energía consumida por el barrido de alguna fuente externa de alimentación a través del tiempo. El almacenaje de potencia se hace convencionalmente usando baterías.

La fuente de potencia de un nodo sensorial es una batería, ya sea no recargable ("baterías primarias"), o si un dispositivo de barrido ("scavenging") está presente en el nodo, una batería recargable ("baterías secundarias"). En alguna forma u otra, las baterías son almacenajes electroquímicos para la

Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México
Biblioteca

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

energía, siendo los químicos el factor principal determinante de la tecnología de la batería. Se imponen los siguientes requerimientos en las baterías:

- **Capacidad.** Deben tener alta capacidad a un peso pequeño, volumen pequeño y bajo precio. La métrica principal es energía por volumen, J/cm^3 . La siguiente tabla muestra algunos valores típicos de densidades de energía, usando tecnologías de batería tradicionales de macro escala.
- **Capacidad bajo carga.** Deben soportar varios patrones de uso ya que un nodo sensorial puede consumir niveles diferentes de potencia sobre el tiempo y despedir y liberar alta corriente en ciertos modos de operación.
- **Auto-descarga.** Debe ser muy baja; deben durar por mucho tiempo.

Conversión DC-DC.

Desafortunadamente, las baterías solas (u otras formas de almacenamiento de energía) no son suficientes como una fuente directa de potencia para un nodo sensorial. Un problema típico es la reducción del voltaje de la batería conforme su capacidad cae. En consecuencia, menos potencia es entregada a los circuitos de los nodos sensoriales, con consecuencias para frecuencias de oscilador y potencia de transmisión- un nodo en una batería débil tendrá un rango de transmisión más pequeño que uno con una batería llena, posiblemente arrojando cualquier calibración hecha para el rango en rangos de batería llena.

Un convertidor DC-DC puede ser usado para superar este problema regulando el voltaje entregado a la circuitería del nodo. Para asegurar un voltaje constante aunque se caiga el voltaje de alimentación de la batería, el convertidor DC-DC tiene que liberar cada vez más corriente de la batería cuando la batería se está debilitando, acelerando así la muerte de la batería. También, el convertidor DC-DC consume energía para su propia operación, reduciendo la eficiencia total. Pero las ventajas de la operación predecible durante el ciclo de vida entero pueden sobreponer estas desventajas.

2.28 Modos de operación de los módulos RF.

Hay 2 modos de operación de los módulos XBee/XBee-Pro: el transparente y el API. Por default, operan en el modo transparente. En este caso, los módulos actúan como reemplazo de línea serial – todos los datos UART recibidos a través del pin DI se ponen en cola para la transmisión RF. El API (Application Programming Interface) está basado en tramas al nivel en el que una aplicación de host pueda interactuar con las capacidades de red del módulo. En el modo API, todos los datos que entran y salen del módulo están contenidos en tramas que definen operaciones dentro del módulo. Las tramas de datos de transmisión (a través del pin DI) incluyen la trama de datos de transmisión RF y la trama de comandos. Las tramas de datos de recepción (a través del pin DO) incluyen la trama de datos RF recibidos, la respuesta de comandos y notificación de eventos. La operación en modo API facilita muchas operaciones como el transmitir datos a múltiples destinos sin entrar al modo comando, recibir

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

estatus de éxito/falla de cada paquete RF transmitido e identificar la dirección fuente de cada paquete recibido.

Se hicieron las pruebas correspondientes, conectando los módulos al circuito con el sensor de temperatura antes descrito, para verificar que la temperatura se fuera modificando al ir ocurriendo cambios. La trama básica de recepción se aprecia a continuación.

7E 00 14 92 00 13 A2 00 40 32 98 76 00 01 01 01 04 40 01 00 40 00 C5 EB

Trama	Offset	Resultado	
Delimitador de inicio	0	0x7E	
Longitud	MSB1	0x00	
	LSB2	0x14	
Tipo de trama	3	0x92	
Información específica de la trama	Dirección origen 64-bit	MSB4	0x00
		5	0x13
		6	0xA2
		7	0x00
		8	0x40
		9	0x32
		10	0x98
		LSB11	0x76
	Dirección origen 16-bit	LSB12	0x00
		LSB13	0x01
	Opciones de recibo	14	0x01
Número de muestras	15	0x01	
Mascara canal digital	16	0x04	
	17	0x40	
Mascara canal analógico	18	0x01	
Muestreo digital	19	0x00	
	20	0x40	

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

		Muestreo analógico	21	0x00	Medición analógica
			22	0xC5	
Suma de control			23	0xEB	Suma de bits

Tabla 2.4: Trama de recepción de módulos XBee

3.28 Convertidores analógicos-digitales.

El sensor es un dispositivo que genera una señal en respuesta a un estímulo físico como presión, temperatura o movimiento. La salida de un sensor usado en una WSN es típicamente cualquier voltaje analógico o su valor un voltaje analógico convertido. Este voltaje analógico necesita ser convertido a digital usando un convertidor analógico-digital (ADC) antes de que pueda ser transmitido de forma inalámbrica. Los transceptores desarrollados para las aplicaciones IEEE 802.15.4 normalmente tienen los ADC integrados. Algunas de las características del circuito ADC empleadas por nuestros módulos se enlistan a continuación:

Símbolo	Característica	Condición	Min	Típica	Máx.	Unidad
VREFH	Rango de referencia de convertidor analógico-digital		2.08	-	VDDAD	V
IREF	Corriente proporcionada por referencia	Habilitada	-	200	-	μA
		Deshabilitada o modo sleep	-	<0.01	0.02	μA
VINDC	Voltaje analógico de entrada		VSSAD-0.3	-	VDDAD+0.3	V
RES	Resolución ideal (1 LSB)	$2.08\text{V} < \text{VDDAD} < 3.6\text{V}$	2.031		3.516	mV

Tabla 2.5: Características del ADC

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Capítulo 3 Pruebas y Resultados

3.1 Desarrollo

En la primera etapa del proyecto se realizó el análisis sobre el tipo de dispositivos (módulos) que se requerirían para el desarrollo de una red sensorial. En cuanto a esto se analizaron los fabricantes que utilizan como tecnología ZigBee; se encontraron empresas como Freescale, Atmel, Microchip y Digi.

Una vez conociendo los distintos productos seleccionamos los módulos de Digi, especialmente el kit **XB24-BPDK** (Figura 3.1), los cuales brindan una gran versatilidad, accesibilidad, costo y facilidad de configuración. En el kit encontramos las tarjetas de desarrollo, los módulos, antenas, cables seriales y USB y adaptadores, también se incluye el software de configuración X-CTU para el uso de sus dispositivos de una forma más sencilla.



Figura 3.1: Kit de desarrollo ZNet 2.5 (Serie 2)

Durante la investigación se encontraron diversas aplicaciones para los módulos Xbee, por ello tratamos de buscar en cual enfocarnos. Se decidió realizar el proyecto en el monitoreo de una red fría, en su parte de almacenaje donde el principal parámetro a medir será la temperatura.

Para lo anterior en esta primera etapa se realizaron pruebas, para conocer la forma en que se configuran los módulos, los patrones de radiación, como también el nivel de la señal con línea y sin línea de vista, las cuales se detallan más adelante.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

3.2 Herramientas

3.2.1 Programa X-CTU

X-CTU es un software diseñado para configurar y probar los radio módems de la empresa MaxStream (Digi). La distribución de este software es gratuita y se puede descargar desde la página oficial de Digi.

X-CTU sólo puede ser instalado y ejecutado en plataformas basadas en Windows. Este programa fue diseñado para interactuar con el Firmware de los dispositivos de radio frecuencia de la empresa Digi y para proveer de una interfaz gráfica simple de usar para el usuario final.

Algunas de las principales características de esta aplicación se mencionan a continuación:

- Soporte para todos los productos de MaxStream
- Ventana de Terminal integrada
- Fácil implementación de pruebas de alcance
- Fácil visualización del RSSI
- Actualización del firmware
- Visualización caracteres en código ASCII o hexadecimal
- Detección automática del tipo de módulo
- Restauración de parámetros de fábrica
- Despliegue de ayuda para los diferentes parámetros
- Interface de línea de comandos

El programa consta de cuatro pestañas principales (Figura 3.2), en las cuales se pueden realizar las configuraciones necesarias para la correcta utilización de los radio módulos.

- **PC Settings:** permite al usuario seleccionar y configurar correctamente el puerto COM donde se instalaran los radio módulos.
- **Range Test:** permite al usuario realizar las pruebas de alcance entre dos radios.
- **Terminal:** permite el acceso al puerto COM de la computadora. Esta pestaña también permite acceder el firmware de los módulos mediante la utilización de comandos AT.
- **Modem Configurations:** permite configurar el firmware de los radio módulos vía una interfaz gráfica. En esta pestaña el usuario también puede cambiar las versiones de firmware del



Figura 3.2: pestañas programa XCTU

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

3.2.2 Módulos de radio frecuencia Xbee

Los radio módulos Xbee/Xbee-PRO ZNet 2.5 OEM, también conocidos como radio módulos serie 2 y serie 2 Pro (Figura 3.3) proveen conectividad serial inalámbrica entre dispositivos de una red Zigbee. En la banda de frecuencia de los 2.4GHz.



Figura 3.3: módulo Xbee

De fábrica cada módulo Xbee viene configurado con un PAN ID y configurado con una tasa de transferencia de 9600 baudios, con datos de 8 bits, sin paridad y 1 bit de paro.

Características principales:

- Alto desempeño y bajo consumo
 - Potencia de transmisión: 100 mW (20 dBm) EIRP
 - Sensibilidad de recepción: -102 dBm
 - Tasa de datos: 250 kbps
- Interconexión avanzada y seguridad
 - DSSS
 - Cada canal de secuencia directa tiene más de 65000 diferentes posibles direcciones
 - Diversas topologías soportadas
 - Auto enrutable y tolerante a fallas
- Baja potencia
 - transmisión: 295 mA
 - recepción: 45 mA
- Fácil de utilizar
 - Modos de configuración AT y API
 - Amplio set de comandos
 - Software gratuito de configuración

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Los módulos Xbee ZNet 2.5 están basados en el software EmberZNet 2.5.x, estos módulos además de estar bajo la norma Zigbee 2006, incluyen otras características necesarias para mantener una red más robusta.

Para crear una red con módulos Xbee, se debe iniciar un coordinador en un determinado canal y un identificador de PAN. Cuando el coordinador es iniciado, los Xbee bajo la configuración de routers o dispositivos finales pueden unirse a la red. La formación de estas redes se rige por los comandos SC, PAN ID, SD Y NJ.

3.3 Pruebas y Resultados

Se realizaron pruebas de comunicación con los radio módulos Xbee para comprobar el funcionamiento y las posibles topologías que se piensan utilizar en la aplicación.

Las pruebas con línea de vista se realizaron en la explanada del campus. Las de obstáculos se desarrollaron en interior del Centro de Desarrollo Tecnológico (CEDETEC). Donde el desvanecimiento por obstáculos se debió básicamente a vidrios y estructuras metálicas.

3.3.1 Prueba de comunicación de datos

Para la configuración de los Xbee, utilizamos el software X-CTU y las placas de desarrollo RS-232 (Figura3.4) y USB (Figura3.5)



Figura 3.4: Placa RS-232



Figura 3.5: Placa USB

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

3.3.2 Pruebas de comunicación entre módulos y terminal

Se realizaron las configuraciones de los puertos para la comunicación con las tarjetas de desarrollo (Figura 3.6).

Baud	9600
Flow Control	NONE
Data Bits	8
Parity	NONE
Stop Bits	1

Figura 3.6: Configuración del puerto de comunicación

Para verificar conexión del puerto de la computadora, se necesita seleccionar el puerto y presionar el botón Test / Query (Figura 3.7)

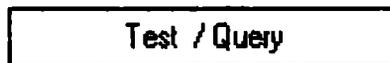


Figura 3.7: Proceso Test/Query

Si la conexión entre puerto y computadora es exitosa, se desplegará una ventana mostrándonos el modelo y firmware del dispositivo (Figura 3.8).

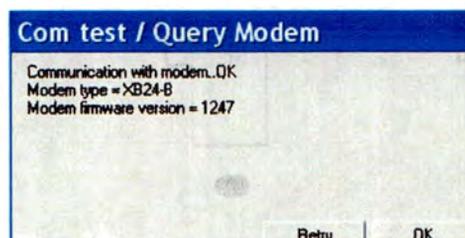


Figura 3.8: Verificación del puerto

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

La prueba de comunicación entre la terminal de la computadora (X-CTU) y los módulos Xbee se concretó satisfactoriamente.

3.3.3 Prueba de comunicación entre módulos (Xbee)

Los módulos deben configurarse con el mismo identificador de red de acceso personal (PAN ID) así como trabajar en el mismo canal (Figura 3.9).

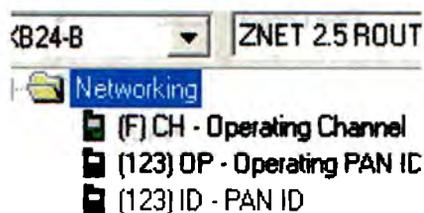


Figura 3.9: Configuraciones básicas

Para comprobar el alcance máximo de la señal así como el porcentaje de paquetes recibidos satisfactoriamente, se hicieron prueba de comunicación entre diferentes módulos con línea de vista y con obstáculos.

- Pruebas con línea de vista entre dos módulos Xbee (Serie 2):

Se realizó la conexión punto a punto con línea de vista entre dos módulos Xbee serie 2 (

Figura 10) a diferentes distancias. Observamos los paquetes recibidos y el RSSI de la señal (Figura 3.11), posteriormente se utilizó para esta misma prueba un módulo Xbee y un Xbee Pro (Figura 3.12 y Figura 3.13)

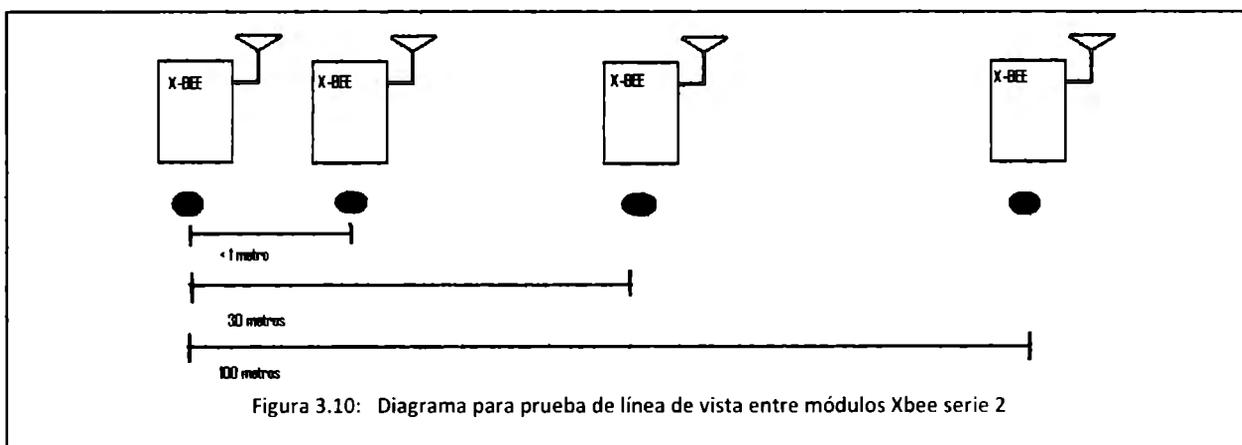


Figura 3.10: Diagrama para prueba de línea de vista entre módulos Xbee serie 2

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

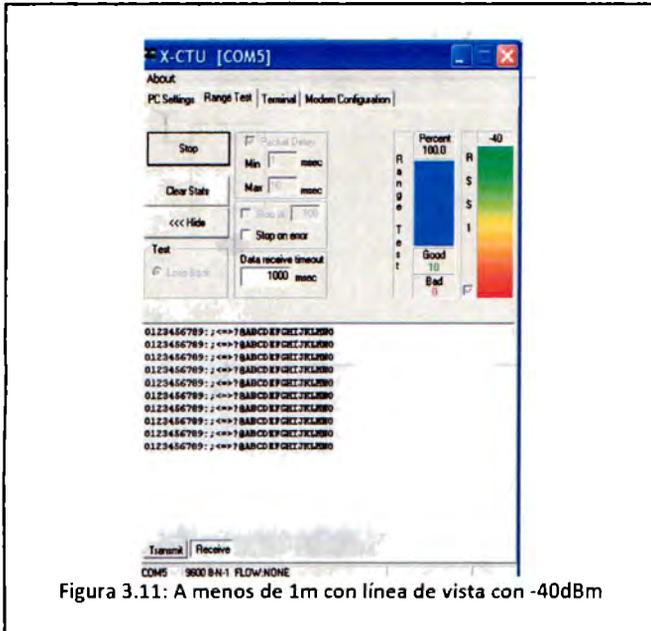


Figura 3.11: A menos de 1m con línea de vista con -40dBm

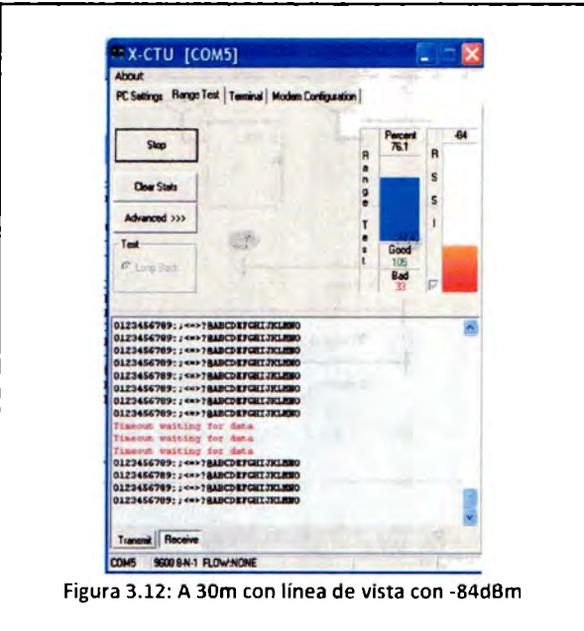


Figura 3.12: A 30m con línea de vista con -84dBm

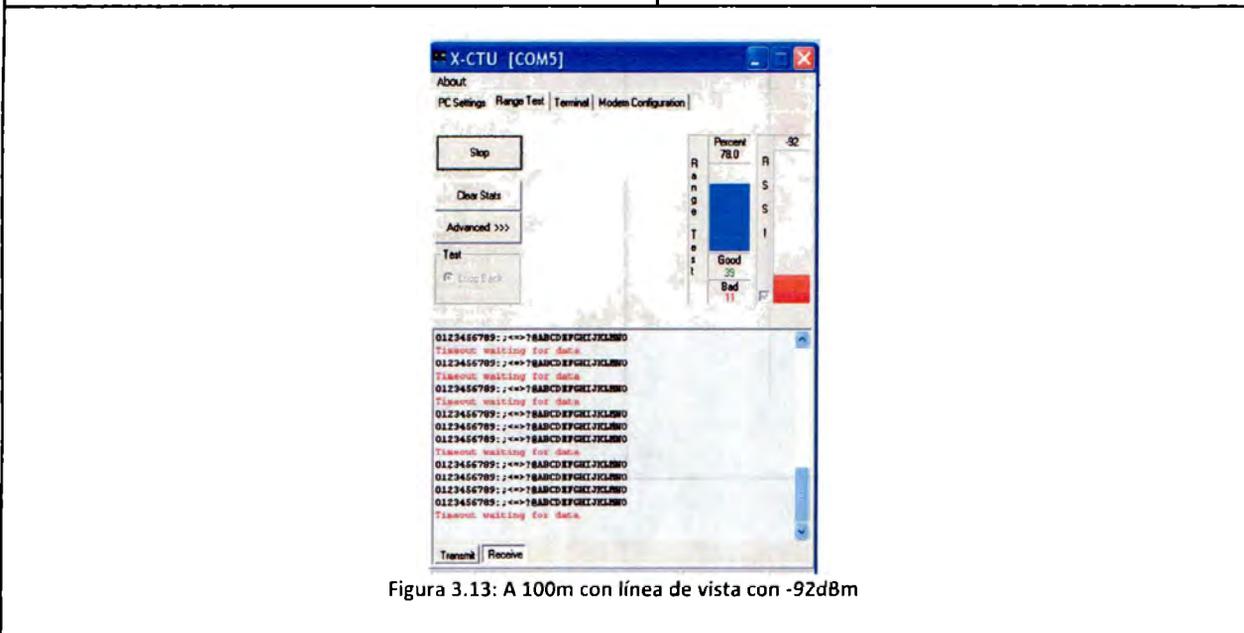


Figura 3.13: A 100m con línea de vista con -92dBm

Resultados de las pruebas con línea de vista entre dos módulos XBee (Serie 2):

Cuando se encuentran los módulos a menos de 1m se tiene un RSSI de -40dB con el 100 por ciento de los paquetes sin error. A 30m se tienen una recepción de -84dBm y un porcentaje de paquetes sin error de 76.1 por ciento. A 100m se tiene una recepción de -92dBm y 78%.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Pruebas con línea de vista entre un módulo XBee (Serie 2) y un Xbee PRO:

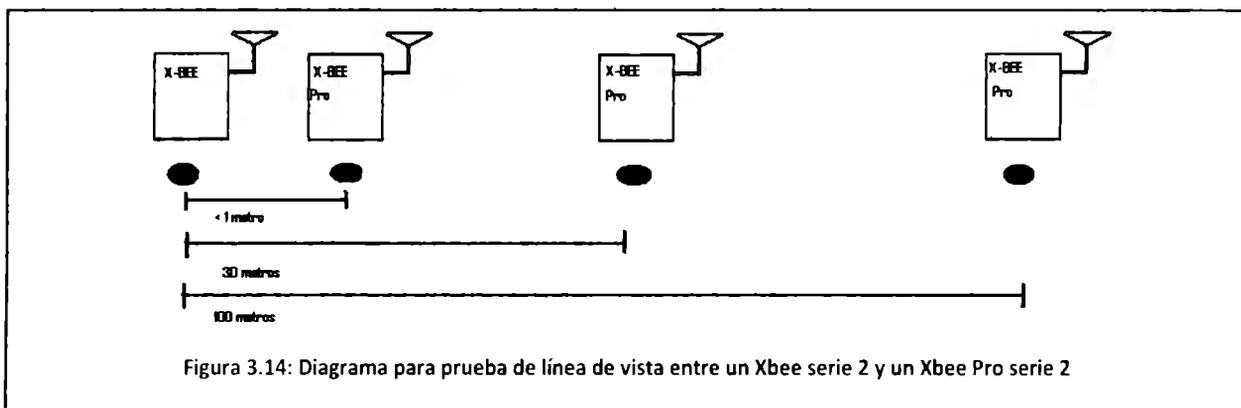


Figura 3.14: Diagrama para prueba de línea de vista entre un Xbee serie 2 y un Xbee Pro serie 2

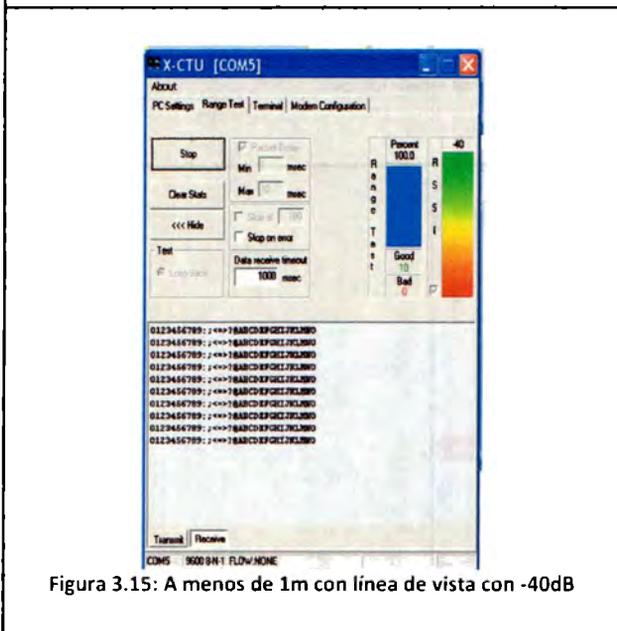


Figura 3.15: A menos de 1m con línea de vista con -40dB

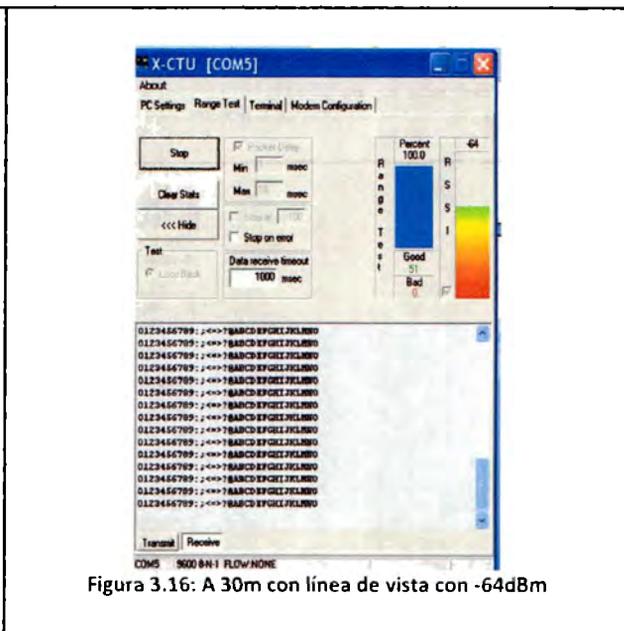


Figura 3.16: A 30m con línea de vista con -64dBm

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

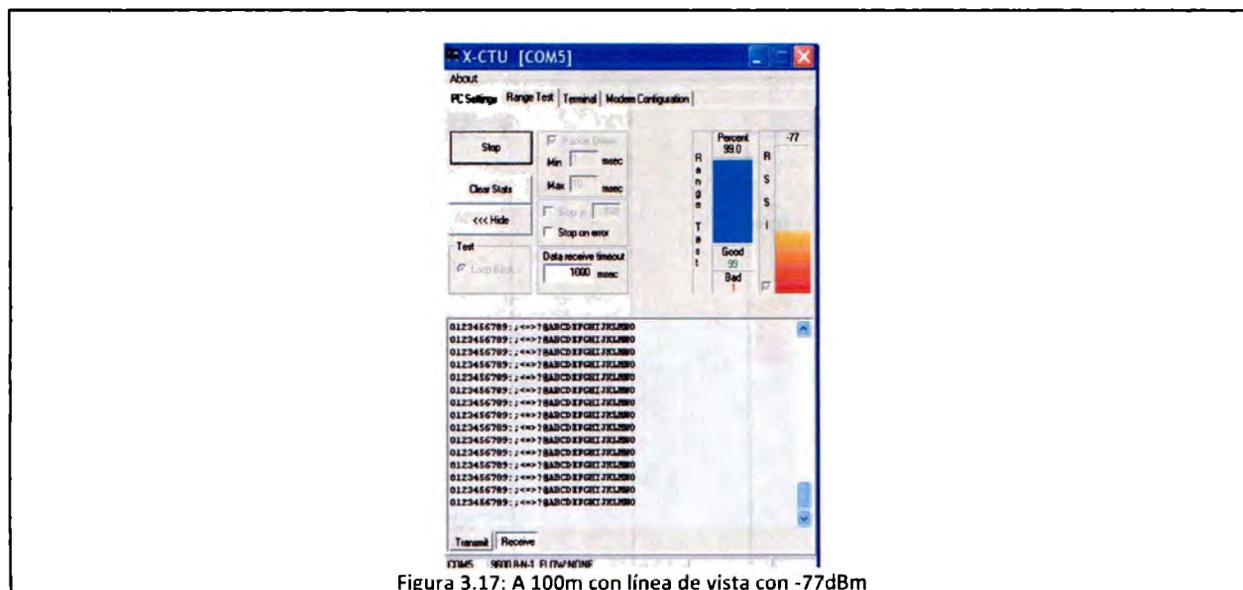


Figura 3.17: A 100m con línea de vista con -77dBm

Resultados de las pruebas con línea de vista entre un módulo XBee (Serie 2) y un XBee Pro:

Cuando se encuentran los módulos a menos de 1m se tiene un RSSI de -40dB con el 100 por ciento de los paquetes sin error. A 30m se tienen una recepción de -64dBm y un porcentaje de paquetes sin error de 100 por ciento. A 100m se tiene una recepción de -77dBm y 99%

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Pruebas con obstáculos de dos módulos Xbee (Serie 2):

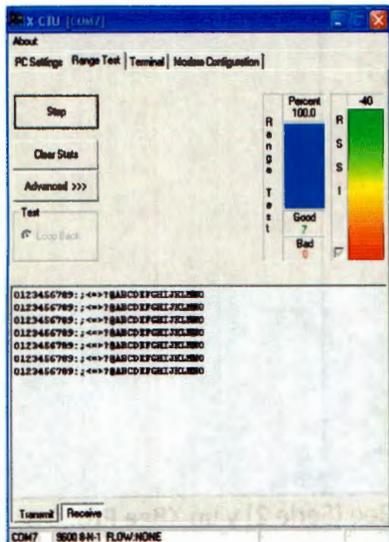


Figura 3.18: A 40cm con -40dBm

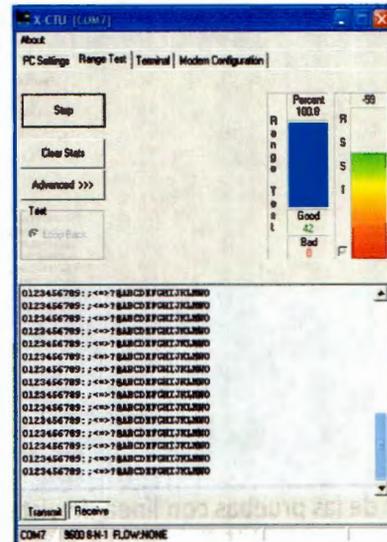


Figura 3.19: A 6m en un cuarto con -59dBm

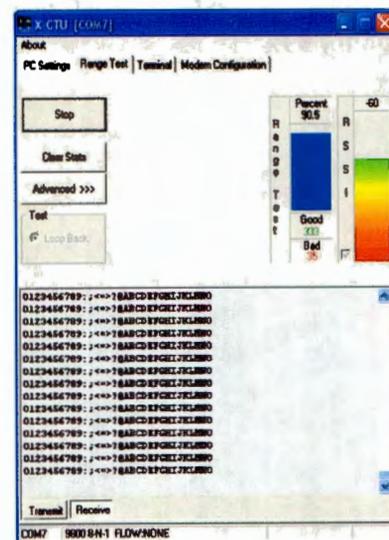


Figura 3.20: A 8m en cuarto con -60dBm

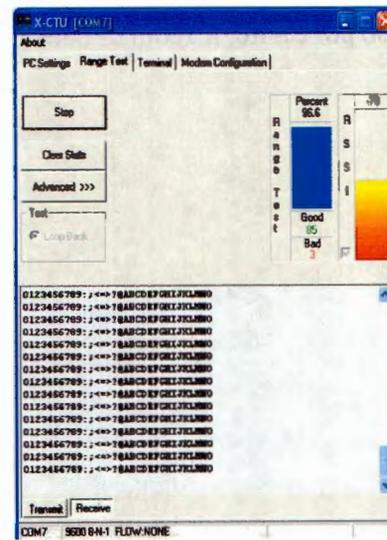


Figura 3.21: A 10m con pared de obstáculo con -70dBm

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

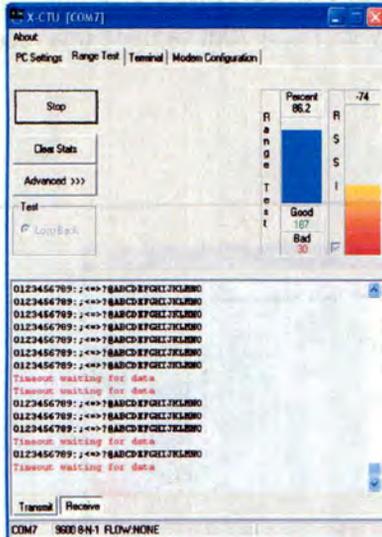


Figura 3.22: A 30m con vidrios y estructuras metálicas con -74dBm

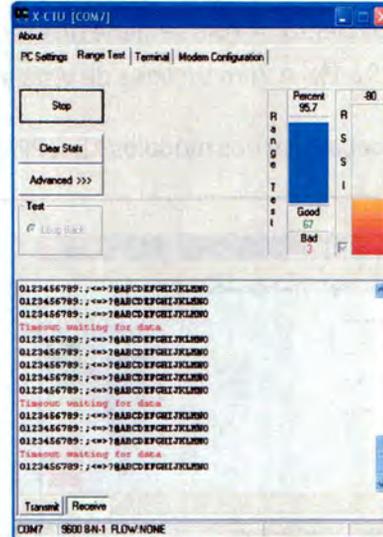


Figura 3.23: A 70m con vidrios y estructuras metálicas de obstáculo con -80dBm

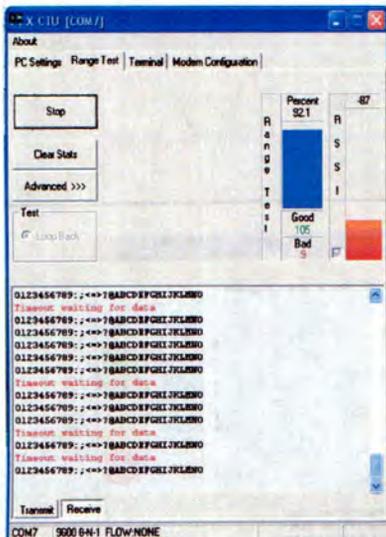


Figura 3.24: A 70m con vidrios, paredes y estructuras metálicas de obstáculo con -87dBm

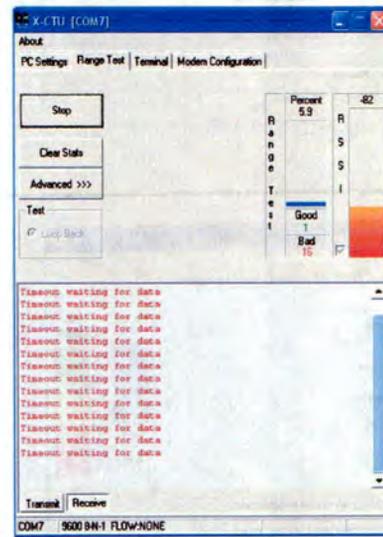


Figura 3.25: A más de 70m con vidrios, paredes y estructura metálica de obstáculo con -82dBm

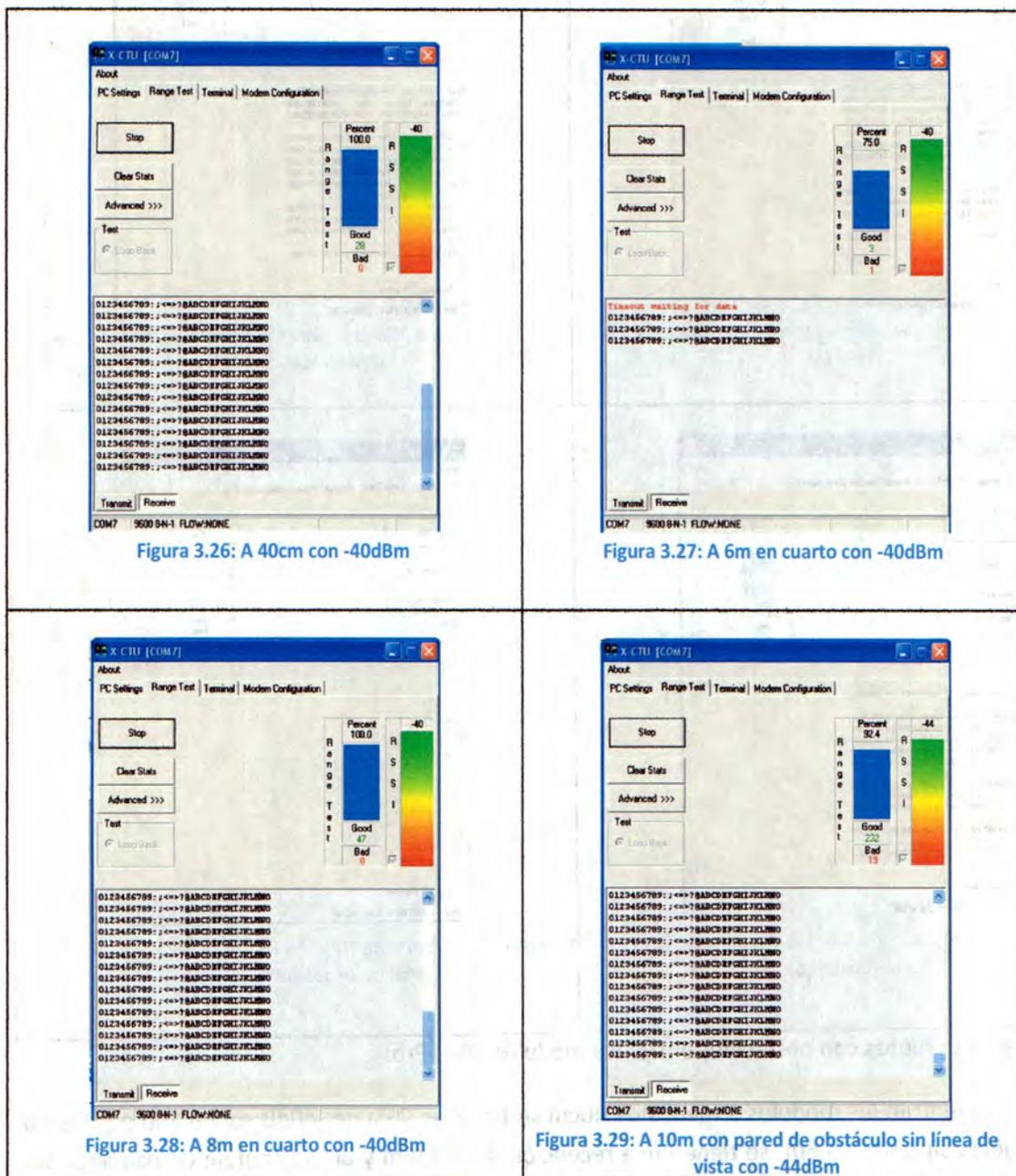
Resultados de las pruebas con obstáculos entre dos módulos XBee Pro:

Cuando se encuentran los módulos a menos de 40cm se tiene un RSSI de -40dB con el 100 por ciento de los paquetes sin error. A 6m se tienen una recepción de -59dBm y un porcentaje de paquetes sin error de 100 por ciento. A 8m se tiene una recepción de -60dBm y 96.6%. A 10m se tiene una recepción

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

de -77dBm y 99%. . A 30m se tienen una recepción de -74dBm y un porcentaje de paquetes sin error de 86.2 por ciento. A 70m se tiene una recepción de -80dBm y 95.7%. A 70m se tiene una recepción de -87dBm y 92.1%. A 70m sin línea de vista a -82dBm con 5.9%.

- Pruebas con dos módulos XbeePRO Serie 2:



Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

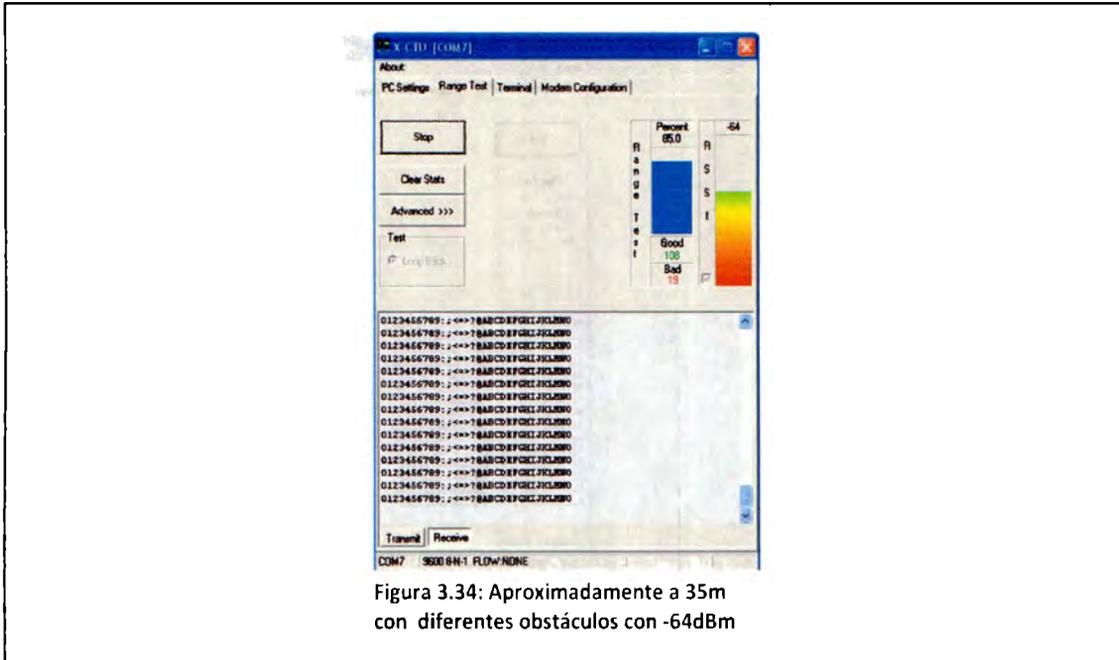


Figura 3.34: Aproximadamente a 35m con diferentes obstáculos con -64dBm

Resultados de las pruebas con dos módulos Xbee Pro (Serie 2):

Cuando se encuentran los módulos a menos de 40cm se tiene un RSSI de -40dB con el 100 por ciento de los paquetes sin error. A 6m se tienen una recepción de -40dBm y un porcentaje de paquetes sin error de 75 por ciento. A 8m se tiene una recepción de -40dBm y 100%. A 10m se tiene una recepción de -44dBm y 92.4. A 30m se tienen una recepción de -48dBm y un porcentaje de paquetes sin error de 95.2 por ciento. A 70m se tiene una recepción de -56dBm y 93%. A 70m se tiene una recepción de -60dBm y 95.2%. A 35m con diferentes obstáculos se tiene -64dBm con 85%.

3.3.4 Pruebas de Topologías

Se configuraron distintas topologías (punto a punto, estrella y árbol) para determinar el correcto funcionamiento de los módulos.

3.3.4.1 Topología Punto-Punto

Para esta configuración (Figura 3.35) se utilizaron los comandos ATND y ATND para descubrir y aprender la dirección destino respectivamente (Figura 3.36).

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

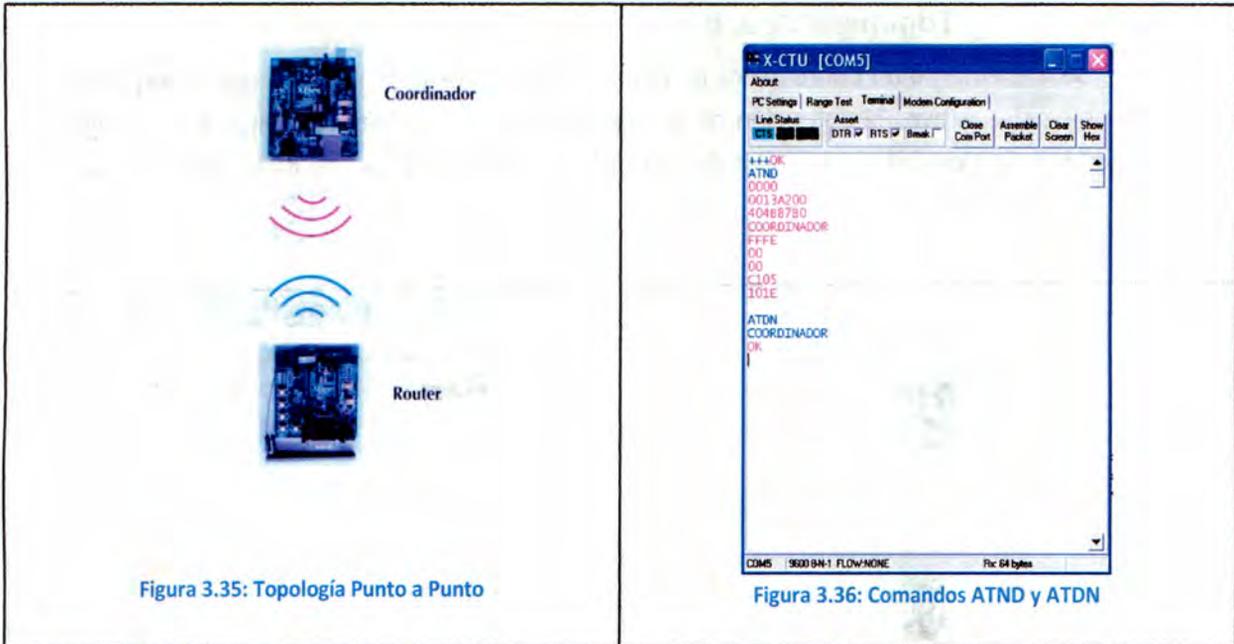


Figura 3.35: Topología Punto a Punto

Figura 3.36: Comandos ATND y ATDN

3.3.4.2 Topología de estrella

Para esta topología (Figura 3.37) se configuró un Xbee pro como el coordinador y los demás módulos (Xbee) como Routers. Se utilizó el comando ATND para verificar que todos los módulos estén compartiendo el mismo nodo (Figura 3.38). La transmisión del coordinador se hacía por medio de broadcast mientras que los dispositivos periféricos tenían como dirección destino el coordinador.

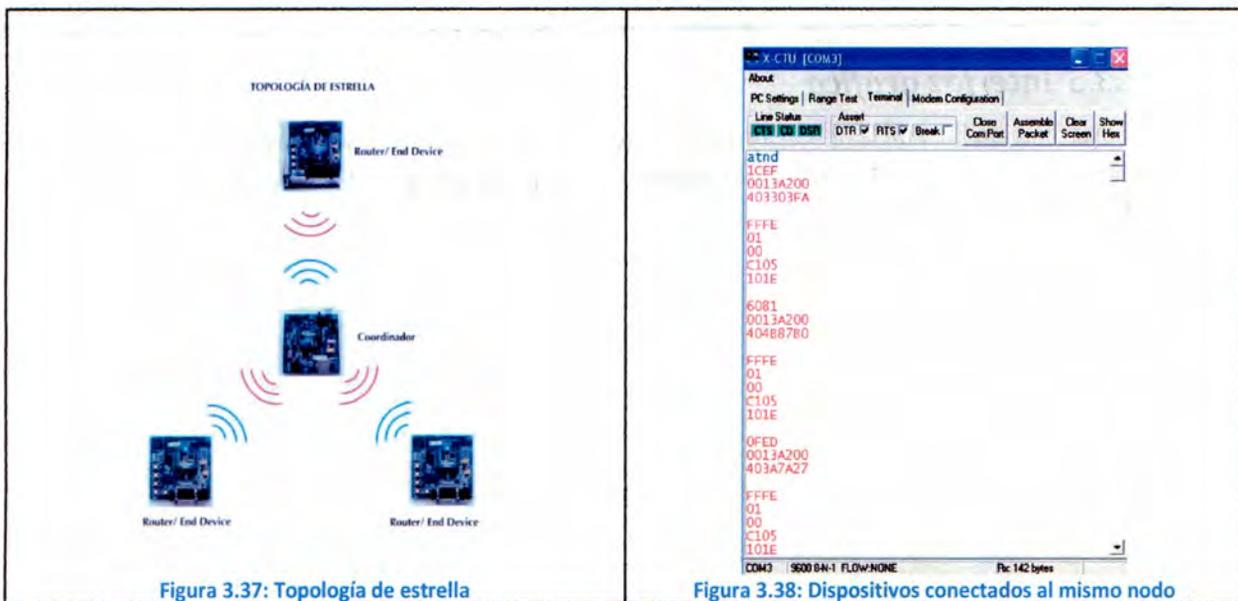


Figura 3.37: Topología de estrella

Figura 3.38: Dispositivos conectados al mismo nodo

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

3.3.4.3 Topología de árbol

Se implementó un Coordinador un Router y dos dispositivos finales (Figura 3.39). Para esta topología se activó la aplicación de la capa de direccionamiento así mismo se configuro el punto de destino y el identificador de Clúster (Figura 3.40) en cada uno de los dispositivos.

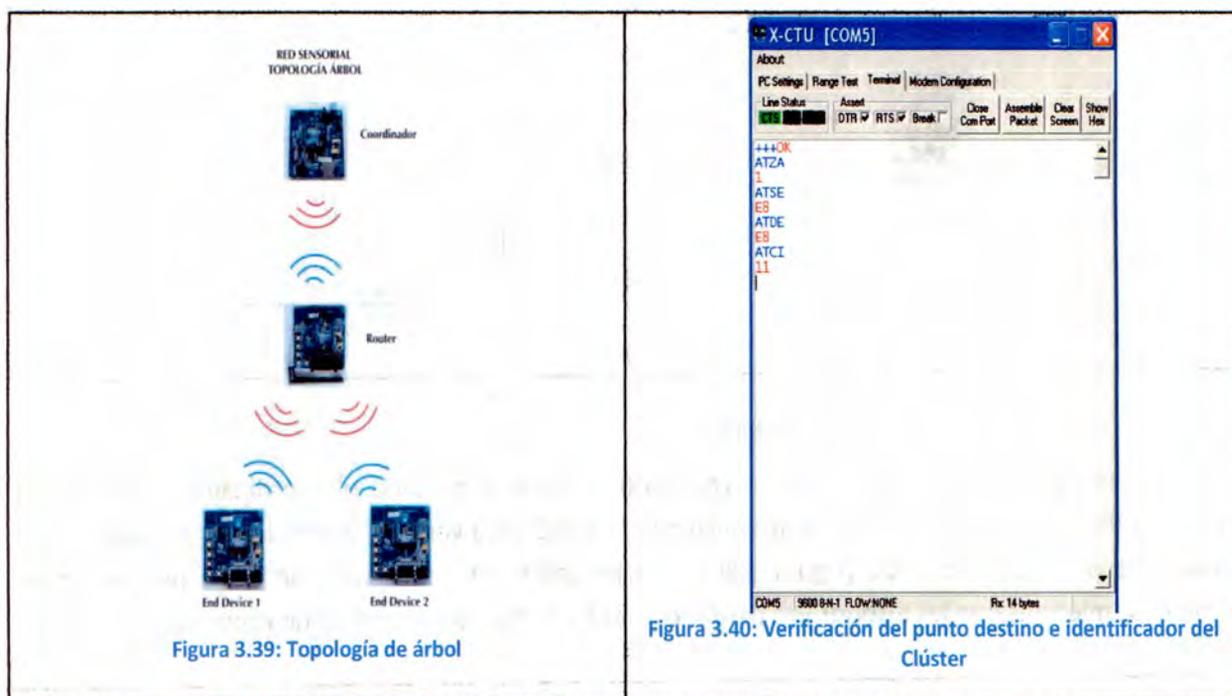


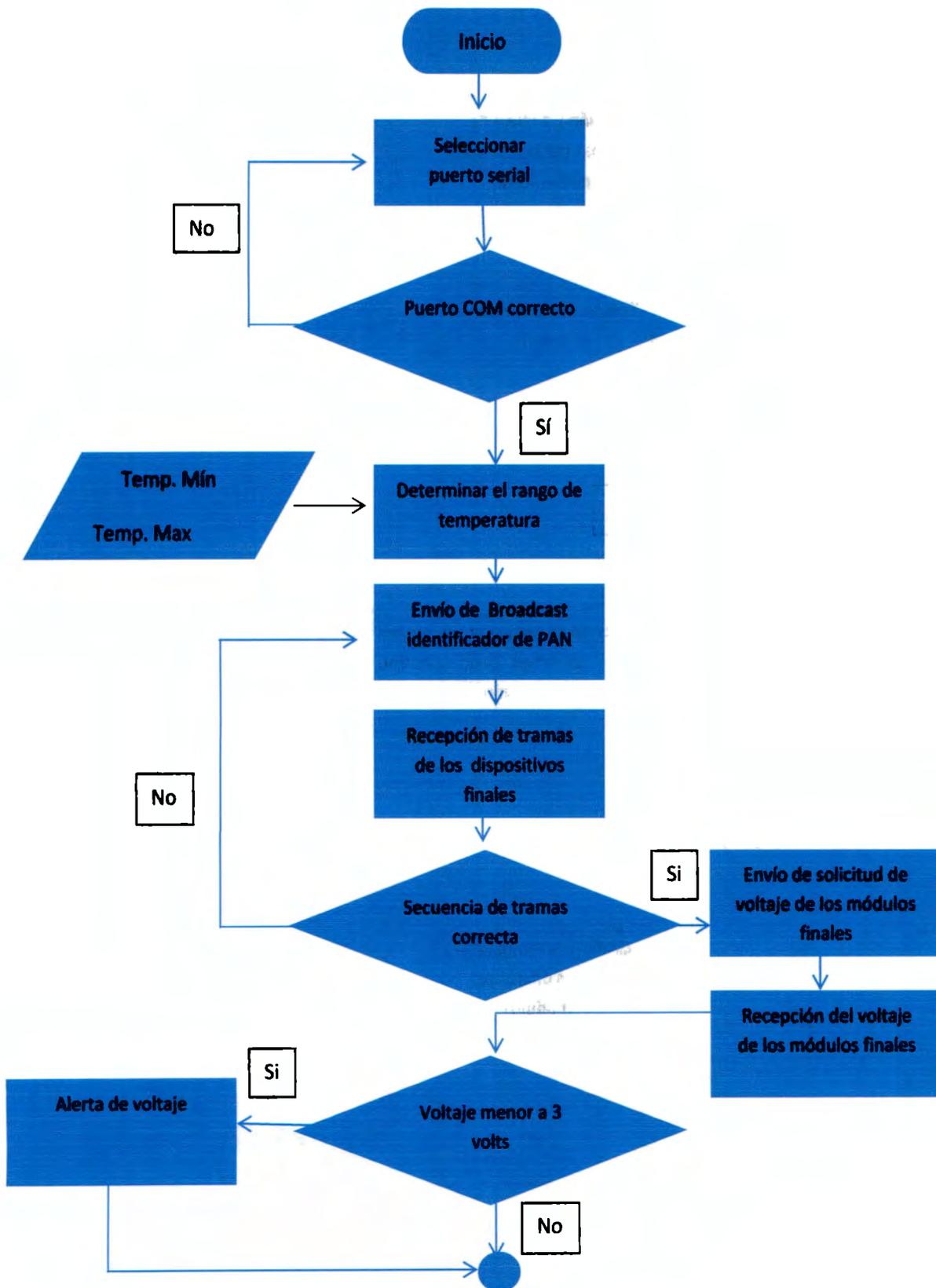
Figura 3.39: Topología de árbol

Figura 3.40: Verificación del punto destino e identificador del Clúster

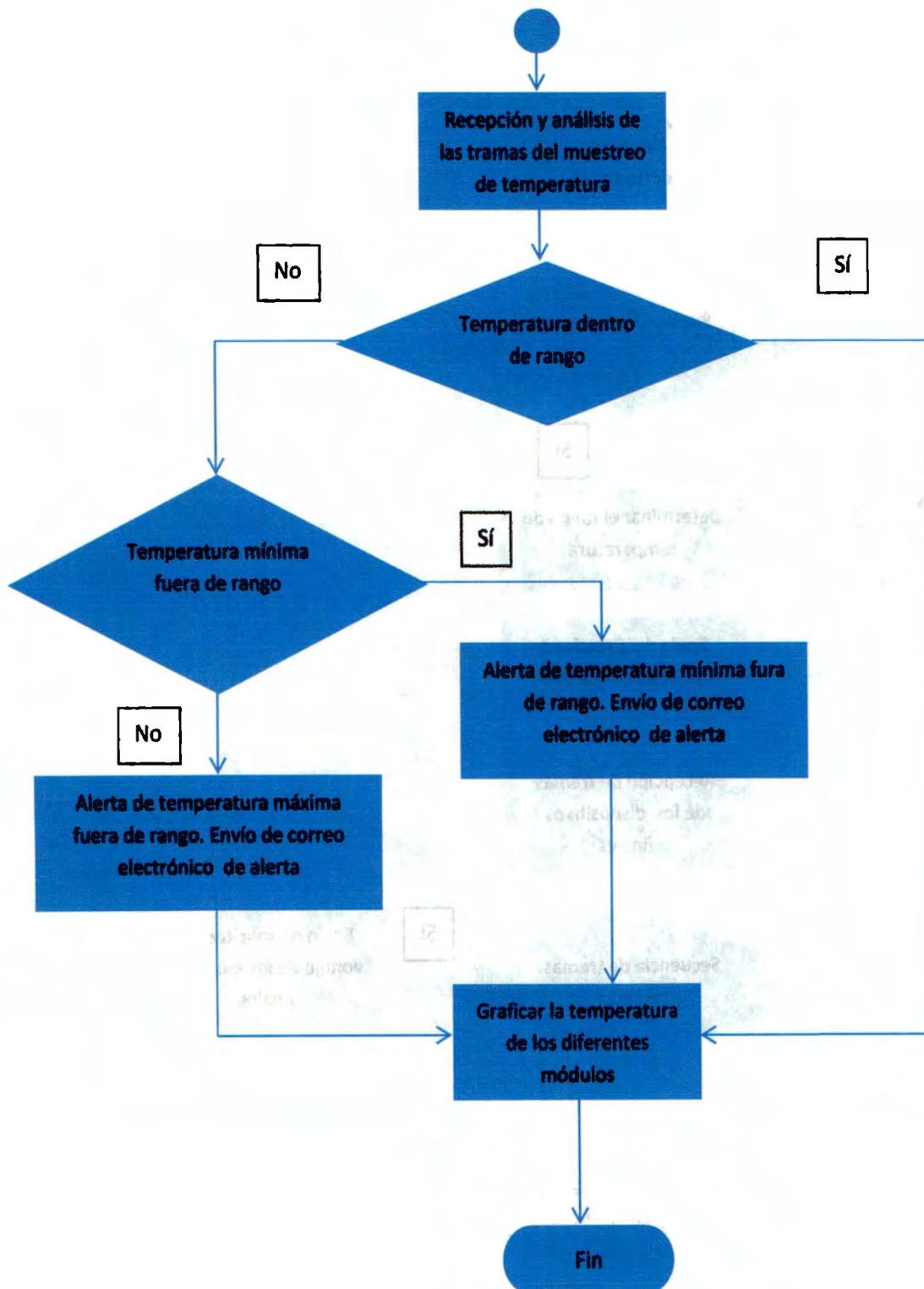
3.3.5 Interfaz gráfica

El diagrama de flujo de la aplicación del monitoreo de la temperatura se muestra en la (Figura 3.41). El código implementando en Matlab© correspondiente a este diagrama de flujo, se puede apreciar en el ANEXO III.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4



Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

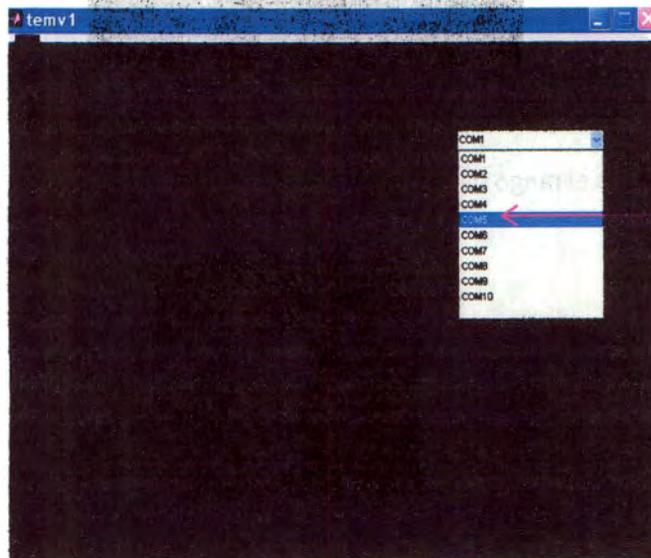


Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

3.3.6 Software de usuario

A continuación se describe de forma general el software que permitirá iniciar la adquisición de datos. Esta interfaz fue desarrollada en Matlab.

- Para iniciar el programa se selecciona el puerto donde se conecta el coordinador (figura 3.43).



Seleccionar el puerto donde se conecta el coordinador

Figura 3.41: Selección del puerto "COM"

- Si el puerto no es el correcto, aparece un mensaje de advertencia como el de la (Figura 3.44).

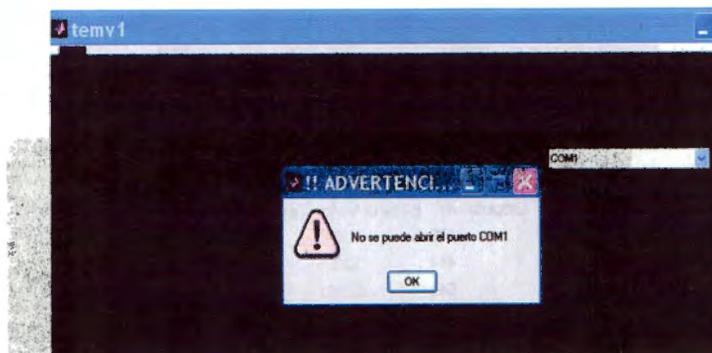


Figura 3.42: Mensaje de advertencia

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Introducir el rango de temperatura mínimo y máximo (Figura 3.45).

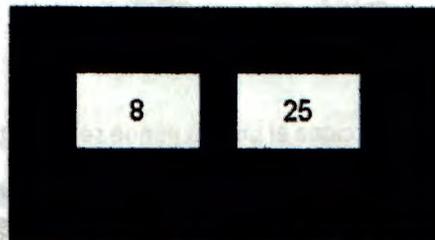


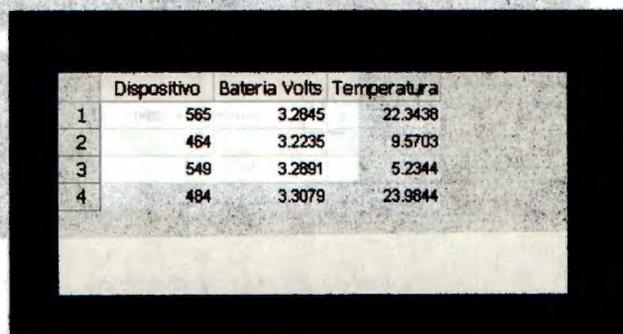
Figura 3.43: Rango de temperatura

- Una vez seleccionado el rango de temperatura, se presiona el botón de play (Figura 3.46).



Figura 3.44: Botón de play

- El proceso de recuperación y análisis de datos puede tardar varios segundos, dependiendo del número de radio módulos conectados. Los datos de identificador, batería y temperatura de cada módulo, serán mostrados en pantalla por medio de una tabla, que se creará dinámicamente de acuerdo al número de radio módulos que formen parte de la red, como se muestra en la (Figura 3.46), en donde hay 4 módulos ZigBee.



	Dispositivo	Bateria Volts	Temperatura
1	565	3.2845	22.3438
2	464	3.2235	9.5703
3	549	3.2891	5.2344
4	484	3.3079	23.9844

Figura 3.45: Obtención de información correspondiente a cada radio módulo

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Los datos obtenidos de temperatura se graficaran en las diferentes interfaces dependiendo del dispositivo (Figura 3.47)

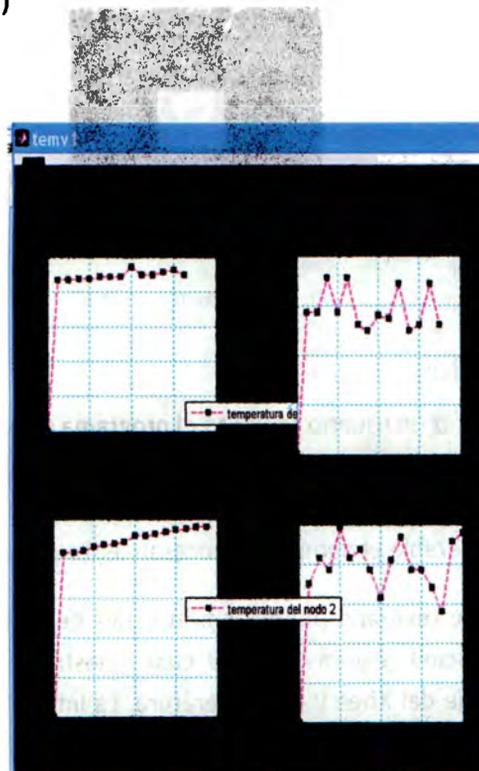


Figura 3.46: Graficas de temperatura de los diferentes módulos

- Si la temperatura esta fuera de rango se activara una alerta y se enviará un correo electrónico (previamente configurado) (Figura 3.48).



Figura 3.47: Alerta de temperatura

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- Para detener el proceso hay que presionar el botón de pausa, como se ve en la (Figura 3.49).

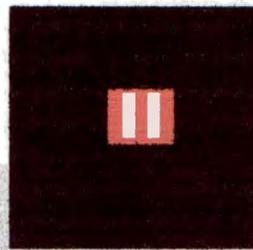


Figura 3.48: Botón de pausa

3.3.6.1 Resultados

Para la implementación de la interfaz de usuario se utilizó el programa de Matlab™ versión 7.8.0. Dicho programa se utilizó debido a facilidad que tiene para el manejo de vectores y matrices. La mayor limitante de este software es la interfaz gráfica, la cual es muy robusta y consume muchos recursos del ordenador, tal problema afecta de manera considerable el tiempo de procesamiento y la eficiencia de la aplicación.

Para conjuntar el hardware realizado (módulos principales de monitoreo) se elaboró un programa para el despliegue de la información (Figura 3.41), el cual muestra los datos recibidos como son: el identificador del dispositivo, voltaje del Xbee y la temperatura. La información de la temperatura de cada módulo se grafica con respecto al tiempo, pudiendo observar su desempeño y como es que la temperatura varía o se mantiene constante.

En este programa se pueden supervisar uno o más módulos, dependiendo de las necesidades de monitoreo de temperatura en la cadena fría. Para el ejemplo (Figura 3.41) se pueden observar cuatro módulos en funcionamiento, así como las variaciones de las temperaturas y por lo tanto de las gráficas. También es posible establecer el rango máximo y mínimo de operación.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

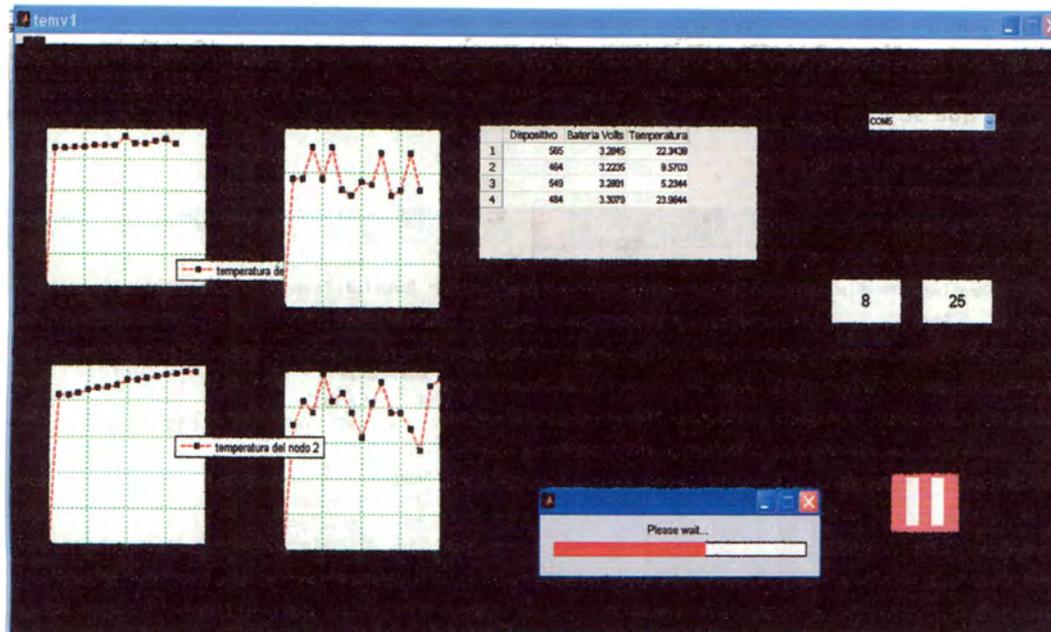


Figura 3.49: Interfaz de usuario

3.3.7 Análisis de resultados

La comunicación entre módulos básicos de Xbee (Serie 2) con línea de vista, tiene una buena relación de porcentaje de paquetes de recibidos (mínimo 75%) y potencia de la señal (mínimo -90dBm) en distancias menores de 100 metros. Para el enlace entre un módulo básico y uno Pro el porcentaje de recepción de paquetes no sufrió muchos cambios con respecto a la prueba anterior, pero las potencias de transmisión a las mismas distancia fueron mayores. Por lo que estos módulos pueden trabajar eficientemente entre distancias de 100 a 150 metros.

En las pruebas en interiores con obstáculos se obtuvieron diversos resultados, dependiendo de los módulos que se utilizaron (Xbee series 2 o XbeePro Series 2). En general los dispositivos Xbee responden con buenos niveles de señal, en un cuarto, así como en alguna distancia fuera del mismo (30 m), donde se tiene comunicación prácticamente sin errores. Ya a más distancia (70m), el nivel de la señal depende de los obstáculos, como las paredes y vidrios que tuvimos en este caso. Es por ello que podemos trabajar con estos módulos de forma eficiente en interiores y exteriores.

Este análisis solo corresponde a las mediciones hechas en el CEDETEC, por lo cual estas mediciones pueden variar dependiendo del lugar y los obstáculos que se encuentren en el lugar. En cuanto a las topologías la malla resulta mejor por la redundancia pero su configuración es más compleja y solo se puede implementar con los Xbee PRO (Serie 2). Por otro lado la topología de árbol resulta ser una opción flexible con respecto al costo, configuración y administración de la red.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

A continuación se presenta la trama de recepción, que se adquiere a intervalos de 1000 ms (1 s). Nuestro sensor de temperatura está escalado a 10 mV/°C, y en el penúltimo byte se aprecia la temperatura que se estaba registrando, siendo al principio de C5 (es decir 19.7 °C), y luego baja a C3 (19.5 °C)

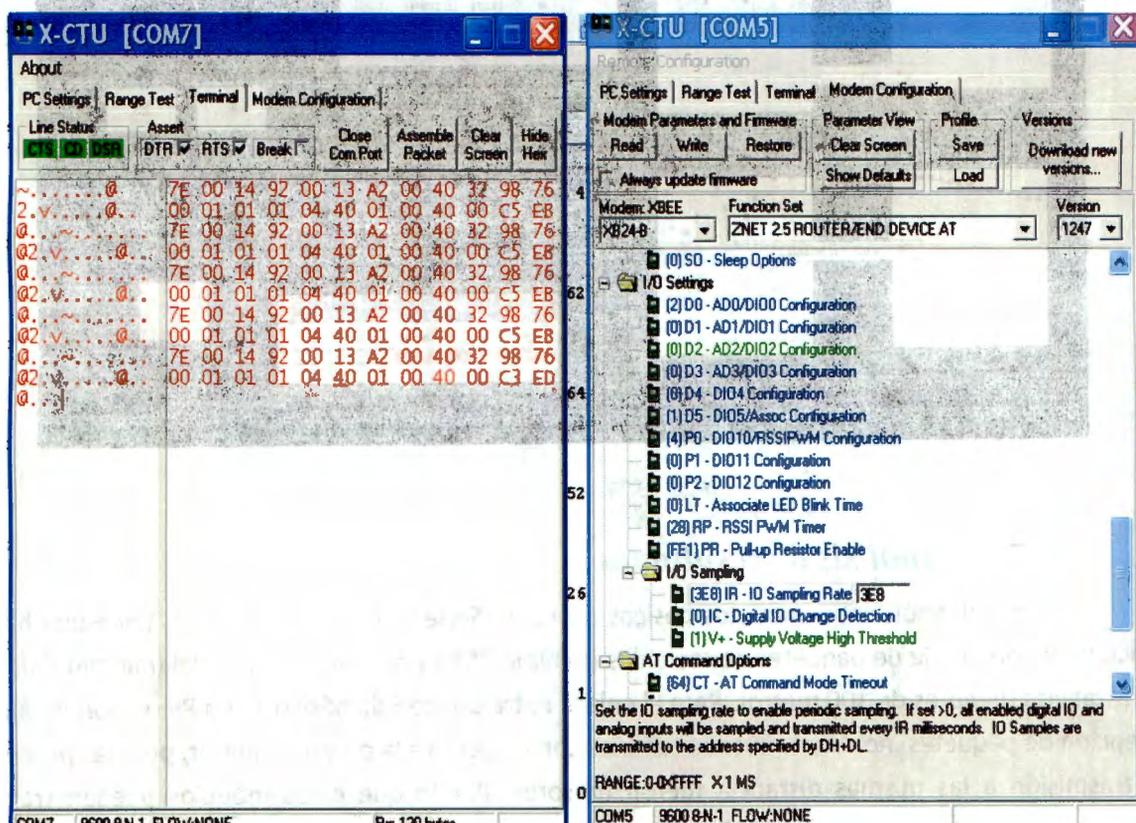


Figura 3.50: Trama de recepción

3.3.8 Lista de componentes

3.3.8.1 Por módulo

- 1 base para módulos Xbee
- 2 tiras de conectores de 10 pines de 2mm
- 2 tiras de headers con 10 pines
- 1 Sensor de temperatura (LM35)
- 1 regulador de voltaje negativo (LM337)
- 1 regulador de 5V (7805N)
- 1 regulador de 3.3V (L78L33ACZ)

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- 2 OPAMP (LM358N)
- 1 convertidor de voltaje negativo (LMC7660)
- 2 trimpot de 1 k Ω
- 2 capacitores de 10 μ F
- 2 capacitores de 22 μ F
- 2 capacitores de 0.33 μ F
- 2 capacitores de 0.1 μ F
- 5 resistencias de 1 k Ω
- 1 resistencia de 120 Ω
- 1 resistencia de 47 k Ω
- 1 conector de batería de 9 V
- 1 batería de 9 V

3.3.9 Esquemático y PCB

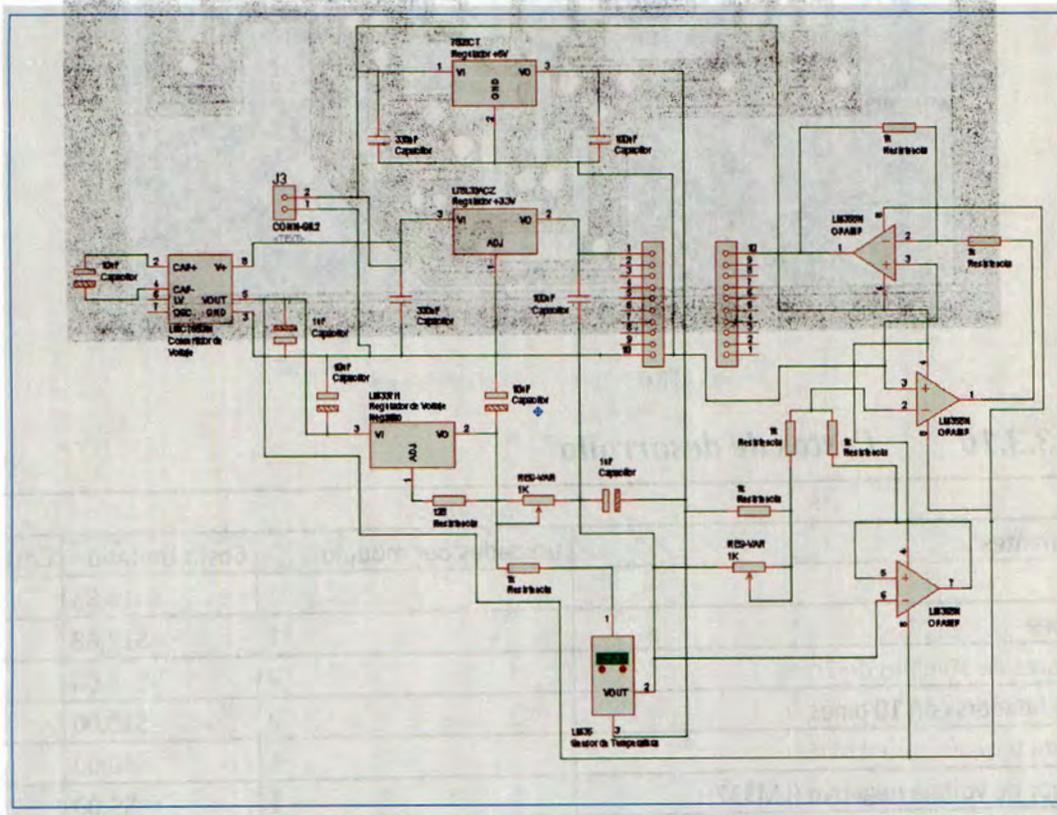


Figura 3.51 Esquemático de los módulos principales

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

En esta imagen (Figura3.51), podemos observar las distintas etapas de regulación y acondicionamiento de la señal de temperatura para la inserción en el módulo Xbee.

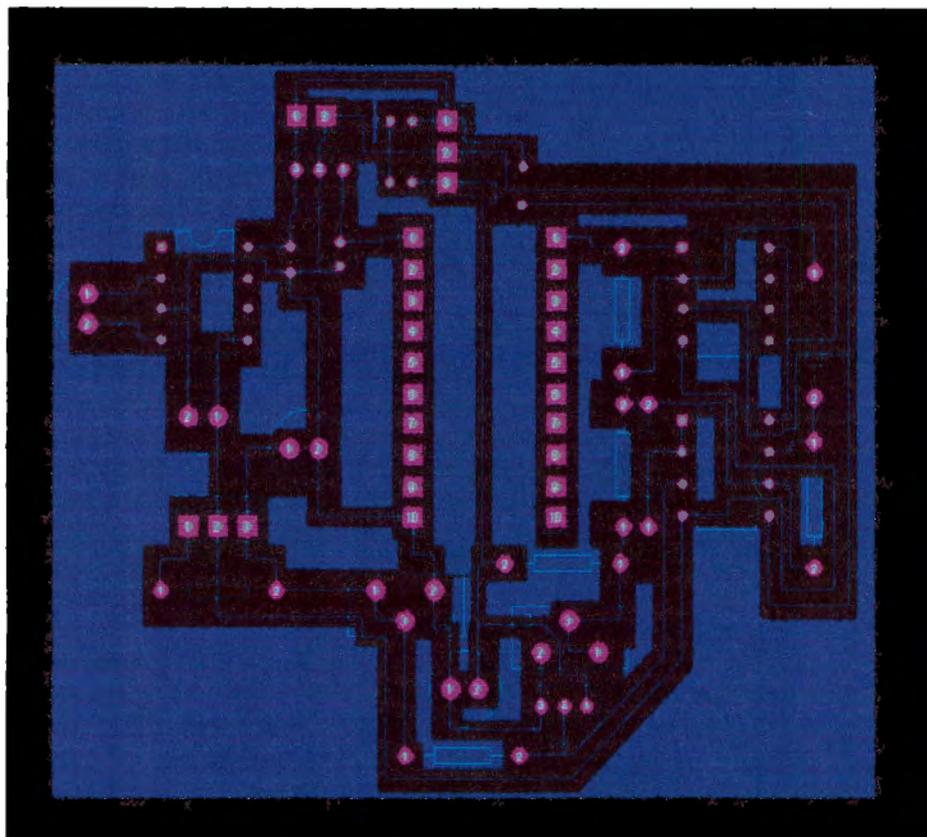


Figura3.52 Diseño del PCB del módulo principal

3.3.10 Costos de desarrollo

Modulo principal			
Componentes	Unidades por modulo	Costo Unitario	Costo extendido
Xbee	1	\$414.83	\$414.83
Base Xbee	1	\$12.68	\$12.68
Conectores de 10 pines de 2mm	2	\$36.00	\$72.00
Tiras de headers con 10 pines	2	\$10.00	\$20.00
Sensor de temperatura (LM35)	1	\$20.00	\$20.00
Regulador de voltaje negativo (LM337)	1	\$9.00	\$9.00
Regulador de 5V (7805N)	1	\$9.00	\$9.00
Regulador de 3.3V (L78L33ACZ)	1	\$5.00	\$5.00
OPAMP (LM358N)	2	\$4.00	\$8.00

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Convertidor de voltaje negativo (LMC7660)	1	\$15.00	\$15.00
Capacitor 10 μ F	2	\$3.00	\$6.00
Capacitor 22 μ F	2	\$3.00	\$6.00
Capacitor 0.33 μ F	2	\$3.00	\$6.00
Capacitor 0.1 μ F	2	\$5.00	\$10.00
Trimpot 1 k Ω	2	\$24.00	\$48.00
Resistencia 1 k Ω	5	\$2.00	\$10.00
Resistencia 120 Ω	1	\$1.00	\$1.00
Resistencia 47 k Ω	1	\$1.00	\$1.00
Conector para batería de 9 V	1	\$5.00	\$5.00
Batería de 9 V	1	\$25.00	\$25.00
Placa fenólica	1	\$65.00	\$65.00
			\$768.51

Costo por modulo	Con 5 módulos
\$768.51	\$3,842.55

Capítulo 4

Conclusiones

4.1 Conclusiones Generales

Durante la primera etapa del proyecto, se logró un aprendizaje significativo sobre el funcionamiento del protocolo ZigBee en cuanto a características de operación del protocolo, así como sus posibles aplicaciones y ventajas con respecto a otras tecnologías, principalmente en cuanto al ahorro de energía, seguridad y su fácil implementación. En la actualidad, el automatizar y monitorear sistemas a través de redes sensoriales inalámbricas está adquiriendo una gran importancia debido a la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes proveedores. El uso de los módulos XBee resultó en una configuración sencilla, con lo cual se pudo implementar una topología de red sensorial inalámbrica.

En la segunda etapa del proyecto, se definieron los componentes necesarios para poder hacer una instalación apropiada, discreta y funcional de la red. Se logró implementar una red sensorial tipo estrella, en la cual todos los módulos tienen que comunicarse con un nodo central. Esto se logró gracias al conocimiento de la trama del protocolo ZigBee para poder medir los datos y las variables y a través de la integración de componentes electrónicos con las propias funcionalidades de los radio módulos (como convertidores AD). El sistema tiene la capacidad de enviar alarmas por correo en caso de que se excedan umbrales de temperatura. Un problema que se tuvo en el montaje de la red fue el ciclo de trabajo que en el mejor caso que se pudo lograr fue de 50-50 ya que de lo contrario el sistema se interrumpía. Sin embargo, el propósito de poder visualizar la temperatura de los módulos en tiempo real dentro de la red, se logró llevar a cabo.

4.2 Trabajo a futuro

- Incrementar el tiempo en sleep de los Xbee™.
- Mejorar el ahorro de energía en los módulos para una mayor duración de la batería.
- Encontrar mejores soluciones para el desempeño de las baterías en ambientes fríos.
- Mejorar la eficiencia del software.
- Implementar y probar el proyecto en una red fría de un hospital.
- Capacidad de la red de poderse comunicar con sistemas celulares como GSM o con redes Ethernet (Internet) mediante el hardware y software apropiados.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

Referencias

- [1] Wikitel. (2009) *Redes de datos*. [Electrónico] Recuperado de [http://es.wikitel.info/wiki/Redes de datos](http://es.wikitel.info/wiki/Redes_de_datos) [Obtenido el 19 de agosto de 2009]
- [2] Groth, D., Skandier, T. (2005) *Guía del estudio de redes: 4ª edición*. México: Sybex, Inc.
- [3] Zetes. (2009) *Redes*. [Electrónico]. Recuperado de <http://www.zetes.es/es/fiches/corporate/technologies-products/technologies-generic/networking.cfm>. [Obtenido el 19 de agosto de 2009]
- [4] PDAMD. (2009) *Wireless Wide Area Networks*. [Electrónico]. Recuperado de http://www.pdamd.com/vertical/features/wireless_4.xml. [Obtenido el 19 de agosto de 2009]
- [5] Network Computing. (2009) *Network computers*. [Electrónico] Recuperado de <http://www.networkcomputing.com/showitem.jhtml;jsessionid=IJ5JWPQPOMMOTQE1GHPSKHWATM Y32JVN?docid=1505ws1>. [Obtenido el 19 de agosto de 2009].
- [6] Sierra Wireless. (2002) *Wireless LANs vs. Wireless WANS*. [Electrónico]. Recuperado de http://www.sierrawireless.com/documents/corporate/2130273_wwan_v_wlan.pdf [Obtenido el 19 de agosto de 2009]
- [7] Kioskea. (2007) *Redes inalámbricas de área personal*. [Electrónico]. Recuperado de <http://es.kioskea.net/contents/wireless/wpan.php3> [Obtenido el 19 de agosto de 2009].
- [8] Farahani, S. (2008) *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. USA: Newnes.
- [9] Domodesk (2009) *ZigBee en Domodesk*. Todo en domótica de fácil instalación. [Electrónico] Recuperado de <http://www.domodesk.com/content.aspx?co=97&t=21&c=47> [Recuperado el 13 de septiembre de 2009].
- [10] Chair of Telecommunications. (2007) *ZigBee Tutorial*. [Electrónico]. Recuperado de <http://www.ifn.et.tu-dresden.de/~marandin/ZigBee/ZigBeeTutorial.html> [Recuperado el 13 de septiembre de 2009].
- [11] Rappaport, T. (1996) *Wireless communications: principles and practice*. USA: Prentice Hall.
- [12] Zeghdoud, M., Cordier, P., Terré, M. (2006) *Impact of clear channel assessment mode on the performance of ZigBee operating in a WiFi Environment*. IEEE
- [13] Gislason, D. (2007) *ZigBee Wireless Networking*. ZigBee Alliance. USA: Newnes.
- [14] Yan, B. (2009) *Application of RFID in Cold Chain Temperature Monitoring System*. IEEE.
- [15] Guangpeng, L., Zhongwen, G., Xie, S., Pan, W. (2009) *Web-based Real-time Monitoring System on Cold Chain of Blood*. IEEE.
- [16] Kacimi, R., Dhaou, R., Beylot, A. (2008) *Using Energy-Efficient Wireless Sensor Network for Cold Chain Monitoring*. IEEE.
- [17] MaxStream(2007). Xbee & Xbee-PRO OEM Module Antenna Considerations. [Electrónico]. Recuperado de www.maxstream.net el 12 de noviembre de 2009.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

- [18] Guevara, C., Arévalo, M. (2009) *La Cadena del Frío*. [Electrónico] http://www.compumedicina.com/clinica/cm_090401.htm . [Recuperado el 4 de febrero de 2010].
- [19] World Health Organization. (2005) *Calidad y seguridad de las vacunas, desde el desarrollo hasta la administración*. [Electrónico] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs295/es/index.html>. [Recuperado el 12 de febrero de 2010].
- [20] National Semiconductor. (2000) *LM35. Precision Centigrade Temperature Sensors*. [Electrónico] <http://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>. [Recuperado el 11 de febrero de 2010].
- [21] Karl, H., Willig, A. (2005) *Protocols and architectures for Wireless Sensor Networks*. England: Wiley.
- [22] Hucaby, B. (2007) *CCNP BCMSN Official Exam Certification Guide*. USA: Cisco Press.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

ANEXO I: Patrón de radiación de las antenas XBee

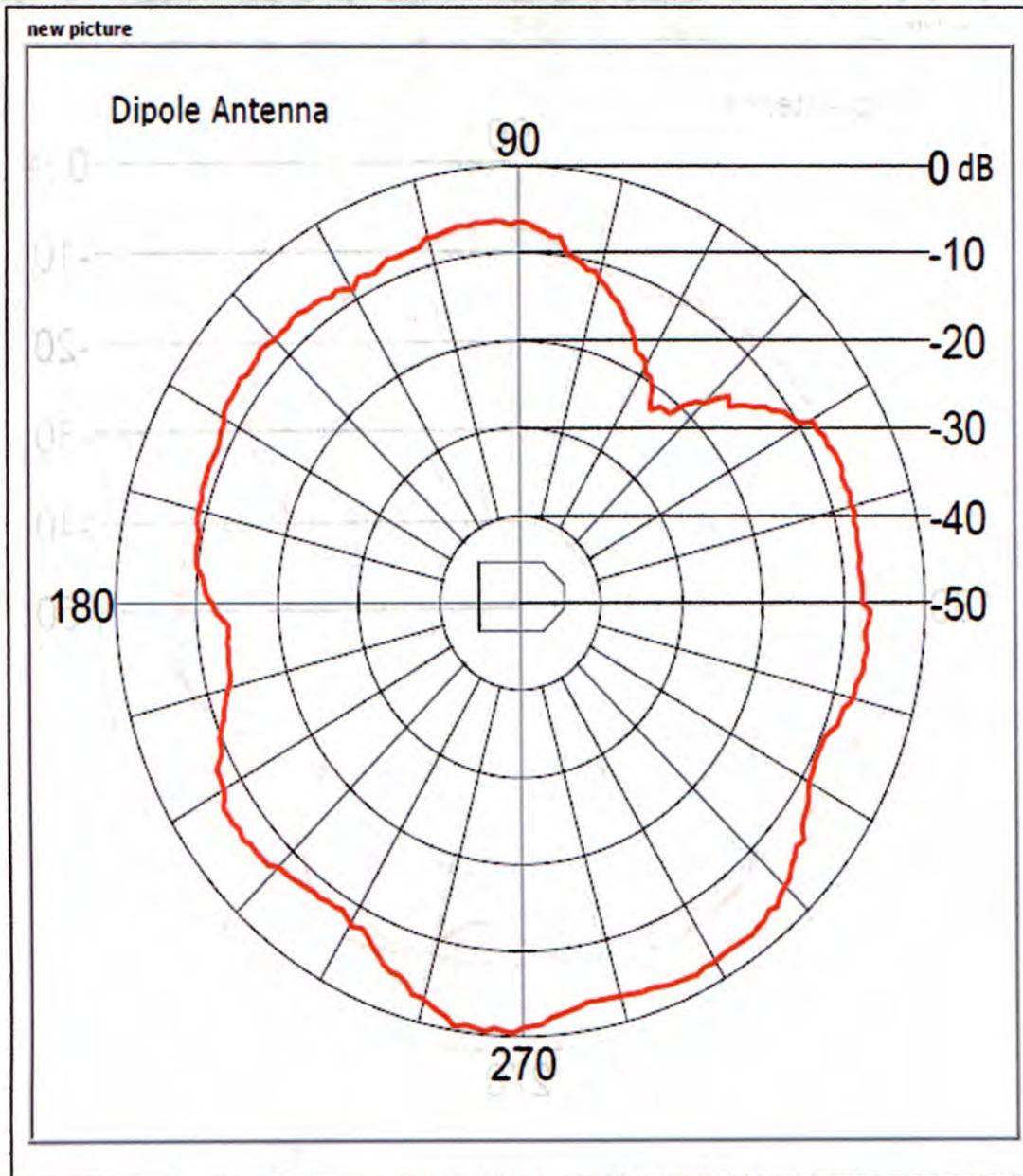


Figura 1: Patrón de radiación de una antena dipolo conectada a un XBee-PRO. El patrón está normalizado al valor máximo de la potencia. El frente del módulo está a cero grados

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

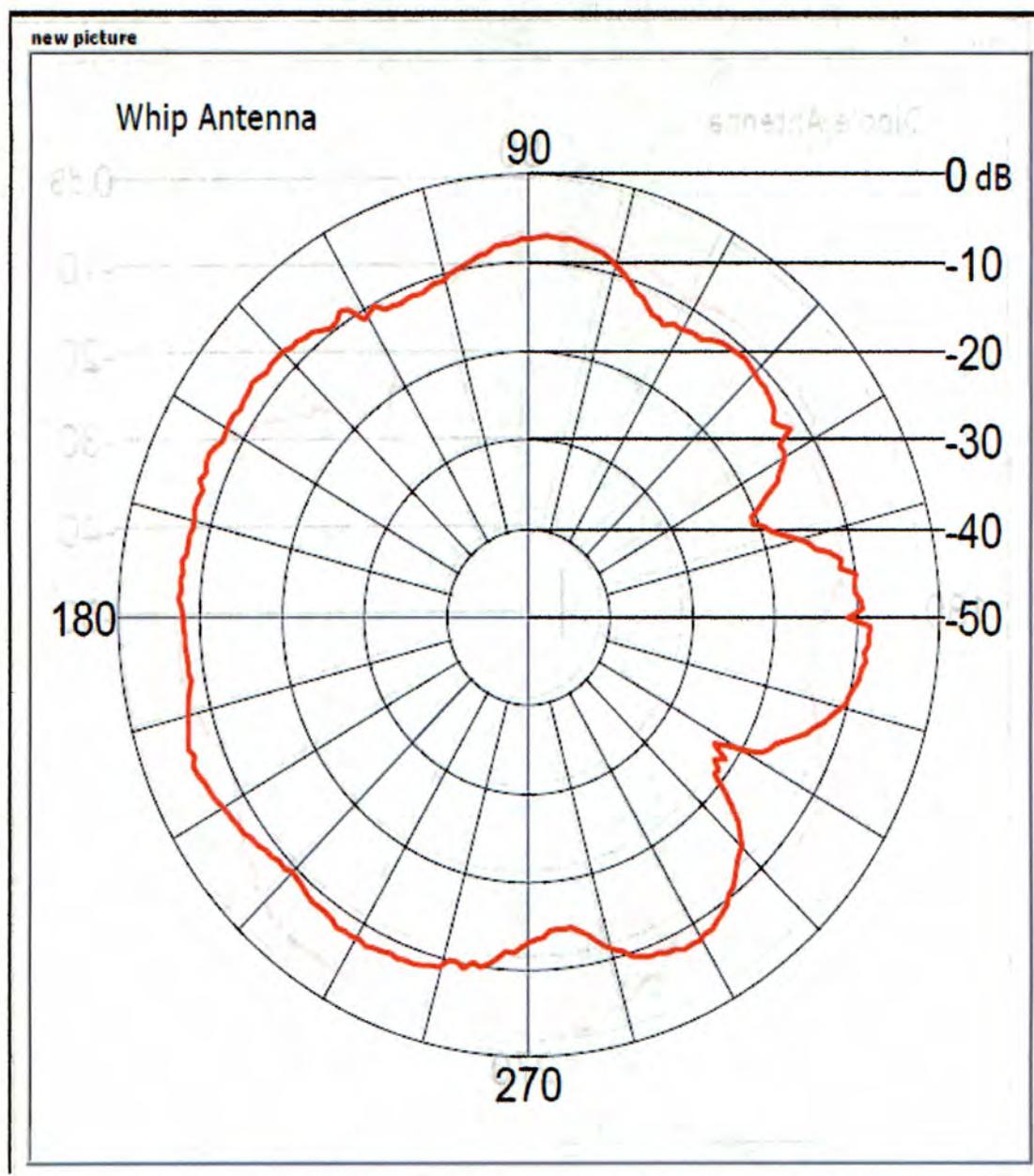


Figura 2: Patrón de radiación de una antena Whip (mono polo) conectado a un Xbee-PRO. El patrón está normalizado al valor máximo de la potencia de la antena dipolo localizado en la primera página de este anexo.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

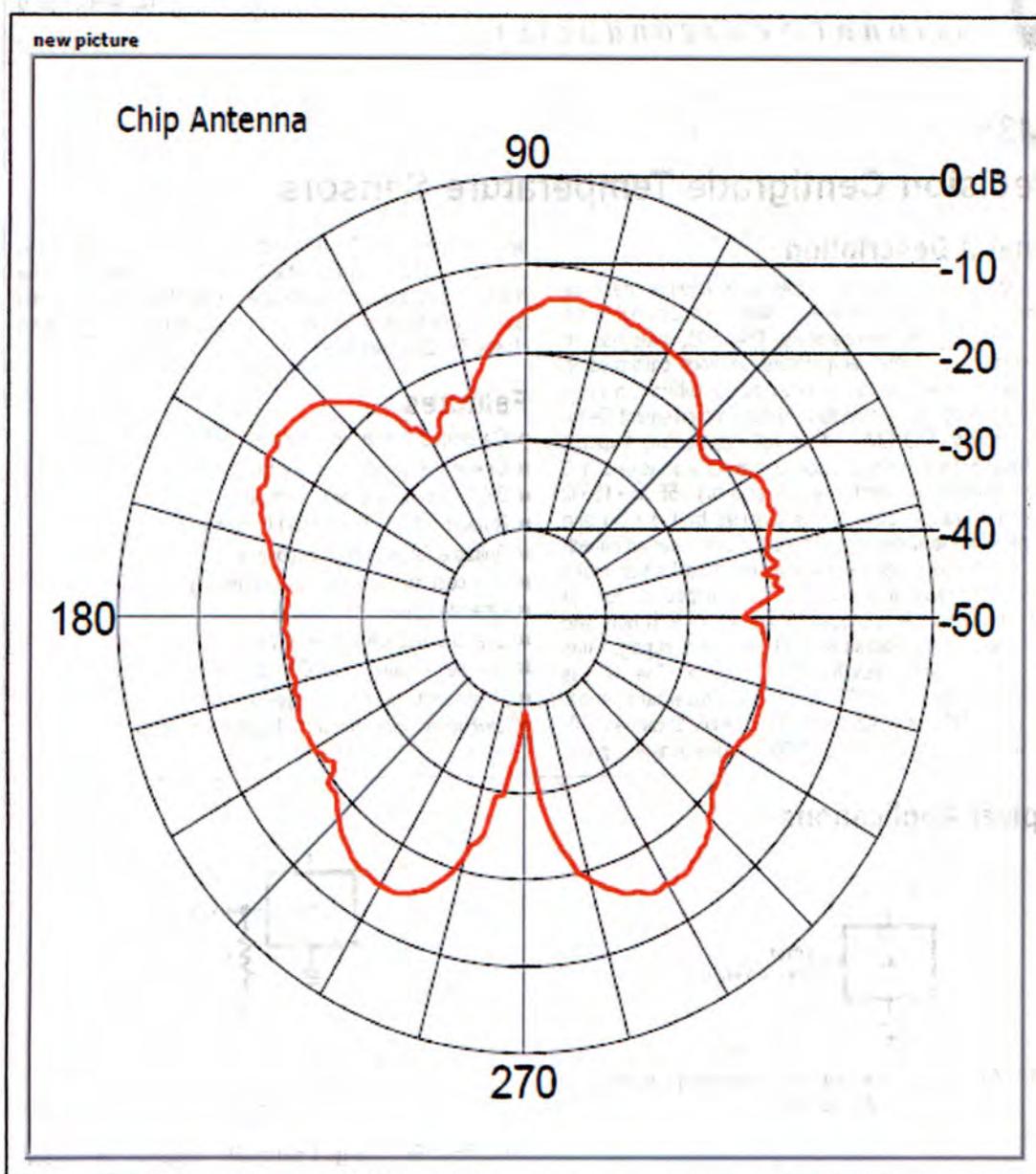


Figura 3: patrón de radiación de una antena chip conectada a un Xbee-PRO. El patrón esta normalizado al valor máximo de la potencia de la antena dipolo localizado en la primera página de este anexo.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

ANEXO II: Hojas de datos

November 2000

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

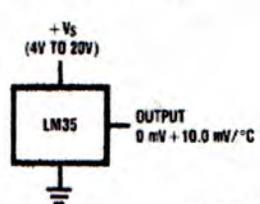
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^\circ\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^\circ\text{C}$ over a full -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\ \mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40 to $+110^\circ\text{C}$ range (-10 with improved accuracy). The LM35 series is available pack-

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

Features

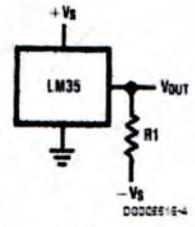
- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at +25°C)
- Rated for full -55 to $+150^\circ\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $60\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for 1 mA load

Typical Applications



00008516-3

FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor
(+2°C to +150°C)



Choose $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$
 $V_{OUT} = +1,500\ \text{mV}$ at $+150^\circ\text{C}$
 $= +250\ \text{mV}$ at $+25^\circ\text{C}$
 $= -550\ \text{mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

Sensor de temperatura LM35

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

1.5. Pin Signals

Figure 1-04. XBee /XBee-PRO ZNet 2.5 RF Module Pin Number
(top sides shown - shields on bottom)

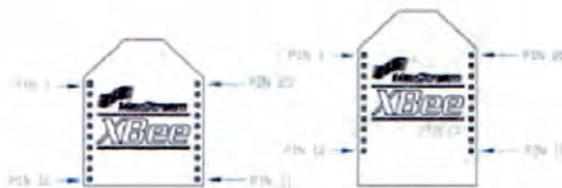


Table 1-02. Pin Assignments for the XBee PRO ZNet 2.5 Modules
(Low-asserted signals are distinguished with a horizontal line above signal name.)

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DIO12	Either	Digital I/O 12
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI / DIO10	Either	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator / Digital IO
7	PWM / DIO11	Either	Digital I/O 11
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DIO8	Either	Pin Sleep Control Line or Digital I/O 8
10	GND	-	Ground
11	DIO4	Either	Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP / DIO9	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9
14	[reserved]	-	Do not connect
15	Associate / DIO5	Either	Associated Indicator, Digital I/O 5
16	RTS / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, 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 / Commissioning Button	Either	Analog Input 0, Digital I/O 0, or Commissioning Button

Pines de los radio módulos.

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

ANEXO III: Código del programa.

Principal:

```
function varargout = temv1(varargin)
% TEMV1 M-file for temv1.fig
%   TEMV1, by itself, creates a new TEMV1 or raises the existing
%   singleton*.
%   Last Modified by GUIDE v2.5 14-Apr-2010 23:47:36

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @temv1_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @temv1_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

--- Executes just before temv1 is made visible.
function temv1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to temv1 (see VARARGIN)

%CARGAR IMAGENES PARA INTERFACE GRÁFICA
[a,map]=imread('play.jpg');
[r,c,d]=size(a);
x=ceil(r/130);
y=ceil(c/150);
g=a(5:x:end,1:y:end,:);
g(g==512)=5.5*255;
set(handles.play,'CData',g);

[a,map]=imread('pause.jpg');
[r,c,d]=size(a);
x=ceil(r/130);
y=ceil(c/150);
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
g=a(5:x:end,1:y:end,:);
g(g==512)=5.5*255;
set(handles.pause,'CData',g);

% Choose default command line output for temv1
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes temv1 wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = temv1_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Boton de play.
function play_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to play (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global PS;
global conti;

%INICIALIZAR AXES

conti=0;
grafica(handles,0);
grafical(handles,0);
grafica2(handles,0);
grafica3(handles,0);

while(conti==0)
%CREAR BARRA DE PROGRESO
h = waitbar(0,'Please wait...','Position',[550 150 270 50]);
a = get(handles.edit1,'String');
b = get(handles.edit3,'String');
mini = str2double(a);
maxi = str2double(b);

%SOLICITUD REMOTA IDENTIFICADOR
ta=empezar(PS);
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
waitbar(.3,h)
%SOLICITUD REMOTA VOLTAJE
ta1=ma1volta(ta,PS);
waitbar(.6,h)
%fwrite(PS,desper);
ta2=mactemp(ta,PS,handles);
waitbar(1,h)
pause(1)
close (h)
%CREAR TABLA
tabla(ta,ta1,ta2)
set(handles.play,'visible','off')
set(handles.pause,'visible','on')
%COMPARAR VALORES DE TEMPERATURA MÁXIMOS Y MÍNIMO
minmax(ta2,mini,maxi);

end

% --- Boton de pausa.
function pause_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pause (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global PS;
global conti;
conti=1;
set(handles.play,'visible','on')
set(handles.pause,'visible','off')
%CERRAR PUETO SERIAL
fclose(PS);
delete(PS);
clear PS;
clear variables;

% --- Executes on selection change in listbox1.
function listbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = get(hObject,'String') returns listbox1 contents as cell
array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from listbox1
vars = evalin('base','who');
set(handles.listbox1,'hola',vars)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function listbox1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = get(hObject,'String') returns popupmenu2 contents as cell
array
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu2
%ME = MException(identifier, message);
global PS;
%VERIFICAR PUERTO
switch get(handles.popupmenu2,'Value')
    case 1
        try
            PS=serial('COM1');
            fopen(PS);
            warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!
ADVERTENCIA !!');
            set(handles.edit1,'visible','on')
            set(handles.edit3,'visible','on')
            set(handles.text12,'visible','on')
            set(handles.text13,'visible','on')
            set(handles.play,'visible','on')
        catch
            set(handles.play,'visible','off')
            set(handles.pause,'visible','off')
            warndlg('No se puede abrir el puerto COM1' , '!! ADVERTENCIA !!');
        end
        %set(handles.text2,'FontSize',8);
    case 2
        try
            PS=serial('COM2');
            fopen(PS);
            warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!
ADVERTENCIA !!');
            set(handles.edit1,'visible','on')
            set(handles.edit3,'visible','on')
            set(handles.text12,'visible','on')
            set(handles.text13,'visible','on')
            set(handles.play,'visible','on')
        catch
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
        set(handles.play,'visible','off')
        set(handles.pause,'visible','off')
        warndlg('No se puede abrir el puerto COM2' , '!!! ADVERTENCIA !!!');
    end
case 3
    try
        PS=serial('COM3');
        fopen(PS);
        warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!!
ADVERTENCIA !!!');
        set(handles.edit1,'visible','on')
        set(handles.edit3,'visible','on')
        set(handles.text12,'visible','on')
        set(handles.text13,'visible','on')
        set(handles.play,'visible','on')
    catch
        set(handles.play,'visible','off')
        set(handles.pause,'visible','off')
        warndlg('No se puede abrir el puerto COM3' , '!!! ADVERTENCIA !!!');
    end
case 4
    try
        PS=serial('COM4');
        fopen(PS);
        warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!!
ADVERTENCIA !!!');
        set(handles.edit1,'visible','on')
        set(handles.edit3,'visible','on')
        set(handles.text12,'visible','on')
        set(handles.text13,'visible','on')
        set(handles.play,'visible','on')
    catch
        set(handles.play,'visible','off')
        set(handles.pause,'visible','off')
        warndlg('No se puede abrir el puerto COM4' , '!!! ADVERTENCIA !!!');
    end
case 5
    try
        PS=serial('COM5');
        fclose(PS);
        fopen(PS);
        warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!!
ADVERTENCIA !!!');

        set(handles.edit1,'visible','on')
        set(handles.edit3,'visible','on')
        set(handles.text12,'visible','on')
        set(handles.text13,'visible','on')
        set(handles.play,'visible','on')
    catch
        set(handles.play,'visible','off')
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
        set(handles.pause,'visible','off')
        warndlg('No se puede abrir el puerto COM5' , '!! ADVERTENCIA !!');
    end
case 6
    try
        PS=serial('COM6');
        fopen(PS);
        warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!
ADVERTENCIA !!');
        set(handles.edit1,'visible','on')
        set(handles.edit3,'visible','on')
        set(handles.text12,'visible','on')
        set(handles.text13,'visible','on')
        set(handles.play,'visible','on')

    catch
        set(handles.play,'visible','off')
        set(handles.pause,'visible','off')
        warndlg('No se puede abrir el puerto COM6' , '!! ADVERTENCIA !!');
    end
case 7
    try
        PS=serial('COM7');
        fopen(PS);
        warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!
ADVERTENCIA !!');
        set(handles.edit1,'visible','on')
        set(handles.edit3,'visible','on')
        set(handles.text12,'visible','on')
        set(handles.text13,'visible','on')
        set(handles.edit1,'visible','on')
        set(handles.play,'visible','on')
    catch
        set(handles.play,'visible','off')
        set(handles.pause,'visible','off')
        warndlg('No se puede abrir el puerto COM7' , '!! ADVERTENCIA !!');
    end
case 8
    try
        PS=serial('COM8');
        fopen(PS);
        warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!
ADVERTENCIA !!');
        set(handles.edit1,'visible','on')
        set(handles.edit3,'visible','on')
        set(handles.text12,'visible','on')
        set(handles.text13,'visible','on')
        set(handles.play,'visible','on')
    catch
        set(handles.play,'visible','off')
        set(handles.pause,'visible','off')
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
        warndlg('No se puede abrir el puerto COM8' , '!! ADVERTENCIA !!');
    end
case 9
    try
        PS=serial('COM9');
        fopen(PS);
        warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!
ADVERTENCIA !!');
        set(handles.edit1,'visible','on')
        set(handles.edit3,'visible','on')
        set(handles.text12,'visible','on')
        set(handles.text13,'visible','on')
        set(handles.play,'visible','on')
    catch
        set(handles.play,'visible','off')
        set(handles.pause,'visible','off')
        warndlg('No se puede abrir el puerto COM9' , '!! ADVERTENCIA !!');
    end
case 10
    try
        PS=serial('COM10');
        fopen(PS);
        warndlg('Introducir rango de temperatura y presionar PLAY' , '!!
ADVERTENCIA !!');
        set(handles.edit1,'visible','on')
        set(handles.edit3,'visible','on')
        set(handles.text12,'visible','on')
        set(handles.text13,'visible','on')
        set(handles.play,'visible','on')
    catch
        set(handles.play,'visible','off')
        set(handles.pause,'visible','off')
        warndlg('No se puede abrir el puerto COM10' , '!! ADVERTENCIA !!');
    end
    otherwise
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
function text2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function uipanel2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to uipanel2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

Métodos:

Empezar

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
function y=empezar(PS)
%ENVIO DE BROADCAST PARA CONOCER IDENTIFICADOR MAC
a=[126 0 15 23 82 0 0 0 0 0 255 255 255 254 2 73 68 12];
p=0;
while(p==0)
fwrite(PS,a);
%pause(3);
leer=fread(PS);
leert=leer';
try
verif=verificar(leert);
p=1;
catch
p=0;
end
end
y=verif();
```

Grafica

```
function grafica(handles,valor)

global ttot;

%CREA LA GRÁFICA PARA EL PRIMER NODO
%SE GRAFICA LA VARIABLE DE TEMPERATURA

axes(handles.axes5)

arreglonodo = [];
arreglonodo(1+length(arreglonodo)) = get_it(valor);
ttot = (length(arreglonodo)-1)*5;
x = 0:5:ttot;
m=length(arreglonodo);
plot(x,arreglonodo,'--rs','LineWidth',2,...
     'MarkerEdgeColor','k',...
     'MarkerFaceColor','g',...
     'MarkerSize',3)

grid on
set(gca,'Xcolor','g')
set(gca,'Ycolor','g')
legend('temperatura del nodo 1','Position',[50 300 360 150])
xlabel(strcat('tiempo de 0 a ', x , ' minutos'))
save arreglonodo;

end

function graficafinal(handles,valor1)
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
numero=valor1;
global ttot;

%SE ACTUALIZA LOS VALORES DE LA GRÁFICA

axes(handles.axes5)

load arreglonodo;
numero=valor1;

arreglonodo(1+length(arreglonodo)) = get_it(numero);
clear numero
clear valor1
ttot = (length(arreglonodo)-1)*5;
x = 0:5:ttot;
m=length(arreglonodo);
plot(x,arreglonodo,'--rs','LineWidth',2,...
     'MarkerEdgeColor','k',...
     'MarkerFaceColor','g',...
     'MarkerSize',3)

grid on
set(gca,'Xcolor','g')
set(gca,'Ycolor','g')

legend('temperatura del nodo 1','Position',[50 300 360 150]);
xlabel(strcat('tiempo de 0 a ', x , ' minutos'))
save arreglonodo;
```

Mac1volta

```
function y=mac1volta(x,PS)
%OBTENER EL VOLTAJE DE CADA MODULO
%SOLICITUD DE VOLTAJE BROADCAST
volts=[126 0 15 23 82 0 0 0 0 0 0 255 255 255 254 2 37 86 30];
fwrite(PS,volts);
pause(1);
leer=fread(PS);
vector=[ ];
e=0;

%VERIFICAR CADA UNO DE LOS MODULOS MEDIANTE SU IDENTIFICADOR
for m = 1:length(x)
    switch x(m)
    case 565
        e=e+1;
        lon=length(vector);
        voltaje=volta565(leer,e);
        if (voltaje==0)
            fwrite(PS,volts);
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
        leer=fread(PS);
        voltaje=volta565(leer,e);
    end
    vector(lon+1)=voltaje;

case 484
    e=e+1;
    lon=length(vector);
    voltaje=volta(leer,e);
    if (voltaje==0)
        fwrite(PS,volts);
        leer=fread(PS);
        voltaje=volta(leer,e);
    end
    vector(lon+1)=voltaje;

case 464
    e=e+1;
    lon=length(vector);
    voltaje=volta464(leer,e);
    if (voltaje==0)
        fwrite(PS,volts);
        leer=fread(PS);
        voltaje=volta464(leer,e);
    end
    vector(lon+1)=voltaje;

case 549
    e=e+1;
    lon=length(vector);
    voltaje=volta549(leer,e);
    if (voltaje==0)
        fwrite(PS,volts);
        leer=fread(PS);
        voltaje=volta549(leer,e);
    end
    vector(lon+1)=voltaje;
end

end

y=vector();
```

Mactemp

```
function y=mactemp(x,PS,handles)

vector=[];
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

e=0;

‡OBTENER LA TEMPERATURA DE CADA MODULO PARA SU ANALISIS

```
for m = 1:length(x)
    switch x(m)
    case 565
        lon=length(vector);
        g1=0;
        while(g1==0)
            try
                ‡ leer=fread(PS,300);

                leer=fread(PS);
                tempt=temperatura565(leer);
                g1=1;
            catch
                g1=0;
            end
        end
        ‡ lon=length(vector);
        vector(lon+1)=tempt;
        ‡ fwrite(PS,dor);

        graficafinal(handles,tempt);

    case 484
        g2=0;
        lon=length(vector);
        while(g2==0)
            try
                leer=fread(PS);
                tempt=temperatura(leer);
                g2=1;
            catch
                g2=0;
            end
        end
        vector(lon+1)=tempt;
        graficafinal1(handles,tempt);

    case 464
        lon=length(vector);
        g1=0;
        while(g1==0)
            try

                leer=fread(PS);
                tempt=temperatura464(leer);
                g1=1;
            catch
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
        g1=0;
    end
    end
    vector(lon+1)=tempt;

    graficafinal2(handles,tempt);
case 549
    lon=length(vector);
    g1=0;
    while(g1==0)
    try

        leer=fread(PS);
        tempt=temperatura549(leer);
        g1=1;
    catch
        g1=0;
    end
    end
        vector(lon+1)=tempt;

    graficafinal3(handles,tempt);
end

end

y=vector();
```

Minmax

```
function minmax(x,mini,maxi)
%VERIFICAR QUE LAS TEMPERATURA DE LOS MODULOS ESTEN DENTRO DEL RANGO
%DESPLEGAR UNA ALARMA SI ESTA LA TEMPERATURA ESTA FUERA DE REANGO
try
for m = 1:length(x)

    if(x(m)<=mini)

        w1=warndlg('Temperatura fuera de rango (MIN)' , '!! ADVERTENCIA !!');
        pause(2);
        close(w1);
%ENVIO DE CORREO ELECTRONICO PARA DAR AVISO DE LA ALERTA DE TEMPERATURA
        send_to = {'cbg8648@gmail.com'};
        subject = 'PRUEBA MATLAB';
        message = {...
            'TEMPERATURA FUERA DE RANGO!',...
            'MINIMO',...
            'ALERTA!',...
        }
    end
end
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
    };

send_mail(send_to, subject, message)
end

if(x(m)>=maxi)

    w=warndlg('Temperatura fuera de rango (MAX)' , '!! ADVERTENCIA !!');
    close(w);
    send_to = {'ebg8648@gmail.com'};
    subject = 'PRUEBA MATLAB';
    message = {...
        'TEMPERATURA FUERA DE RANGO!',...
        'MAXIMO',...
        'ALERTA!',...
    };

};

send_mail(send_to, subject, message)
end

end
catch
    w=warndlg('PROBLEMA AL MANDAR MAIL' , '!! ADVERTENCIA !!');
    close(w);
end
end
Send_mail

function send_mail(recipients, subject, mail_message)
% send_mail sends a mail message through Gmail
% function send_mail(subject, recipients, mail_message, attachments)
% input arguments:
% subject: A string - subject of the mail
% recipients: A cell array of strings - Email addresses of recipients
%           eg. {'mail1@mail.com', 'mail2@mail.com'}
% mail_message: A cell array of strings - Actual body of the message A cell per
line.
% attachments: A cell array of string - A cell per attachment: path to a file to
attach Email.
%           Use [] for none.
% Define these:

%CONFIGURACIÓN DEL SERVIDOR Y CUNETA DE CORREO

mail = 'wsn.zigbee@gmail.com'; %Your GMail email address
password = '802.15.4'; %Your GMail password
% Don't touch unless you need to change the Email supplier (currently Gmail)
setpref('Internet','E_mail',mail);
```

Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
setpref('Internet','SMTP_Server','smtp.gmail.com');
setpref('Internet','SMTP_Username',mail);
setpref('Internet','SMTP_Password',password);
props = java.lang.System.getProperties;
props.setProperty('mail.smtp.auth','true');
props.setProperty('mail.smtp.socketFactory.class',
'javax.net.ssl.SSLSocketFactory');
props.setProperty('mail.smtp.socketFactory.port','465');
% Send the email
%sendmail(recipients, subject, mail_message, attachments);
sendmail(recipients, subject, mail_message);
```

Tabla

```
function tabla(x,y,z)
%CREAR TABLA DEPENDIENDO DE LA POSICIÓN EN QUE LLEGAN LAS TRAMAS
datos=[x;y;z];
mytable = uitable;
j=1;
    for i = 1:length(x)
        data(i,1)={x(i)};
        j=j+1;
    end

    for k = 1:length(y)
        data1(k,1)={y(k)};
        j=j+1;
    end

    for l = 1:length(z)
        data2(l,1)={z(l)};
        j=j+1;
    end

columnname = {'Dispositivo', 'Bateria Volts', 'Temperatura'};

dataf=[data data1 data2];
set(mytable,'Position',[600 500 360 150]);
set(mytable,'Data',dataf);
set(mytable,'ColumnName',columnname);
set(mytable,'ColumnWidth',{80})

end
```

Temperatura

```
function y=temperatura(x)
tfinal=0;
```


Redes sensoriales inalámbricas basadas en una versión propietaria del protocolo IEEE 802.15.4

```
if(x(m)==126 && x(m+2)==17 && x(m+15)==73)
try
    %sall=x(6:13);
    posicion=posicion+1;
    % valor=iden;
    for n=6:13

        identificador= x(m+n);
        identificador1=identificador+iden;
        iden=identificador1;
        cont=cont+1;
        %des=[126 0 16 23 82 0 19 162 0 64 45 94 100 255 254 2 83
        %77 0 19];
        if (cont==8)
            iden=0;
            cont=0;
        end
        modificado = [original(1:(posicion - 1)), valor,
original(posicion:end)];
        end
        vector(posicion)=identificador1;
        %modificado = [original(1:(posicion - 1)), valor, original(posicion:end)];
        catch
            iden=0;
        end

    end

end

end
y=vector();
```