



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
COMUNICACIONES

TEMA:

“PROTOTIPO DE UNA RED SENSORIAL INALÁMBRICA (WSN) PARA LA
MEDICIÓN DEL NIVEL DE CO₂ EN LA CIUDAD DE AMBATO”

Trabajo de Graduación. Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones

SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Comunicaciones Inalámbricas

AUTOR: Walter Andrade Gutierrez

TUTOR: Ing. Geovanni Brito, Mg.

Ambato - Ecuador

Julio 2015

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del Trabajo de Investigación sobre el tema: **“PROTOTIPO DE UNA RED SENSORIAL INALÁMBRICA (WSN) PARA LA MEDICIÓN DEL NIVEL DE CO2 EN LA CIUDAD DE AMBATO”**, del señor Walter Andrade Gutierrez, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el numeral 7.2 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato julio, 2015

EL TUTOR

Ing. Giovanni Brito, Mg.

AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El presente Proyecto de Investigación titulado: **“PROTOTIPO DE UNA RED SENSORIAL INALÁMBRICA (WSN) PARA LA MEDICIÓN DEL NIVEL DE CO2 EN LA CIUDAD DE AMBATO”**, es absolutamente original, auténtico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato julio, 2015

Walter Andrade Gutierrez

CC: 1803928892

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además autorizo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ambato julio, 2015

Walter Andrade Gutierrez

CC: 1803928892

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

La Comisión Calificadora del presente trabajo conformada por los señores docentes Ing. Juan Pablo Pallo, Mg. e Ing. Santiago Manzano, Mg. revisó y aprobó el Informe Final del Proyecto de Investigación titulado **“PROTOTIPO DE UNA RED SENSORIAL INALÁMBRICA (WSN) PARA LA MEDICIÓN DEL NIVEL DE CO2 EN LA CIUDAD DE AMBATO”**, presentado por el señor Walter Andrade Gutierrez de acuerdo al numeral 9.1 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Vicente Morales L., Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Juan Pablo Pallo, Mg.
DOCENTE CALIFICADOR

Ing. Santiago Manzano, Mg.
DOCENTE CALIFICADOR

DEDICATORIA

A mis queridos padres, Arturo y María Nilfa, por darme la vida, el amor, todo el apoyo incondicional y desinteresado en cada etapa de mi vida.

A mis apreciados hermanos, Robinson, Carolina y Jean Pierre, por cada palabra de aliento que me dieron para sentir confianza y seguridad dentro de mí y poder así terminar mis estudios universitarios.

A mi sobrino Camilo, quien empieza una vida en este mundo y sé que va a llegar mucho más lejos que yo.

A toda mi familia en general que siempre confiaron en mí y en mis capacidades.

A las personas que considero amigos o en ocasiones, más que eso.

Todo el fruto de mi esfuerzo, va dedicado con amor a todos ustedes.

WALTER ANDRADE GUTIERREZ

AGRADECIMIENTO

Agradezco de forma muy sincera a todos los seres que hicieron posible que yo pudiera alcanzar esta meta.

A la Universidad Técnica de Ambato y en especial a la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, y a todos los docentes que compartieron su conocimiento para poder ver el mundo de una manera diferente con paciencia y muchas ganas.

Un agradecimiento enorme y muy especial a los Ingenieros: Geovanni Brito y Mario García, por brindarme su ayuda en un momento crítico de mi vida al darme esperanza y tranquilidad para hacerme entender que en los momentos de angustia siempre existirá alguien quien pueda decirme “tranquilo, todo va a estar bien”

WALTER ANDRADE GUTIERREZ

ÍNDICE

<i>APROBACIÓN DEL TUTOR</i>	<i>ii</i>
<i>AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</i>	<i>iii</i>
<i>DERECHOS DE AUTOR</i>	<i>iv</i>
<i>APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO</i>	<i>v</i>
<i>DEDICATORIA</i>	<i>vi</i>
<i>AGRADECIMIENTO</i>	<i>vii</i>
<i>ÍNDICE</i>	<i>viii</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	<i>xiii</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	<i>xiv</i>
<i>RESUMEN EJECUTIVO</i>	<i>xvi</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xvii</i>
<i>GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS</i>	<i>xviii</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>xx</i>
<i>CAPÍTULO I</i>	<i>1</i>
<i>PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</i>	<i>1</i>
1.1 TEMA.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3.1 DELIMITACIÓN DE CONTENIDO.....	3
1.3.2 DELIMITACIÓN ESPACIAL	3
1.3.3 DELIMITACIÓN TEMPORAL.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.5 OBJETIVOS	5

1.5.1	OBJETIVO GENERAL:.....	5
1.5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
CAPÍTULO II		6
MARCO TEÓRICO		6
2.1	ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	6
2.2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	10
2.2.1	REDES INALÁMBRICAS.	10
2.2.2	CLASIFICACIÓN DE LAS REDES INALÁMBRICAS.	10
2.2.3	TOPOLOGÍAS DE LAS REDES INALÁMBRICAS.	11
2.2.4	TIPOS DE TOPOLOGÍAS DE REDES INALÁMBRICAS.....	11
2.2.5	CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS.	12
2.2.6	RED SENSORIAL INALÁMBRICA.	14
2.2.7	ELEMENTOS DE UNA RED SENSORIAL INALÁMBRICA.....	15
2.2.8	TOPOLOGÍAS EN IEEE 802.15.4	16
2.2.9	ARQUITECTURA DE UN NODO SENSORIAL O “MOTA”.....	17
2.2.10	ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN 802.15.4	18
2.2.11	ESTÁNDAR ZIGBEE	18
2.2.12	LA CAPA FÍSICA (PHY)	19
2.2.13	SEGURIDAD EN ZIGBEE.....	21
2.2.14	ÁREAS DE APLICACIÓN.....	23
2.3	PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	24
CAPÍTULO III.....		25
METODOLOGÍA.....		25
3.1	MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN	25

3.2 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	26
3.3 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	26
3.4 DESARROLLO DEL PROYECTO	26
<i>CAPÍTULO IV</i>	<i>27</i>
<i>DESARROLLO DE LA PROPUESTA</i>	<i>27</i>
4.1 ANTECEDENTES.....	27
4.2 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DEL PROTOTIPO	31
a) FACTIBILIDAD OPERATIVA.....	31
b) FACTIBILIDAD TÉCNICA.....	31
c) FACTIBILIDAD ECONÓMICA	31
d) PROYECCIÓN A FUTURO.....	32
4.3 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA.....	32
4.3.1 EL DIÓXIDO DE CARBONO.....	32
4.3.2 NORMAS SOBRE EL CO2	32
4.3.3 DIÓXIDO DE CARBONO Y SEGURIDAD.....	33
4.4 ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA INALÁMBRICA EMPLEADA.....	34
4.5 ESQUEMA GENERAL DE UNA RED SENSORIAL INALÁMBRICA	35
4.6 ESQUEMA DEL PROTOTIPO DE RED SENSORIAL INALÁMBRICA.....	36
4.7 SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA LA RED SENSORIAL INALÁMBRICA....	37
4.7.1 SELECCIÓN DE UN SENSOR DE CO2	38
4.7.2 SELECCIÓN DE UN MÓDULO CON MICROCONTROLADOR	40
4.7.3 SELECCIÓN DE LOS MÓDULOS INALÁMBRICOS ZIGBEE	43
4.8 DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	46
4.8.1 ESTRUCTURA DEL NODO SENSORIAL	46

a.	INTERFAZ DE ACOPLAMIENTO ENTRE EL MÓDULO SENSOR Y EL MÓDULO INALÁMBRICO	46
1.	ACOPLAMIENTO ENTRE EL MÓDULO SENSOR Y EL ARDUINO UNO ...	46
2.	ACOPLAMIENTO ENTRE EL ARDUINO UNO Y MÓDULO INALÁMBRICO	52
3.	ACOPLAMIENTO DEL MÓDULO XBEE PRO S2B Y LA XBEE SHIELD	53
a)	INSTALAR XBEE EXPLORER USB.....	53
b)	CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE PRO S2B	54
c)	CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE PRO COMO ROUTERS AT	55
4.8.2	ESTRUCTURA DEL GATEWAY	59
a.	RECEPCIÓN DE LAS MEDICIONES POR MEDIO DEL PROTOCOLO ZIGBEE USANDO UN MÓDULO XBEE PRO S2B.	59
4.8.3	ESTACION BASE - HMI	61
a.	INTERFAZ HOMBRE – MÁQUINA (HMI)	61
4.9	IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO	63
4.9.1	NODOS SENSORIALES	63
4.9.2	GATEWAY	64
4.9.3	ESTACIÓN BASE.....	64
4.10	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	66
4.10.1	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO INDOOR.....	66
4.10.2	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO OUTDOOR	67
4.11	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	72
4.11.1	PRESUPUESTO DEL PROTOTIPO	72
4.12	ESQUEMA DE RED PARA MEDICIÓN DE CO2 EN LA CIUDAD DE AMBATO	74

4.12.1 PUNTOS CRÍTICOS.....	74
4.12.2 DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE REPETICIÓN	75
4.12.3 DISEÑO DE LOS ENLACES	76
4.12.4 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENLACES	77
4.12.5 EQUIPOS PROPUESTOS.....	79
4.12.6 PRESUPUESTO DE LA PROPUESTA DE ENLACE	85
4.12.7 ESQUEMA GENERAL DE RED PROPUESTO	86
<i>CAPÍTULO V.....</i>	88
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</i>	88
5.1 CONCLUSIONES.....	88
5.2 RECOMENDACIONES	89
<i>ANEXOS 93</i>	
<i>ANEXO 1.- HOJA DE DATOS SENSOR DE CO2 MG-811.....</i>	94
<i>ANEXO 2.- HOJA DE DATOS ATMEL 328P.....</i>	96
<i>ANEXO 3.- HOJA DE DATOS Xbee-PRO (S2B).....</i>	100
<i>ANEXO 4.- PROGRAMACIÓN DE CADA ARDUINO PARA LOS MÓDULOS SENSORIALES</i>	124
<i>ANEXO 5.- PROGRAMACIÓN DEL HMI EN EL PROTOTIPO DE RED SENSORIAL </i>	127
<i>ANEXO 6. -PROPAGACIÓN DE ENLACES PARA MEDICIÓN DE CO2 EN LA CIUDAD DE AMBATO.....</i>	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Bandas de frecuencia en las que opera el estándar ZigBee.....	19
Tabla 4.1 Descripción de equipos utilizados en estudio para el GAD Municipalidad de Ambato.....	29
Tabla 4.2 Norma técnica OSHAS Y ACGIH NTP 243 aplicadas en estudio para el GAD Municipalidad de Ambato.....	29
Tabla 4.3 Valor promedio de datos recolectados en estudio para el GAD Municipalidad de Ambato.....	30
Tabla 4.4 Efectos de los distintos niveles de CO2.....	33
Tabla 4.5 Comparativa de ZigBee, Bluetooth y Wi-Fi.	34
Tabla 4.6 Tabla comparativa para selección de un sensor de CO2.....	38
Tabla 4.7 Tabla comparativa para selección de un módulo con microcontrolador.	40
Tabla 4.8 Tabla comparativa para selección de los módulos inalámbricos.....	43
Tabla 4.9 Parámetros de configuración para el primer Router AT.....	57
Tabla 4.10 Parámetros de configuración para el segundo Router AT.....	57
Tabla 4.11 Parámetros de configuración para el Coordinador AT.....	60
Tabla 4.12 Mediciones de CO2 en el garaje del Mall de los Andes en Ambato.	69
Tabla 4.13 Presupuesto del prototipo de red para los nodos sensoriales.	72
Tabla 4.14 Presupuesto del prototipo de red sensorial para el gateway.....	72
Tabla 4.15 Costos de mano de obra del prototipo de red sensorial.....	73
Tabla 4.16 Puntos críticos de concentración de CO2 en la ciudad de Ambato.	74
Tabla 4.17 Resumen de la simulación de la propagación en los enlaces.....	78
Tabla 4.18 Características del equipo UBIQUITI ROCKET M5.....	81
Tabla 4.19 Especificaciones principales de la antena Ubiquiti AM-5G20-90.....	83
Tabla 4.20 Presupuesto de la propuesta de enlace en la ciudad de Ambato.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1.	Emisiones de Co2 per cápita en algunos países de Latinoamérica	2
Fig. 2.1.	Topologías de red, soportadas por el estándar IEEE 802.15.4.	16
Fig. 2.2.	Componentes de un nodo de red sensorial o “mota”.	17
Fig. 2.3.	Niveles del modelo de red utilizados.	18
Fig. 2.4.	Bandas de frecuencia de operación de la capa PHY bajo IEEE 802.15.4.	20
Fig. 2.5.	Canalización de la banda 2.4 GHz	20
Fig. 2.6.	Comparación de ZigBee frente a otras tecnologías inalámbricas.	24
Fig. 4.1.	Esquema General de una Red Sensorial Inalámbrica	35
Fig. 4.2.	Diseño de la Red Sensorial inalámbrica	36
Fig. 4.3.	Montaje físico del módulo sensor y el Arduino UNO	47
Fig. 4.4.	Diagrama de Flujo de la programación en cada microcontrolador	50
Fig. 4.5.	Acoplamiento de la plataforma Arduino UNO y la Xbee Shield	53
Fig. 4.6.	Acoplamiento de la plataforma Arduino UNO y la Xbee Shield	54
Fig. 4.7.	Agregar un nuevo módulo XBee PRO S2B.....	55
Fig. 4.8.	Configuración del MÓDULO XBee PRO S2B como Router AT	56
Fig. 4.9.	Escritura de parámetros en los módulos XBee	58
Fig. 4.10.	Acoplamiento del módulo XBee PRO S2B y la Xbee Shield.....	58
Fig. 4.11.	Conexión del gateway hacia la PC.....	59
Fig. 4.12.	Configuración del Módulo XBee PRO S2B como Coordinador AT	60
Fig. 4.13.	Estructura funcional del HMI	62
Fig. 4.14.	Nodos para el prototipo de red sensorial inalámbrica.....	63
Fig. 4.15.	Gateway para la red sensorial inalámbrica de CO2.	64
Fig. 4.16.	Aspecto del funcionamiento en el HMI.	65
Fig. 4.17.	Prueba de conexión entre el gateway y un módulo XBee PRO.....	66
Fig. 4.18.	Prueba entre la estación base y un nodo sensorial a 250m	67
Fig. 4.19.	Prueba entre la estación base y un nodo sensorial a 30m	68
Fig. 4.20.	Ubicación de la estación base y gateway en el estacionamiento del Mall de los Andes.	71

Fig. 4.21.	Puntos críticos de generación de CO2 en la ciudad de Ambato.	75
Fig. 4.22.	Vista de la ciudad de Ambato desde el cerro Quindialó.....	76
Fig. 4.23.	Propagación de los enlaces con respecto al punto de repetición.....	77
Fig. 4.24.	UBIQUITI NANO STATION M5.....	80
Fig. 4.25.	UBIQUITI ROCKET M5	82
Fig. 4.26.	Antena UBIQUITI AM-5G20-90 armada junto con Ubiquiti ROCKET M5....	82
Fig. 4.27.	F8914 ZigBee Terminal.....	85
Fig. 4.28.	Esquema general de la red sensorial inalámbrica propuesta.....	87

RESUMEN EJECUTIVO

La iniciativa de la presente investigación corresponde a la necesidad de crear una red sensorial inalámbrica para monitorear los niveles del gas CO₂ (Dióxido de carbono) presentes en diferentes espacios cerrados o abiertos de la ciudad de Ambato. Al monitorizar y presentar los resultados, causa un efecto imprescindible para contrastar el impacto que genera las grandes concentraciones de CO₂ y de esta manera poder concienciar a los ciudadanos. Planteándose una solución práctica a dicha dificultad mediante la aplicación de tecnología inalámbrica ZigBee.

Se diseña e implementa un prototipo de red sensorial inalámbrica para la medición del nivel de CO₂ en la ciudad de Ambato, que permita el envío de cada medición del CO₂ en dos nodos sensoriales, utilizando dispositivos electrónicos para procesar la información como lo es el “Arduino UNO” que suministran la facilidad de conexión con los sensores de CO₂ en cada nodo sensorial y utilizando módulos ZigBee que crean la conexión entre los nodos sensoriales y el gateway.

Cada nodo sensorial envía los datos adquiridos a través de los módulos inalámbricos con tecnología ZigBee al Gateway ubicado en la estación base, la misma que contiene una interfaz con la capacidad de monitorear cada nodo sensor. Por medio del gateway en la interfaz de usuario se recibe y visualiza las mediciones enviadas desde cada nodo sensorial.

Adicional a todo esto se propuso un diseño de red sensorial para la ciudad de Ambato en donde se enlazarían entre sí varios puntos críticos de emisión de CO₂ por medio de un punto de repetición.

Palabras clave: Red sensorial, inalámbrico, ZigBee, CO₂, mota, gateway.

ABSTRACT

The initiative of this investigation corresponds to the need to create a wireless sensor network to monitor levels of CO₂ (carbon dioxide) gas present in different closed or open spaces Ambato. By monitoring and presenting the results, this causes a must to contrast the impact that high concentrations of CO₂ and thus to raise public awareness effect. A practical solution to this difficulty is posed by applying wireless ZigBee.

It is designed and implemented a prototype wireless sensor network to measure the level of CO₂ in the city of Ambato, allowing sending each measurement of CO₂ in two sensory nodes, using electronic devices to process information such as the "Arduino UNO" that provide ease of connection with CO₂ sensors in each sensor node and using ZigBee modules that create the connection between sensory nodes and gateway.

Each sensor node sends the data acquired through wireless technology ZigBee modules to the gateway located in the base station, it contains an interface with the ability to monitor each sensor node. Through the gateway in the user interface is received and displayed measurements sent from each sensor node.

In addition to this proposed sensor network design for the city of Ambato where they would link together several critical points of CO₂ emissions through a repeat point.

Keywords: Sensory network, Wireless, ZigBee, CO₂, mote, gateway.

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

- AES: Advanced Encryption Standard (Estándar de Encriptación Avanzada)
- Bluetooth: Es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN).
- BPSK: Binary Phase Shift Keying (modulación por desplazamiento de fase).
- CO₂: Dióxido de carbono.
- dBm: Unidad de medida de potencia expresada en decibelios (dB)
- Datasheet: Hoja de datos Técnicos.
- DIN: Digital IN (Entrada digital).
- DOUT: Digital OUT (Salida Digital).
- FTDI: (Future Technology Devices International). Compañía de dispositivos semiconductores privada escocesa especializada en tecnología USB.
- Gateway: Puerto de enlace – salida.
- HMI: Human Machine Interface (Interfaz Hombre-Máquina).
- IEEE: Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- ISM (Industrial, Scientific & Medical), son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas Industrial, Científica y Médica.
- Kbps: KiloBits Per Second.
- LAN: Local Area Network.
- MAC: Media Access Control (Control de Acceso al Medio).
- Mbps: MegaBits por Segundo.
- MHz: MegaHertz.
- Modo AT: Modo transparente, se envía los datos tal y como se reciben.
- Mota: Dispositivo electrónico que tiene acceso al mundo exterior por medio de sensores.
- OQPSK: Offset Quadrature Phase-Shift Keying (Modulación por desplazamiento cuadrifásica compensada).

- PC: Personal Computer (Computadora Personal).
- PHY:PhysicalLayer (Capa física), es la interfaz entre la MAC y el medio inalámbrico.
- QPSK:QuadraturePhase-ShiftKeying(modulación por desplazamiento cuadrafásica).
- Rx: Recibir o Receptor.
- RSSI: ReceivedSignalStrengthIndicator(Indicador de fuerza de la señal recibida).
- TTL: Transistor-transistorLogic (Lógica de Transistor a Transistor).
- Tx: Transmitir o Transmisor.
- USB: Universal Serial Bus.
- WLAN: Wireless Local Área Network (Red Inalámbrica de Área Local).
- WMAN: WirelessMetropolitan Área Network (Red Inalámbrica de Área Metropolitana).
- WPAN: Wireless Personal Área Networks(Red Inalámbrica de Área Personal).
- WWAN: Wireless Wide Área Network(Red inalámbrica de área amplia).
- WSN: Wireless Sensor Network (Red Sensorial Inalámbrica).
- ZigBee: Especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de las WPAN.

INTRODUCCIÓN

Este prototipo de red sensorial inalámbrica para la medición del nivel de CO₂ en la ciudad de Ambato pretende mejorar la monitorización de los niveles de dicho gas debido a que se contara con mediciones en tiempo real en cualquier punto específico de la ciudad donde quiera emplearse.

Esta investigación fue desarrollada principalmente para generar datos que permitan la concientización a la ciudadanía sobre los efectos y la disminución de la calidad de vida en cada persona que genera la gran concentración de este gas. Dichos datos son adquiridos aplicando tecnología inalámbrica disponible.

El desarrollo de la presente investigación se efectuó en cinco capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el primer capítulo se plantea el problema que se requiere solucionar, adicionalmente exponer todas las causas y consecuencias investigadas junto a la delimitación y la justificación, las cuales aprueban las razones por las que se espera desarrollar la investigación. Finalmente se proponen los objetivos que orientarán la investigación.

En el segundo capítulo, se presentan los antecedentes investigativos relacionados al tema de investigación; así como la respectiva fundamentación teórica que asiente involucrarse de manera profunda en el tema propio, para finalmente dar paso a la propuesta de solución, en la que se narra brevemente la solución al problema de investigación.

Dentro del tercer capítulo, se presenta la modalidad básica de investigación usada para el progreso de este trabajo. Para concluir con este capítulo, se expone el desarrollo del proyecto que consiste en los pasos que se deben seguir para desempeñar los objetivos planteados en el capítulo uno.

El cuarto capítulo, contiene el desarrollo propio del proyecto. Se presenta la fundamentación científica que da el inicio al desarrollo de la propuesta. Dentro de este capítulo, se detalla claramente el diseño de la red sensorial Inalámbrica, así como la

selección de equipos para la posterior implementación del prototipo, junto a las respectivas pruebas de funcionamiento que garantizan la fiabilidad del prototipo.

Finalmente, en el quinto capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó una vez culminado el plan de investigación, entre las que se menciona aspectos importantes que deben considerarse como soporte científico para investigaciones futuras.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 TEMA

“Prototipo de una red sensorial inalámbrica (WSN) para la medición del nivel de CO₂ en la ciudad de Ambato”.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El nivel actual de concentración de dióxido de carbono es el más alto de los últimos 420.000 años y probablemente, de los últimos 20 millones de años. Debido a la cantidad de emisiones, el CO₂ es el gas invernadero que más ha contribuido a este efecto. El CO₂ proviene de la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y el cambio en el uso de los suelos.

Las condiciones ambientales mundiales necesitan ser monitorizadas continuamente y en tiempo real para un determinado espacio geográfico de interés. Esto permite conocer los valores de parámetros medioambientales que colaboren en la realización posterior de estudios sobre contaminación.

En la figura 1.1 se observa el valor per cápita de las emisiones de CO₂ de Ecuador y varios países de Latinoamérica hasta el año 2010, los datos provienen del banco mundial[1].

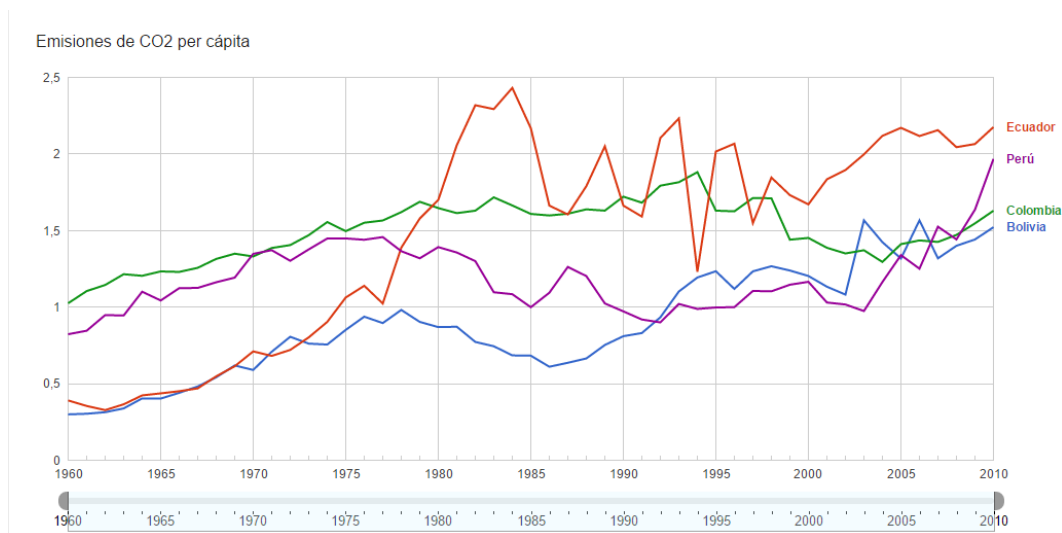


Fig. 1.1. Emisiones de Co₂ per cápita en algunos países de Latinoamérica
Fuente: TheWorld Bank[1].

La Organización Meteorológica Mundial propuso el 11 de enero del 2013 en Ecuador una urgente reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero, así como adaptar a la sociedad mundial al calentamiento global[2].

Según el ingeniero Henry Donoso, técnico de la Unidad de Calidad Ambiental en el Ministerio del Ambiente de la ciudad de Ambato, en Ecuador son mínimas las mediciones de CO₂ que se han realizado con redes sensoriales inalámbricas, debido a que aparecen como nuevas tecnologías para percibir el impacto medioambiental que tienen las acciones de los ciudadanos.

Las altas concentraciones de CO₂ pueden desplazar oxígeno en el aire, resultando en concentraciones de oxígeno menores para la respiración. Por lo tanto, los efectos de la deficiencia de oxígeno pueden combinarse con efectos de toxicidad de CO₂ disminuyendo la calidad de vida del ser humano.

Según el Ingeniero David López, director de la Unidad de gestión Ambiental en el Gobierno autónomo descentralizado de la ciudad de Ambato (GAD), en Ambato es nula la monitorización del CO2 con redes sensoriales inalámbricas. A pesar del constante pedido de información del (GAD) hacia la secretaria del ambiente.

1.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 DELIMITACIÓN DE CONTENIDO

Línea de Investigación: Tecnologías de comunicación.

Sub línea de Investigación: Comunicaciones inalámbricas.

Área académica: Comunicaciones.

1.3.2 DELIMITACIÓN ESPACIAL

La presente investigación se desarrolló en diferentes espacios abiertos y cerrados del casco urbano en la ciudad de Ambato.

1.3.3 DELIMITACIÓN TEMPORAL

La presente investigación se desarrolló en el lapso de tiempo entre los meses de Septiembre a Diciembre del 2014.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Es importante controlar el nivel presente de CO₂ en la atmósfera debido a que afecta la capa de ozono y favorece a que la radiación solar y el calor de la Tierra no se disipen hacia el espacio exterior, lo que ocasiona que aumente la temperatura global del planeta.

El clima siempre ha sido dinámico y es por ello que siempre tendrá variaciones. El problema del cambio climático es que en el último siglo el ritmo de estas variaciones se ha acelerado mucho, y la tendencia es que esta aceleración va a ser exponencial si no se toman medidas que lo controlen. El ritmo desbocado de esta modificación climática tendrá como consecuencia grandes alteraciones físicas, como la elevación del nivel del mar, enormes deterioros ambientales y serias amenazas para la humanidad, así como extensión de enfermedades, daños por acontecimientos climáticos violentos, pérdida de cosechas, disminución de los recursos hídricos, entre otros problemas.

Además de los argumentos ya mencionados se puede aseverar que el proyecto fue factible para su realización porque se tenía acceso a la información tanto técnica como datos teóricos para el desarrollo del mismo.

Los beneficiarios directos en la realización de este proyecto fueron los pobladores de la ciudad de Ambato al obtener datos que permitan conocer los niveles de CO₂ presentes en los lugares donde se realizaron las pruebas funcionamiento de este prototipo.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL:

- Construir un prototipo de una red sensorial inalámbrica (WSN) para medir el nivel de CO₂ en la ciudad de Ambato.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la tecnología a emplearse en el diseño del prototipo de una red sensorial inalámbrica (WSN) para medir el nivel de CO₂.
- Diseñar el prototipo de una red sensorial inalámbrica (WSN) para medir el nivel de CO₂.
- Configurar una interfaz gráfica de usuario, para visualizar los datos obtenidos de CO₂ en cada nodo de la red sensorial inalámbrica (WSN).
- Implementar y probar el prototipo de red sensorial inalámbrica para la medición del nivel de CO₂.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En Febrero del 2009, en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de Escuela Politécnica Nacional, los señores Juan Carlos Estrada Jiménez y Diego Javier Reinoso Chisaguano en su tesis titulada: “Diseño e implementación de un prototipo de monitoreo remoto de contaminación ambiental utilizando tecnología GSM” diseñan e implementan un prototipo que realiza mediciones de forma automática mediante sensores de CO, CO₂, temperatura y humedad. Los datos adquiridos son enviados en forma de SMS, a través de un teléfono celular a una aplicación de monitoreo[3].

En el año 2012, en el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga, los señores Leopoldo Vinicio Guagchinga Moreno y Eduardo Marcelo Guamaní Mena en su tesis titulada: “Diseño e implementación de un sistema de medición electrónico de gases contaminantes y contaminación acústica en dos lugares de la ciudad de Latacunga utilizando un sistema de transmisión basado en tecnología ZigBee”

desarrollan e implementan un sistema que permite medir los niveles de los gases contaminantes y la cantidad de ruido sonoro en el ambiente. Se basa en la utilización de sensores de monóxido de carbono, dióxido de carbono, de un medidor del nivel de ruido sonoro y de un microcontrolador para la adquisición de los datos. Para la transmisión se utiliza dispositivos con tecnología ZigBee[4].

En febrero del 2014, en la carrera de Ingeniería en Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, el señor Ricardo Elicio Rosero Yugsi y la señorita Mónica Andrea Flores Marcillo en su tesis titulada: “Diseño e implementación de un sistema de seguridad con comunicación inalámbrica utilizando tecnología ZigBee y control de eventos por medio de SMS para la empresa de calzado Doccetishoes” desarrollan un sistema inalámbrico con tecnología ZigBee donde se puede comunicar una bodega y la planta de producción. El sistema está conformado por un control principal, sistema sensorial de humo (sensor de humo, movimiento y magnético), actuadores y dispositivos para el ingreso de datos. Las alertas se dan por medio de mensajes de texto de SMS para reportar anomalías al usuario[5].

En la universidad de Zaragoza de España, en el Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón conjuntamente con el Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones los señores y señorita D. Digón, B. Bordetas, A. Otín, N. Medrano y S. Celma, presentan el documento técnico titulado “Implementación de una Red Sensorial Inalámbrica (WSN)” en donde interconectan y programan 5 dispositivos nodales RCB (Radio Control Boards) de la marca Atmel® AVR® Z-Link™, un tablero de control con pantalla LCD (BoardDisplay) que forman una red LR-WPAN (Low-RateWireless Personal Area Network) con una tecnología de comunicaciones de Radio Frecuencia basada en el estándar IEEE 802.15.4 además programan microcontroladores de los dispositivos nodales, y de la interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite la monitorización de las medidas de los nodos sensoriales en tiempo real[6].

En octubre del año 2007, en la Escuela Técnica superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria de España, la señorita Esther Elena Flores Carbajal presentó el trabajo de Fin de Máster titulado “Redes de sensores inalámbricas aplicado a la medicina” en donde se lleva a cabo un estudio detallado sobre las redes de sensores inalámbricas aplicadas en el área de la medicina con parámetros de medición como la temperatura del paciente, oximetría del pulso y frecuencia cardiaca [7].

En el año 2007, en el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército, los señores David Alexander Arias Álvarez y David Sebastián Gudiño Ponce en su tesis titulada: “Estudio, diseño e implementación de una red sensorial inalámbrica para el monitoreo y control de temperatura en un ambiente industrial reducido” en el que diseñaron e implementaron una red sensorial inalámbrica con tecnología ZigBee. Se utilizaron cuatro nodos esclavos y un nodo que hace de estación base, para el monitoreo y control de temperatura dentro de un ambiente industrial. La interfaz gráfica permite el monitoreo de la información obtenida en una trama serial de 17 bytes. Trama en la que se almacena: el número de identificación de cada nodo; su estado de energía y la temperatura sensada. Además, esta interfaz ofrece la posibilidad de enviar señales de control a un Microcontrolador, el PIC16F877A, que realiza un sistema de control básico de ON/OFF sobre ventiladores DC, dispuestos estratégicamente sobre la zona que ha sido monitoreada [8].

En el año 2007, en la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela de Ingeniería en Sistemas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, el señor Diego Vinicio Reyes Mena presentó la Tesis de grado titulada: “Diseño de la red de sensores inalámbricos mediante la evaluación del desempeño de las plataformas arduino y waspmote bajo el protocolo de comunicaciones ZigBee para el monitoreo y control de los embalses de Agoyán y Pisayambo” donde propone un diseño de red de sensores inalámbricos mediante la evaluación del desempeño de las plataformas Arduino y Waspote bajo el protocolo de comunicaciones ZigBee para el monitoreo y control de los embalses de Agoyán y

Pisayambo de CELEC EP (Corporación Eléctrica del Ecuador Empresa Pública), Unidad de Negocio HidroAgoyán, ubicada en la provincia de Tungurahua, cantón Baños [9].

En el año 2013 en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en la Carrera de Ingeniería de Sistemas y Computación de la Facultad de Ingeniería el señor Carlos Reinoso en su tesis titulada “Diseño y construcción de un prototipo de sistema de sensores inalámbricos para alerta temprana de deslaves” menciona lo siguiente, “*Con el desarrollo de este proyecto de investigación, se pudo encontrar varios campos de interés para su investigación y desarrollo, por ejemplo el desarrollo de proyectos en el mejoramiento del monitoreo de riesgos naturales como erupciones volcánicas, desbordamiento de ríos, incendios forestales, contaminación de cuencas de agua o del aumento de gases contaminantes en el aire, etc.*

Estas ideas, dan apenas una pauta de la gran cantidad de aplicaciones que apoyados en las redes inalámbricas puedan ser el catalizador del desarrollo de diversos espacios de nuestro país”[10].

En Las Palmas de Gran Canaria – España, en junio del 2012 en el Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería de la Universidad de las Palmas, el señor Pablo Pico en su trabajo de fin de máster Titulado: “Infraestructura Polivalente Basada en Sensores Inalámbricos Aplicada a la Monitorización Medioambiental Georeferenciada” menciona textualmente, “*...con la fusión de varias tecnologías se puede llegar a resolver problemas grandes y complejos de forma sencilla, como por ejemplo, analizar los componentes básicos de un Sistema de Información Geográfica que permiten gestionar los datos que llegan al centro de control desde la red sensorial*” [11].

2.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.2.1 REDES INALÁMBRICAS.

Las redes inalámbricas son aquellas que se comunican por un medio de transmisión no guiado (sin cables) mediante ondas electromagnéticas. Con una red cableada, un dispositivo tiene que estar en un punto fijo para mantenerse conectado y formar parte de ella. Con un dispositivo inalámbrico, sin embargo, al usuario le basta con estar dentro del radio de cobertura de la red para mantenerse conectado [12].

2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES INALÁMBRICAS.

En la actualidad no existe una clasificación universal que diferencie de forma uniforme a todas estas tecnologías, por lo cual se ha optado por dividir según su cobertura geográfica. Las cuales se detallan a continuación:

WPAN: (Wireless Personal Area Networks, Red Inalámbrica de Área Personal) es una red para la comunicación entre distintos dispositivos, tanto ordenadores, puntos de acceso a internet, teléfonos móviles, dispositivos de audio, impresoras, etc. cercanos al punto de acceso. Estas redes normalmente son de unos pocos metros y para uso personal. Entre las diferentes tecnologías de WPAN destacan Bluetooth y ZigBee.

WLAN: (Wireless Local Area Network, Red Inalámbrica de Área Local) es un sistema de comunicación de datos inalámbrico flexible muy utilizado como alternativa a las redes LAN cableadas o como extensión de éstas. Utiliza tecnología de radiofrecuencia que permite mayor movilidad a los usuarios al minimizar las conexiones cableadas. La tecnología asociada a esta forma de red es Wi-Fi.

WMAN: (Wireless Metropolitan Area Network o Red Inalámbrica de Área Metropolitana) es una red de alta velocidad que dando cobertura en un área geográfica extensa, proporciona capacidad de integración de múltiples servicios mediante la transmisión de

datos, voz y vídeo, sobre medios de transmisión inalámbricos. Destacadas tecnologías asociadas son WiMax.

WWAN: (Wireless Wide Área Network) son típicamente redes celulares para telefonía móvil y transmisión de datos. Destacadas tecnologías asociadas son GSM (telefonía móvil 2G) y UMTS (telefonía móvil 3G) [13].

2.2.3 TOPOLOGÍAS DE LAS REDES INALÁMBRICAS.

Se denomina topología a la forma en que se conectan los diferentes sistemas y equipos a la red. El diseño y funcionamiento topológico de las redes de comunicación y la de control varían dependiendo de distintos factores como el económico, la modularidad, la flexibilidad, la rapidez en la comunicación, entre otros.

2.2.4 TIPOS DE TOPOLOGÍAS DE REDES INALÁMBRICAS.

Los tipos de topologías de redes inalámbricas tenemos los siguientes:

a) TOPOLOGÍA EN ESTRELLA:

La topología en estrella es aquella que mantiene los equipos unidos a un núcleo central en el que normalmente reside la capacidad de control de la red, proporcionando una comunicación bidireccional del núcleo a los terminales y viceversa. La comunicación siempre está obligada a pasar por el nodo central y si esta falla se pierde la comunicación en la red.

b) TOPOLOGÍA EN ANILLO:

La topología en anillo es una topología en la cual los equipos se conectan formando un anillo, los elementos que la conforman tendrán al menos dos puntos de entrada/salida de información. Una característica de esta red, es que la información circulará por todos los

equipos de la red en su viaje desde el origen hacia su destino; una desventaja importante es que presenta retardos variables en función de los puntos conectados en un itinerario y la más grande de ellas es que el tráfico se ve cortado cuando uno de los equipos falla.

c) TOPOLOGÍA EN BUS:

La topología en bus es aquella en la cual la red posee un único canal de comunicaciones a la que se conectan todos y cada uno de los elementos del sistema, los mismos que envían y reciben todos los mensajes a través del medio de comunicación. Esta topología es de fácil implementación y crecimiento en la red, posee una arquitectura simple. La dificultad que posee es que su desempeño disminuye a medida que la red crece, un problema perjudica a toda la red, pérdidas de datos por colisiones, red que ocupa mucho espacio.

d) TOPOLOGÍA EN MALLA:

La topología en malla es aquella en que todos los equipos integrantes de una red se conectan a todos los demás. El coste en medios de comunicación depende del número de conexiones y suele ser elevado, ganando sin embargo en fiabilidad frente a fallos y en posibilidades de reconfiguración [14].

2.2.5 CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS.

Entre la clasificación de la tecnología Inalámbrica se han considerado las más relevantes, considerando su área de cobertura, aplicaciones que soporta y el desarrollo en la industria de las telecomunicaciones en la última década, entre estas tenemos:

a) WI-MAX.

Es una tecnología inalámbrica de transmisión de datos, la cual norma la transmisión de datos usando ondas de radio y la recepción a través de microondas, esta trabaja con el estándar 802.16 más conocido como Wi-Max. Esta permite reducir los costes de acceso a

abonado, posibilita acceder a un gran número de clientes con un reducido número de repetidores, de forma que los costes se reducen, pudiendo atender múltiples comunicaciones de voz con una calidad aceptable gracias a su ancho de banda.

Las características principales de las redes Wi-MAX son: Distancia de cobertura hasta 50 kilómetros (teóricamente).

- Velocidades de hasta 70 Mbps.
- Facilidades para añadir más canales.
- Anchos de banda configurables y no cerrados.
- Soporte nativo para calidad de servicio (QoS)
- Alta seguridad y bajo costos de adquisición e implementación.

b) WI-FI

Es una tecnología inalámbrica de área local inalámbrica (WLAN) es una red de tamaño medio que utiliza la frecuencia de radio 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n en lugar de cables y permite realizar diversas conexiones inalámbricas a Internet. Se trata de una tecnología con una amplia gama de productos y sistemas fiables y asequibles en el mercado y con un grado de implantación elevado y en aumento.

c) BLUETOOTH

Bluetooth es una frecuencia de radio de disponibilidad universal que conecta entre sí los dispositivos habilitados para Bluetooth situados a una distancia de hasta 10 metros. Permite conectar una por ejemplo: una notebook o un teléfono celular con otras máquinas, teléfonos móviles, cámaras, impresoras, teclados, altavoces y otros dispositivos del ordenador.

d) ZIGBEE

Se le denomina ZigBee al estándar que define la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para armados de redes de corta distancia y baja velocidad de datos, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes

inalámbricas de área personal. Su objetivo son las aplicaciones para redes Wireless que requieran comunicaciones seguras y fiables con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías[15].

Como se ha explicado en el inciso anterior las tecnologías inalámbricas son muchas, pero ZigBee constituye como el eje principal en el presente proyecto pues este es el encargado de la transmisión de datos, a continuación se trata de forma amplia y específica el funcionamiento del estándar antes mencionado, así mismo se debe tener en cuenta de por qué se ha elegido esta tecnología cuando se tiene otras posibilidades, es por eso que se realizara una comparativa con otros medios de transmisión, a partir de esto poder entender y asimilar de forma clara que para el presente proyecto que un medio ZigBee es la más adecuada.

2.2.6 RED SENSORIAL INALÁMBRICA.

“El concepto de Redes inalámbricas de Sensores o su tan extendida traducción inglesa Wireless Sensor Network (WSN) se basa en una serie de pequeños dispositivos electrónicos que tienen acceso al mundo exterior por medio de sensores. El nombre que se le da a este tipo de dispositivos es el de “mota”, que proviene de la traducción inglesa de la palabra “mota de polvo” con la finalidad de indicar en una sola palabra dos de los conceptos principales: su pequeño tamaño y la idea de que pueden estar situados en cualquier lugar”[16].

Una red de sensores es un sistema formado por nodos que incorporan a su capacidad de comunicación inalámbrica, la capacidad de sensar alguna variable física. Dicha variable física luego convertirla en un dato digital y enviarla, ya sea a otro nodo o a un nodo central para procesarla y convertirla en información útil.

2.2.7 ELEMENTOS DE UNA RED SENSORIAL INALÁMBRICA.

a) PLATAFORMA DE APLICACIÓN EN PC

Es un elemento de la red que puede ser por lo general una PC o eventualmente una computadora portátil usada para monitorear y controlar el funcionamiento de un grupo de sensores y actuadores conectados a una red sin hilos.

b) GATEWAY

El gateway es la interfaz entre la plataforma de aplicación y los nodos que componen la red.

c) NODOS INTERMEDIOS

También conocidos como “routers” son los encargados de extender el alcance de la red, rodear obstáculos a la transmisión sin hilos y proveer rutas alternativas para el tránsito de mensajes que se envían al gateway.

d) NODOS FINALES O MOTA

Las motas o nodos finales son considerados dispositivos de funciones reducidas pues tan solo tienen la labor de sentir la información y transmitirla al siguiente nodo de la red.

e) SENSORES Y ACTUADORES

Estos son los dispositivos encargados de transformar la señal física en una señal eléctrica que es la que queremos medir, almacenar y tratar.

f) FIRMWARE

El software requerido para el funcionamiento en conjunto de la red reside en forma de firmware en cada mota y en la plataforma de aplicación como un conjunto de funciones de la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API).

En lo referente a lamota, el firmware es el encargado de incorporar a dicho mota en lo que llamaríamos una red ad-hoc, encargándose de manejarlo como parte de ella y no como una entidad independiente. El firmware es también responsable de empaquetar las lecturas digitales de los sensores y enviarlas a través de la red.

2.2.8 TOPOLOGÍAS EN IEEE 802.15.4

Dependiendo de la aplicación final, se puede trabajar con una de lasdos topologías que considera el estándarIEEE 802.15.4, ya sea topología en estrella, árbol omalla.En la figura 2.1 se muestra el diagrama de las dos topologías que sepueden utilizar para configurar los distintos elementos de la red.

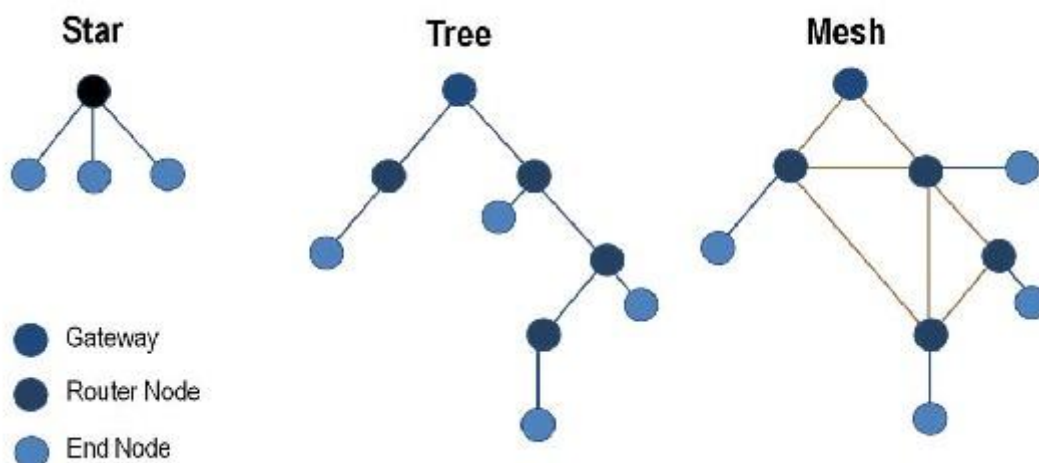


Fig. 2.1. Topologías de red, soportadas por el estándar IEEE 802.15.4.

Fuente: <http://sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>

a. ESTRELLA

En este tipo de configuración también llamado “Sistema de un solo salto” cada nodo se encuentra en directa comunicación con su base o gateway.

b. MALLA

Esta configuración es un sistema multi-saltos (multi-hopping). En esta configuración los nodos intermedios, también llamados routers y que pueden ser tan solo motas, hacen saltar la información de un sensor a otro en busca del gateway. Estos nodos intermedios son capaces de auto-configurarse para encontrar el mejor camino aún en caso de que un nodo se encuentre defectuoso. Dicha cualidad de auto-configurarse dependerá del protocolo sobre el cual estén funcionando.

c. ARBOL

En esta topología los nodos están colocados en forma de árbol. Es parecida a una serie de redes en estrella interconectadas pero sin un nodo central. En cambio, tiene un nodo de enlace troncal, desde el que se ramifican los demás nodos.

2.2.9 ARQUITECTURA DE UN NODO SENSORIAL O “MOTA”

Cada uno de los nodos que forman la red, contienen sensores y actuadores, un procesador que controla su funcionamiento, una unidad de memoria que sirve para almacenar las lecturas de los sensores, una batería y un transceptor encargado de la comunicación, tal y como se muestra en la siguiente figura.



Fig. 2.2. Componentes de un nodo de red sensorial o “mota”.

Elaborado por: El Autor.

2.2.10 ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN 802.15.4

Uno de los puntos más importantes de este tipo de redes es el uso de Hardware adecuadamente en el proceso de comunicación. Para realizar una correcta transmisión y recepción de los mensajes, el software utilizado se basa en estándares que definen como trabajar con las diferentes capas que se utilizan en el proceso. En el nivel físico y en el nivel de enlace de datos se utiliza el estándar de datos IEEE 802.15.4 y además se utiliza el estándar ZigBee de comunicaciones inalámbricas que sirve de complemento al estándar IEEE 802.15.4[17], como se muestra en la siguiente figura.

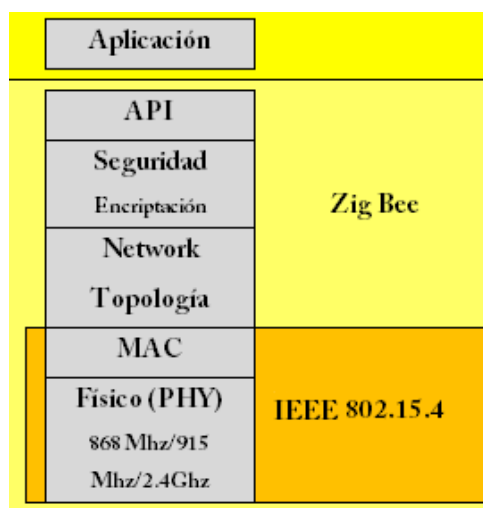


Fig. 2.3. Niveles del modelo de red utilizados.

Fuente: <http://sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>

2.2.11 ESTÁNDAR ZIGBEE

Uno de los puntos más interesantes de estas redes en las redes de comunicación vía radio. Para ello se utiliza el estándar ZigBee, a partir de la norma IEEE 802.15.4, que define el protocolo de alto nivel de comunicación inalámbrica y la interconexión de dispositivos con comunicación vía radio para redes de área personal inalámbricas (WPAN), patrocinado por la ZigBee Alliance. Esta alianza sin ánimo de lucro, formada por 25 empresas la mayoría

de ellas fabricantes de semiconductores, tiene el objetivo de auspiciar el desarrollo e implantación de una tecnología inalámbrica de bajo coste.

Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos, corto alcance y maximización de la vida útil de sus baterías. Opera en las bandas libres de los 2.4 GHz, 915 MHz y 868 MHz, como se ve en la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Bandas de frecuencia en las que opera el estándar ZigBee.

	Banda	Aplicabilidad	Ancho de Banda	Canales
2.4 Ghz	ISM	Mundial	250 Kbps	16
915 Mhz	ISM	Usa	40 Kbps	10
868 Mhz		Europa	40 Kbps	1

Elaborado por: El Autor.

2.2.12 LA CAPA FÍSICA (PHY)

El diseño de la capa PHY está impulsado por la necesidad de emplear de manera eficaz la energía y a bajo costo para el seguimiento y control de las aplicaciones de baja velocidad.

Bajo IEEE 802.15.4, los enlaces inalámbricos pueden funcionar en tres bandas de frecuencias sin licencia: 858 MHz, 902-928 MHz y 2,4 GHz, como se ve en la figura 2.4.

Basados en estas bandas de frecuencia, el estándar IEEE 802.15.4 define tres medios físicos:

1. Secuencia directa de espectro ensanchado usando comunicación digital con la modulación BPSK que opera en la banda de 868 MHz a una velocidad de datos de 20 kbps.
2. Secuencia directa de espectro ensanchado usando BPSK que opera en la banda de 915 MHz a una velocidad de datos de 40 kbps.

- Espectro ensanchado de secuencia directa utilizando O-QPSK que opera en la banda de los 2.4-GHz a una velocidad de datos de 140 kbps.

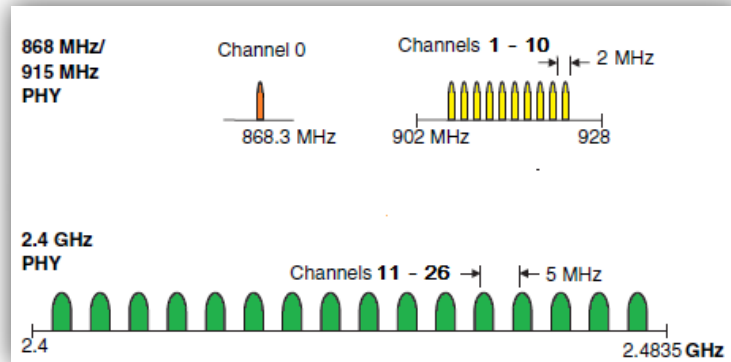


Fig. 2.4. Bandas de frecuencia de operación de la capa PHY bajo IEEE 802.15.4.

Elaborado por: El Autor.

La capa física PHY soporta 11 canales en las frecuencias de 868/915 MHz, de los cuales encontramos 10 canales entre los 902 y 928 MHz y un solo canal entre los 868 y 868.6 MHz. La probabilidad que una sola red utilice los once canales es mínima, debido al soporte regional de dichas bandas.

La PHY de los 2.4 GHz utiliza 16 canales de 2 MHz, en el rango de 2.4 y 2.4835 Ghz, con un espacio de 5 MHz entre cada canal, con el objetivo de que en la transmisión y recepción se pueda facilitar requerimientos de filtrado como se puede ver en la siguiente figura.

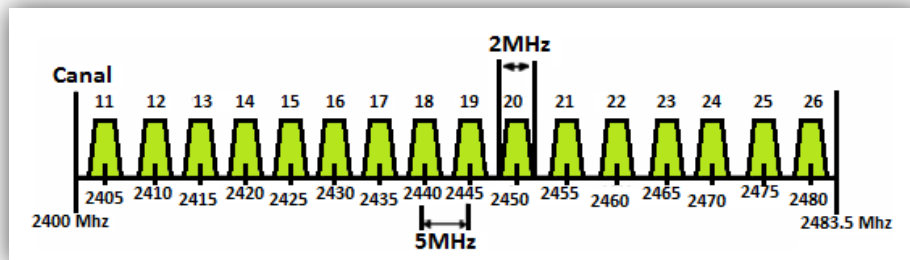


Fig. 2.5. Canalización de la banda 2.4 GHz

Elaborado por: El Autor.

2.2.13 SEGURIDAD EN ZIGBEE.

La seguridad dentro de una red inalámbrica es altamente vulnerable por la característica primordial que no requiere un medio físico cableado para poder comunicarse entre sí. La orientación de ZigBee se dirige hacia un mercado de bajo costo, por lo cual la seguridad a implementar es más difícil bajo este estándar, se debe tener en cuenta que ZigBee no se conectan directamente a una base de datos es por eso que estos los dispositivos no deben sobrepasar el tamaño de la cabecera y además ser capaces de gestionar la seguridad por sí mismos.

La seguridad de la subcapa MAC IEEE 802.15.4 en ZigBee, es el punto importante en una transmisión, en donde se especifica 4 servicios.

- Control de accesos: Los dispositivos comprobados en la red se mantienen en una lista.
- Datos Encriptados: Son encriptados con un código de 128 bits.
- Integración de tramas: Protegen los datos de ser modificados por otros.
- Secuencias de refresco: Comprueban que las tramas no se reemplazado por otras.

La red ZigBee debe tener particular cuidado, pues los dispositivos externos pueden acceder físicamente y los diferentes entornos de trabajo no se pueden conocer de antemano. Poseer una encriptación en los mensajes favorece a la integridad y privacidad de los datos que se está transmitiendo, por lo cual AES (AdvanceEncryption Standard) es el algoritmo que ZigBee utiliza con claves de 16 bytes para obtener un texto cifrado con dificultad de vulnerar.

En el estándar ZigBee/802.15.4 emplea tres diferentes tipos de claves detalladas a continuación:

- **Claves de enlace:** Estas dotan de seguridad a las comunicaciones que se presentan punto a punto a nivel de aplicación, la clave se conoce solo entre dispositivos dentro de la comunicación.
- **Claves de red:** Proveen de seguridad a nivel de red, los dispositivos que se encuentre en una misma red la deben compartir.
- **Claves maestro:** La utilizan dos dispositivos en el inicio de la comunicación para generar la clave de enlace. Esta clave no es usada para encriptar tramas.

Los modos de seguridad que se presentan en ZigBee se detallan a continuación:

- **Modo de seguridad estándar.** Dentro de cada dispositivo de la red se almacenas las diferentes claves, no se necesita una gran memoria para almacenar datos relacionados con la seguridad de la red.
- **Modo de seguridad avanzado.** En este modo, el centro de seguridad debe almacenar el listado de dispositivos y las claves, además debe controlar todas las políticas de admisión. Solamente ZigBee PRO soporta este modo de seguridad.

Dentro del estándar ZigBee se emplea la seguridad respecto a la autenticación de dispositivos así como la de datos.

Autenticación de Dispositivos: Confirma un nuevo dispositivo en la red como auténtico. Al tener un nuevo dispositivo en una red segura, el centro de la red deberá confirmar si el nuevo dispositivo es auténtico o no debido a su estado de “unido” pero “no autentico” para esto, si es el segundo caso se le pedirá que se retire de la red.

Autenticación de Datos: El objetivo de autenticar los datos es el de asegurar los mismos y que no se altere durante la transmisión. Para esto el transmisor deberá usar un código de integridad de mensaje MIC la cual genera métodos que solo conocen el receptor y el transmisor, si otro dispositivo no posee la misma MIC los datos son considerados como no auténticos. Al aumentar el número de bits en el MIC, se incrementa el nivel de autenticidad de datos. La norma ZigBee y IEEE 802.15.4 soporte MIC de 32 bits, 64 bits y 128 bits.

Cada dispositivo posee una dirección única dentro de la red capaz de relacionar con dos métodos de direccionamiento llamadas direccionamiento corto de 16 bits aplicable en una sola red, donde su ventaja ahorrar memoria para almacenaje de direcciones, y el direccionamiento extendido de 64-bit el cual permite tener un rango de dispositivos en la red que es de 2^{64} . La dirección corta se define en la capa de red mientras que la extendida se define en la capa MAC[18].

2.2.14 ÁREAS DE APLICACIÓN.

El grupo denominado ZigBee Alliance son quienes se encuentran desarrollando una infinidad de aplicaciones en las que se puede utilizar, ZigBee está diseñado para aplicaciones donde se transmitan bytes esporádicamente. Pero con el desarrollo tecnológico que se tiene en la actualidad ZigBee está presente en otras aplicaciones en campos tan variados en el cual predomine el control y monitoreo como la medicina, agricultura, sistemas de seguridad, etc. Hay que resaltar que ZigBee compite con otras tecnologías inalámbricas que son más sólidas ya establecidas en el mercado, como Wi-Fi y Bluetooth, pero que no son completas es por eso que en la figura 2.6 se muestra los grupos de aplicaciones en algunos estándares, donde ZigBee resulta ideal en el envío de datos[18].

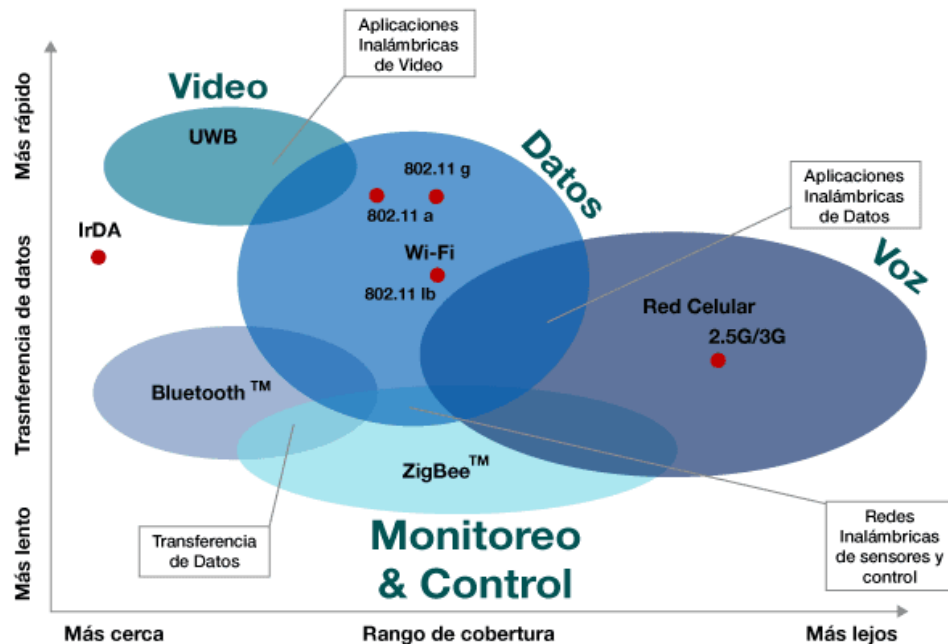


Fig. 2.6. Comparación de ZigBee frente a otras tecnologías inalámbricas.

Fuente: <http://sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>

Es ideal el uso de la tecnología inalámbrica ZigBee para redes estáticas, escalables con muchos dispositivos, con pocos requisitos de ancho de banda y uso infrecuente y dónde se requiera una duración muy prolongada de la batería.

2.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

La implementación de un prototipo de red sensorial inalámbrica (WSN) para la medición del nivel de CO₂ en la ciudad de Ambato servirá para obtener los valores de las concentraciones de CO₂ al igual que el desarrollo de proyectos que involucren la detección, disminución y prevención en altas concentraciones del mismo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN

La presente fue una investigación aplicada, la que se desarrolló utilizando:

Investigación bibliográfica, porque la explicación científica de las variables del tema de investigación se la realizó consultando en libros de electrónica y publicaciones de internet referentes a la programación de dispositivos electrónicos y sus aplicaciones, de esta forma se obtuvo de forma adecuada la información necesaria.

Investigación de campo, para lo cual se realizó un estudio sistemático de los hechos en el lugar en que se produce los acontecimientos. Con esta modalidad se estableció un contacto en forma directa con la realidad, para tener información de acuerdo con los objetivos del proyecto.

3.2 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La recolección de información se realizó a través de mediciones in situ del CO₂ y pruebas de funcionamiento del prototipo.

3.3 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información se presentó y analizó de la siguiente forma:

- Análisis de los niveles de CO₂ en la ciudad de Ambato.
- Presentación de la información medida en cada nodo sensorial mediante un HMI.

3.4 DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el desarrollo de la investigación se efectuó los siguientes pasos:

- Determinación de los elementos electrónicos necesarios para crear una red sensorial inalámbrica que mida el nivel de CO₂.
- Selección de la tecnología inalámbrica a emplearse en la red sensorial inalámbrica
- Configuración de la interfaz gráfica de usuario para visualizar los datos obtenidos de CO₂ en cada nodo de la red sensorial inalámbrica.
- Implementación del prototipo de red sensorial inalámbrica para medir el nivel de CO₂.
- Evaluación y comprobación del funcionamiento del prototipo de red sensorial inalámbrica (WSN) para medir el nivel de CO₂.
- Elaboración y presentación del informe final.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

4.1 ANTECEDENTES.

Es alarmante ver los niveles de CO₂ que están presentes en el ambiente y la necesidad de buscar mecanismos para concientizar a la población de los efectos producidos por una alta concentración de CO₂ en su ambiente.

El uso de nuevas tecnologías inalámbricas permite realizar aplicaciones en el campo de la telemetría capaces de captar las concentraciones de CO₂ presentes en diferentes lugares de cualquier ciudad.

Las redes inalámbricas sensoriales hoy en día se consideran importantes en las diferentes empresas dedicadas a la captación de diferentes escenarios en controles ambientales.

La utilización de estas redes sensoriales, implica un rendimiento óptimo para garantizar la comunicación vía radio frecuencia.

En la presente red sensorial se decidió utilizar nodos con tecnología inalámbrica como lo es la radio frecuencia y a su vez ubicar dichos nodos en diferentes puntos estratégicos para realizar mediciones de CO₂ en la ciudad de Ambato.

En la investigación de campo realizada se visitó las siguientes instituciones y se tuvo contacto con las siguientes personas:

- Ministerio del Ambiente en la ciudad de Ambato, Ing. Henry Donoso, Unidad de Calidad Ambiental.
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la ciudad de Ambato, Ing. David López, Director de la Unidad de Gestión Ambiental.

Se obtuvo el “INFORME DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE EN AMBIENTES INTERNOS” desarrollado para el GAD MUNICIPALIDAD DE AMBATO y llevado a cabo por el Ing. Gustavo Flores Herrera en 27 puntos de 5 parqueaderos identificados por el personal del GAD Municipalidad de Ambato.




El monitoreo lo realizó con mediciones puntuales de aproximadamente 15 minutos continuos del 6 al 7 de noviembre del 2014.

La descripción de los equipos utilizados, el método de análisis y el método de detección se detallan en la tabla 4.1.

La tabla 4.2 detalla la norma técnica OSHAS Y ACGIH NTP 243 aplicadas al CO₂ y otros gases en este estudio.

Los lugares y el valor promedio de datos recolectados en cada uno de ellos se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.1 Descripción de equipos utilizados en estudio para el GAD Municipalidad de Ambato

EQUIPO	PARÁMETRO	MÉTODO	RESOLUCION
Met One Instruments Aerocet 531 	Material Particulado PM ₁₀	Diodo Láser	0,1 ug
	Material Particulado PM _{2,5}		0,1 ug
Bacharac h IEQ Chek 	CO	Celdas electroquímicas	1 ppm
	CO ₂		1 ppm
Thermo 42C 	NOx (NO ₂ y NO)	Quimiluminiscencia USEPA RFNA 1289-074	0,0001 ppm

Fuente: GAD Municipalidad de Ambato

Tabla 4.2 Norma técnica OSHAS Y ACGIH NTP 243 aplicadas en estudio para el GAD Municipalidad de Ambato

Contaminante	Concentración	Tiempo	Origen
CO ₂	18.000 mg/m ³ (10.000 ppm)	8 horas	PEL-TWA (OSHA)
	9.000 mg/m ³ (5.000 ppm)	8 horas	TLV-TWA (ACGIH)
	54.000 mg/m ³ (30.000 ppm)	10 minutos	PEL-STEL (OSHA) / TLV-STEL (ACGIH)
CO	40 mg/m ³ (35 ppm)	8 horas	PEL-TWA (OSHA)
	229 mg/m ³ (200 ppm)	15 minutos	PEL-TECHO (OSHA)
	55 mg/m ³ (50 ppm)	8 horas	TLV-TWA (ACGIH)
	440 mg/m ³ (400 ppm)	15 minutos	TLV-STEL (ACGIH)
NO ₂	1,8 mg/m ³ (1 ppm)	15 minutos	PEL-STEL (OSHA)
	5,6 mg/m ³ (3 ppm)	8 horas	TLV-TWA (ACGIH)
	9,4 mg/m ³ (5 ppm)	15 minutos	TLV-STEL (ACGIH)

Fuente: GAD Municipalidad de Ambato

Tabla 4.3 Valor promedio de datos recolectados en estudio para el GAD Municipalidad de Ambato

UBICACIÓN	PUNTO DE MUESTREO	PM10 µg/m3	PM2.5 µg/m3	CO ppm	CO2 ppm	NOx ppm
Mercado Urbina (12 de Noviembre y Solano)	P1. Entrada	3,8	23,8	8,5	221	0,0568
	P2. Parqueadero 16	6,9	78,7	3,1	221	0,0356
	P3. Parqueadero 36	4,6	49,0	8,4	230	0,0297
	P4. Parqueadero 46	3,6	36,7	8,1	255	0,0354
	P5. Parqueadero 60	2,6	27,2	7,7	238	0,0407
Mercado Central (12 de Noviembre y Marieta de Veintimilla)	P1. Entrada	1,8	12,1	2,2	225	0,0384
	P2. Entrada nivel A	2,1	21,5	4,8	222	0,0212
	P3. Parqueadero 31	1,8	18,9	5,4	239	0,0084
	P4. Parqueadero 1	6,6	100,0	19,3	362	0,1988
	P5. Parqueadero 36	7,1	118,6	14,1	342	0,0050
	P6. Parqueadero 15	9,2	148,5	15,5	350	0,0100
	P7. Parqueadero 21	13,6	193,5	26,8	423	0,0153
	P8. Parqueadero 9	9,8	113,7	29,8	449	0,0126
Mercado Modelo (Cevallos y Tomás Sevilla)	P1. Salida	5,4	69,9	34,4	449	0,0121
	P2. Parqueadero 59	4,0	42,8	38,9	441	0,0432
	P3. Entrada	6,5	27,3	11,6	308	0,0327
	P4. Parqueadero 26	4,8	39,3	19,9	327	0,0307
	P5. Parqueadero 14	3,5	39,0	20,1	341	0,0353
GAD de Ambato (Bolívar y Castillo)	P1. Entrada	5,6	63,4	5,6	266	0,0420
	P2. Generador Eléctrico	15,4	167,4	9,0	283	0,0365
	P3. Centro – Sur del Parqueadero	12,1	208,3	8,4	290	0,0340
Mercado Artesanal (Juan B Vela y Mariano Eguez)	P1. Salida	3,0	40,0	17,9	357	0,1857
	P2. Bloque D Motocicletas	3,6	53,8	13,8	325	0,0045
	P3. Junto a Bodega 4	2,8	35,2	13,5	308	0,0059
	P4. Bodega 1	2,3	28,4	2,7	230	0,0112
	P5. Entrada	2,6	38,4	2,4	229	0,0148
	P6. Bodega 3	2,3	29,7	3,2	239	0,0127

Fuente: GAD Municipalidad de Ambato

Con respecto al CO₂, la conclusión obtenida por el Ing. Gustavo Flores Herrera fue que todos los puntos se encuentran dentro de norma en CO₂ ya que sus valores son menores de 9.000 mg/m³ (5.000 ppm) a condiciones estándar.

4.2 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DEL PROTOTIPO

a) FACTIBILIDAD OPERATIVA

El proyecto desde el punto de vista operativo es factible, debido a que se puede utilizar en diferentes espacios públicos de la ciudad o a su vez las instalaciones privadas con el debido permiso de los dueños de los inmuebles, para la fijación de los nodos de prueba.

b) FACTIBILIDAD TÉCNICA

Desde el punto de vista técnico el desarrollo de la propuesta resulta factible ya que los equipos y elementos para crear la red sensorial se encuentran disponibles a nivel local, nacional o a su vez mediante importación. Dichos elementos cumplen con las características técnicas ideales para implementar este prototipo de red sensorial.

c) FACTIBILIDAD ECONÓMICA

La propuesta es factible económicamente debido a que los gastos que se requieren en el desarrollo del prototipo corren por parte del investigador, por otra parte, es completamente justificable la inversión que se realiza con esta propuesta al determinar los niveles de CO₂ presentes en la ciudad de Ambato que tanto daño causan a los seres vivos.

d) PROYECCIÓN A FUTURO

Con el presente proyecto a futuro se pretende determinar los niveles de CO₂ presente en el ambiente de diferentes ciudades de Ecuador para de esta forma obtener un dato general mensual o anual en todo el país.

4.3 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA

4.3.1 EL DIÓXIDO DE CARBONO

El dióxido de carbono es un gas incoloro, denso y poco reactivo. Forma parte de la composición de la tropósfera, la capa de la atmósfera más próxima a la Tierra (11 kilómetros de espesor), actualmente en una proporción de promedio anual, de 393 ppm, 0,039%. La cifra 393 ppm se refiere al Observatorio Mauna Loa, Hawaii, que se supone equivalente a la del conjunto del planeta, incluidos desiertos y polos, pero en las zonas habitadas es muy superior [19].

4.3.2 NORMAS SOBRE EL CO₂

Normatividad ASHRAE 62-1989: La concentración de CO₂ en un edificio ocupado no debe exceder 1000 ppm.

OSHA: Media ponderada en el tiempo sobre cinco días laborales de 8 horas no debe exceder 5000 ppm

Boletín para la construcción 101 (Bb101): Las normas del RU para escuelas indican que el CO₂ promediado sobre todo el día (por ej., 9 a.m. a 3:30 p.m.) no debe exceder 1500 ppm [20].

4.3.3 DIÓXIDO DE CARBONO Y SEGURIDAD

El dióxido de carbono es un gas no tóxico y no inflamable. Sin embargo, la exposición a concentraciones elevadas puede representar un riesgo de vida. Cuando se utiliza, produce, envía o almacena gas CO₂ o hielo seco, la concentración de CO₂ puede elevarse a niveles muy peligrosos. Debido a que el CO₂ es inodoro e incoloro, es necesario utilizar los sensores adecuados para garantizar la seguridad de las personas[21].

Los efectos de los distintos niveles de CO₂ en el ser humano se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 4.4 Efectos de los distintos niveles de CO₂

EFFECTO DE LOS DISTINTOS NIVELES DE CO₂	
CONCENTRACIÓN	EFFECTO
350 - 450 ppm	Concentración atmosférica típica
600 - 800 ppm	Calidad del aire interno aceptable
1.000 ppm	Calidad del aire interno tolerable
5.000 ppm	Límite promedio de exposición en un período de ocho horas
6.000 - 30.000 ppm	Preocupación, solo exposición breve
3 - 8%	Incremento de la frecuencia respiratoria, dolor de cabeza
> 10%	Náuseas, vómitos, pérdida de conocimiento
> 20%	Pérdida de conocimiento repentina, muerte

Fuente: VAISALA, Dióxido de Carbono y Seguridad[21]

4.4 ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA INALÁMBRICA EMPLEADA

Como ya se mencionó ZigBee opera en la banda libre de radiofrecuencia electromagnética en áreas Industriales, Científicas y Médicas (ISM) de 2.4 GHz donde resulta importante mencionar que otros estándares también comparten esta banda de frecuencia, es por eso que en la tabla 4.5 se puede observar algunas de las principales características de cada una de ellas:

Tabla 4.5 Comparativa de ZigBee, Bluetooth y Wi-Fi.

TECNOLOGÍA	ZigBee(WPAN)	Bluetooth(WLAN/W PAN)	Wi-Fi(WLAN)
Estándar	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11x
Aplicaciones	Monitoreo y control	Equipos móviles	Video, Web, Email
Alcance(metros)	1-100+	1-10+	1-100
Velocidad de Tx	20-250 Kbps	3Mbps	Hasta 54Mbps
CorrienteTx	Tx: 30mA	Tx: 40mA	Tx: >400mA
CorrienteStandby	3 μ A	0.2 mA	20mA
Capacidad	Memoria 60kb	Memoria >100kb	Memoria >100kb
Soporte nodos/red	Nodos 65535	Nodos 8	Nodos 8

Fuente: <http://www.ekopl.net/tabla-comparativa/>

La tecnología inalámbrica Bluetooth es un popular sistema de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.1 el mismo que funciona a una velocidad de transmisión de datos de 3 Mbps. Se puede percibir que Bluetooth y ZigBee tienen corrientes en transmisión equivalentes, pero ZigBee tiene un recurso significativamente mejor, más baja corriente en Standby. Esto se debe a que los dispositivos en redes de Bluetooth tienen que dar información a la red constantemente para mantener la sincronización, por lo que no pueden cambiarse fácilmente al modo "sleep". En la tecnología Wi-Fi se solicita la actividad casi ininterrumpida de los dispositivos en la red. La ventaja de este estándar es la gran cantidad de datos que se pueden transferir, no obstante para transmitir y pasarse al modo StandBy la corriente es mucho mayor.

ZigBee ofrece una gran flexibilidad con respecto a la conexión de redes en malla, la posibilidad de que los dispositivos se puedan dormir, un bajo consumo en modo normal y mucho más bajo en modo sleep, bajo coste, etc. resultando idónea su implantación en redes de sensores inalámbricos. Por todas estas razones y beneficios se decide utilizar la tecnología inalámbrica ZigBee como medio de transmisión inalámbrica en este prototipo de red sensorial.

4.5 ESQUEMA GENERAL DE UNA RED SENSORIAL INALÁMBRICA

La red sensorial inalámbrica tendrá un sistema general como se observa en la figura 4.1, en la misma que se puede encontrar los siguientes elementos:

- Nodos inalámbricos (mota).
- Puerta de enlace (gateway).
- Estación base.

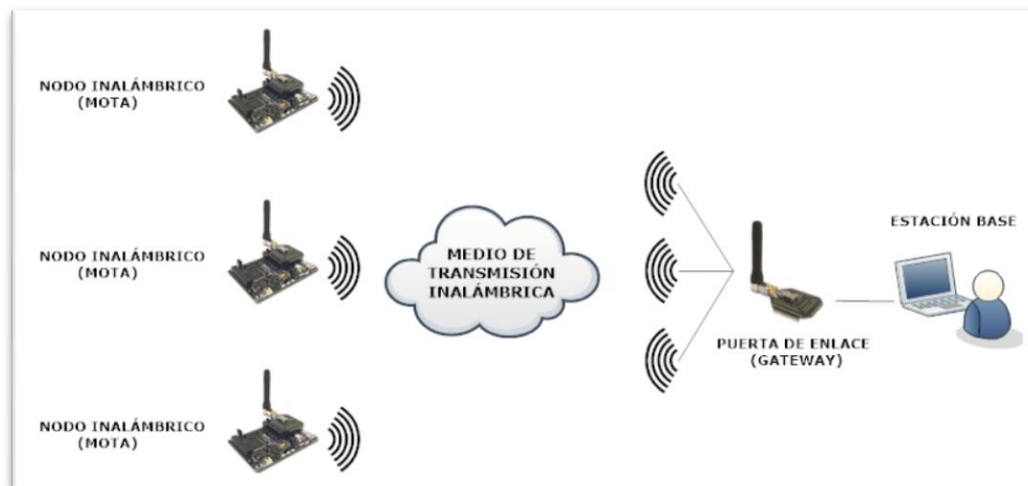


Fig. 4.1. Esquema General de una Red Sensorial Inalámbrica

Elaborado por: El Autor.

4.6 ESQUEMA DEL PROTOTIPO DE RED SENSORIAL INALÁMBRICA

Para que el presente proyecto permita determinar los niveles de CO₂, se plantea una red como la de la figura 4.2, en la que se puede ver el acople (en cada nodo sensorial) de un sensor de CO₂ (1) y un módulo inalámbrico ZigBee mediante la utilización de un microcontrolador para procesar los datos adquiridos y transmitirlos por medio del módulo inalámbrico bajo el estándar de comunicación libre ZigBee(2).

Utilizando este estándar ZigBee se logra una comunicación inalámbrica a gran distancia de cada nodo sensorial. De manera conjunta funciona un módulo inalámbrico en el gateway responsable de recibir (3) los datos enviados desde los diferentes nodos sensoriales y de comunicarse (4) con la PC de la estación base por medio de la comunicación serial típica de este tipo de módulos.

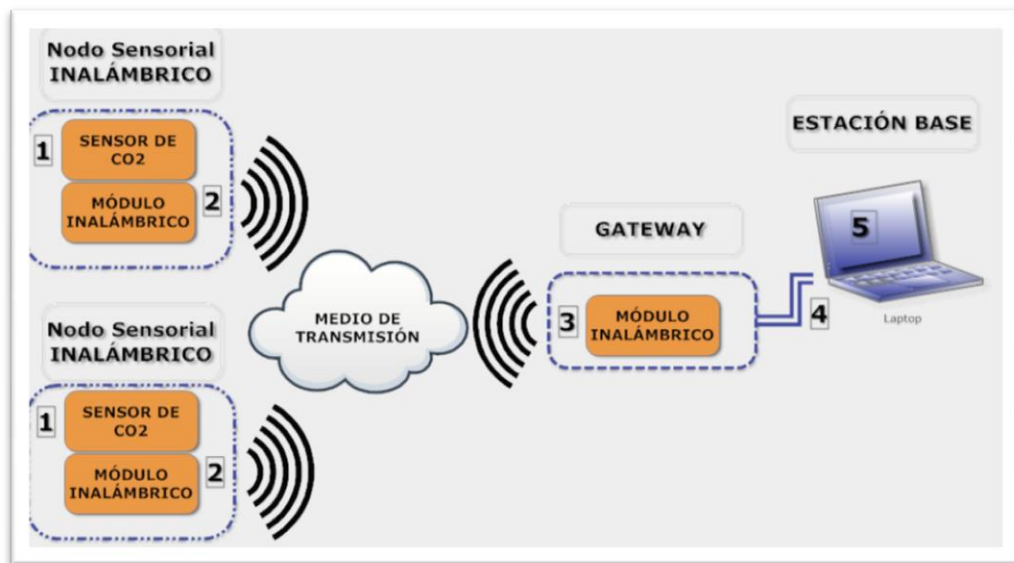


Fig. 4.2. Diseño de la Red Sensorial inalámbrica

Elaborado por: El Autor.

Por último, en la estación base se diseña una interfaz gráfica (5), la misma que permite visualizar los datos de cada sensor.

En forma general, la red sensorial se compone de tres elementos y un medio de transmisión con las siguientes características:

NODO SENSORIAL

- a) Interfaz de acoplamiento entre el sensor de CO₂ y el módulo de transmisión inalámbrico.
 - a. Acoplamiento del sensor de CO₂ con el microcontrolador.
 - b. Acoplamiento del microcontrolador con el módulo de transmisión inalámbrico.

MEDIO DE TRANSMISIÓN

- b) Transmisión de datos por medio del protocolo de comunicación ZigBee.

GATEWAY

- c) Recepción de los datos (sensados y procesados) de cada nodo, mediante el protocolo de comunicación ZigBee usando un módulo inalámbrico.
- d) Interfaz serial para la transmisión de los datos desde el módulo inalámbrico hacia la PC.

ESTACION BASE

- e) HMI, que permite visualizar los datos que envía cada nodo sensorial al gateway.

4.7 SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA LA RED SENSORIAL INALÁMBRICA

En el desarrollo del presente proyecto es necesaria la utilización de sensores de CO₂ (y su módulo acondicionador de señal), microcontroladores, módulos de transmisión inalámbrica, para lo cual se plantean las siguientes tablas comparativas con el propósito de seleccionar los elementos y equipos que mejor se adecuen a la propuesta de solución.

4.7.1 SELECCIÓN DE UN SENSOR DE CO2

A continuación se muestra la siguiente tabla comparativa con los distintos sensores de CO2 comerciales:

Tabla 4.6 Tabla comparativa para selección de un sensor de CO2.

	NAP-21AA [22]	Mg-811[23]	TGS-4160[24]
CARACTERÍSTICA			
Fabricante	NEOMOTO	HANWEI ELECTRONICS	FIGARO
Concentración de Gas ppm (partes por millón)	400 - 8000ppm	350 - 10000ppm	350 - 50000ppm
Dependencia en humedad	Baja	Baja	Baja
Voltaje de calentamiento	1.8 +/- 0.2v	6.0±0.1 V	5.0 ± 0.2V (DC)
Impedancia	70 ± 7Ω	30.0±5%Ω	11.5 ± 1.1Ω
Corriente	120mA	200mA	aprox. 250mA
Potencia	234mW	1200mW	aprox. 1.25W
Temperatura de operación	-10 - 50°C	-20 - 50°C	10 - 50°C
Temperatura de almacenamiento	-20 - 60°C	-20 - 70°C	-20 - 60°C
Voltaje de Salida	0-20mV	30 - 50mV	220 - 490mV
Costo	\$ 60,00	\$ 56,00	\$ 120,00
Disponibilidad en el mercado	baja	media	baja

Elaborado por: El Autor.

En base a los diferentes datos presentados en la tabla comparativa para la selección de un sensor de CO2, se decidió emplear el modelo Mg-811 de la empresa Hanwei Electronics, debido a su fácil uso, acople, fiabilidad y exactitud de su señal de salida es mejor frente a las otras marcas.

Tiene un consumo de corriente intermedio con respecto al NAP-21A de la empresa NEOMOTO y el TGS-4160 de la empresa FIGARO con una potencia mucho mayor al NAP-21A pero muy próxima a la que se presenta en el TGS-4160.

Es muy significativa la capacidad para medir la concentración de CO₂ que tenga el sensor a elegir, esto dará el rango en el que pueda ser sensado el punto en donde se ubique cada nodo sensorial. El sensor Mg-811 mide niveles de concentraciones importantes en comparación con el NAP-21A el cual solo mide hasta los 8000 ppm (partes por millón).

Un factor importante y decisivo en la elección de este sensor tiene que ver con la mayor disponibilidad y bajo precio en el mercado, en comparación con los sensores NAP-21A y TGS-4160. En este caso, el sensor Mg-811 se puede conseguir en los principales sitios destinados a la subasta de productos a través de internet mientras que los demás resulta muy difícil conseguirlos por compra en tiendas electrónicas, peor aún, en cualquier almacén de venta de elementos electrónicos a nivel nacional.

Para más información de las características y funcionamiento del sensor Mg-811 de DFRobot, diríjase al **Anexo1** de este documento.

4.7.2 SELECCIÓN DE UN MÓDULO CON MICROCONTROLADOR

La siguiente tabla comparativa muestra características de los módulos con microcontrolador más relevantes en el mercado actual:

Tabla 4.7 Tabla comparativa para selección de un módulo con microcontrolador.

CARACTERÍSTICA	TI Launchpad MSP430[25]	PICAXE-28X2 Shield Base[26]	ARDUINO UNO[27]
Empresa	Texas Instruments	Microchip PIC	Arduino –ATMEL
Microcontrolador	MSP 430	28X2	ATmega 328
Voltaje de Operación	1.8 - 3.6 V	5V	5V
Voltaje de alimentación (recomendado)	5V	9-12V	7-12V
Voltaje de alimentación (límites)	4.5V a 5V	4.5V a 5V	6-20V
Corriente DC en cada pin	220uA	25mA	40mA
Entradas/Salidas Digitales	8	Hasta 12 Entradas y 17 salidas	14 (de los cuales 6 son PWM)
Entradas/Salidas Análogas	8	De 3 a 7	6 (solo entradas)
Memoria Flash	16KB	-	32KB
EEPROM	-	256 Bytes	1KB
SRAM	512 Bytes	1296 Bytes	2KB

Rango de Temperatura	-40°C a 85°C	-40°C a 85°C	-40°C a 85°C
Dimensiones	73 X 52mm	75x54mm	75x54mm
Alimentación	Vía USB o fuente externa	Vía USB o Fuente Externa	Vía USB o fuente externa
Comunicación Serial	Si	Si	Si, un puerto físico (se puede configurar más puertos lógicos)
Comunicación con PC	Conexión directa con Cable USB A-mini B	Requiere cable adicional (USB-estéreo 3.5mm conector) y PICAXE-08 Starter Pack CDROM con el software	Conexión directa con Cable USB A-B
Precio	\$ 12,00	\$ 22,00	\$ 33,00
Disponibilidad en el mercado	Muy baja	Muy baja	Alta
Forma de almacenamiento de los programas	Usa la misma conexión USB que la alimentación	Conexión USB con cable (USB-estéreo 3.5mm conector)	Usa la misma conexión USB que la alimentación

Elaborado por: El Autor.

El módulo con microcontrolador a emplearse en el presente proyecto es el **ARDUINO UNO**. Para el desarrollo del prototipo de red sensorial se utilizarán dos módulos, una para cada nodo sensorial.

La elección del Arduino UNO se justifica en base a la tabla comparativa antes presentada; entre algunos factores para descartar el TI Launchpad MSP430 cabe mencionar la necesidad de una fuente fija para su alimentación de 5V. En el caso del ARDUINO UNO tiene un rango de voltaje de entrada considerable; este voltaje puede ser suministrado incluso por una batería común de 9V, útil en casos donde el ARDUINO se ubique en sitios remotos.





Las características presentes en las memorias FLASH, EEPROM y SRAM del microcontrolador ATmega328 (Arduino UNO) resultan en otro factor importante para su elección debido a que cumple con los requisitos necesarios en el desarrollo de este proyecto además el empleo de los puertos digitales/analógicos son muy numerosos, prácticos y fáciles de emplear lo que ahorra significativamente tiempo y dinero comparándolo con la PICAXE-28X2 Shield Base.

En el **Anexo 2** se encuentra la información técnica referente al microcontrolador ATMEGA328 incorporado en el Módulo Arduino Uno.

4.7.3 SELECCIÓN DE LOS MÓDULOS INALÁMBRICOS ZIGBEE

En la siguiente tabla se muestran las diferentes características principales de los distintos módulos inalámbricos ZigBee comerciales:

Tabla 4.8 Tabla comparativa para selección de los módulos inalámbricos.

	ZB-21 ZigBee OEM Module [28]	EasyBeeZigBeeTransceiver Module[29]	MICAz Module[30]	XBee PRO 63mW Zig Bee[31]
CARACTERÍSTICA				
General				
Antena	Chip	Chip	Chip	Alambre
Rendimiento				
Tasa de Datos en RF	250 kbps	250 kbps	250 kbps	250 kbps/up to 1 Mbps
Rango Indoor	30 m	20 - 40 m	20 - 30 m	300 ft (90 m)
Rango Outdoor (Con Línea de Vista)	100 m	200 m	75 - 100 m	2 miles (3.2 km)
Potencia de Transmisión	(-1 dBm)	1 mW (+0 dBm)	1mW (+0dBm)	63 mW (+18 dBm)
Sensibilidad de recepción (1 %PER)	-92 dBm	-92 dBm	-92 dBm	-102 dBm

Características				
Banda de frecuencia	2405MHz hasta 2480MHz	2400MHz hasta 2485MHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Entradas ADC	4 A/D inputs	-	10 bit ADC	(7) 10-bit ADC inputs
Digital I/O	12 I/O de propósito general	-	8	(10) digital I/O
Redes y seguridad				
Topología	Punto a punto	Punto a punto	Punto a punto	Punto a punto, punto a multipunto
Encriptación	128-bit	CRC-16	128-bit AES	128-bit AES
Entrega fiable de paquetes	-	-	-	Retries/Acknowledgements
Canales	-	16 Canales	16 Canales de secuencia directa	15 Canales de secuencia directa
ID	-	-	-	PAN ID, 64-bit IEEE MAC
Requerimientos de Potencia				
Suministro de Voltaje	3.3 V	2.1 - 3.6 VDC	2.1 - 3.6 VDC	2.7 - 3.6 VDC
Corriente de transmisión	45mA	18mA	17.4 mA	205 mA
Corriente de entrada	25mA	20mA	19.7 mA	47 mA
Corriente en Apagado	< 25 uA	-	1 mA	< 3.5 uA
Precio aprox	\$ 38,00	\$ 40,00	\$ 52,00	\$ 60,00
Disponibilidad en el mercado	Muy Baja	Muy Baja	Baja	Alta

Elaborado por: El Autor.

Al analizar la tabla anterior se determinó el uso de los módulos XBeePRO S2B, los mismos que cuentan con algunas características como: dimensiones reducidas, fácil integración, diferentes antenas según las necesidades del usuario, consumo aceptable, buena disponibilidad y lo primordial poseen la homologación ZigBee que concede la Alliance ZigBee por lo cual es la mejor opción frente al resto de módulos de las distintas marcas.

Se ha escogido el módulo XBeePRO S2B para la elaboración del prototipo atendiendo a sus características técnicas, su bajo consumo eléctrico, entre otras a diferencia de los módulos de las otras marcas.

Los módulos XBee PRO S2B pueden ser alimentados en un rango de voltaje que varía desde los 2,7 hasta los 3,6 voltios a diferencia del módulo ZB-21 ZigBee OEM Module que tiene un valor fijo de alimentación de 3,3 voltios, lo que resulta en un factor para descartar el ZB-21. El dispositivo electrónico XBee PRO tiene un bajo consumo en apagado ($< 3.5 \mu\text{A}$) a diferencia de su similar MICAZ que tiene una corriente de apagado de 1mA lo que produce un mayor consumo de energía proveniente de las diferentes fuentes de voltaje de alimentación para este dispositivo, muy necesaria para el prototipo de red sensorial a implementarse el cual requiere un gran ahorro de energía.

La comunicación entre dispositivos XBee PRO S2B es posible a través de tramas para el control desde el dispositivo coordinador hacia el dispositivo final o viceversa ante cualquier eventualidad, por lo cual la mejor red que se adapta a las necesidades de monitorear el CO₂ es la de punto a multipunto para la transmisión de datos características de las que carecen los módulos EasyBee ZigBee Transceiver Module y MICAZ.

Entre los factores importantes y decisivos en la elección de este módulo inalámbrico, están el Rango Outdoor máximo de 3.2 Km, este valor nos indica la distancia máxima de conexión (con línea de vista) entre los módulos inalámbricos, distancia que supera ampliamente a los otros módulos comparados.

La disponibilidad en el mercado de los módulos XBee PRO S2B es alta y de fácil acceso, se puede encontrar en tiendas de venta de elementos electrónicos a nivel local o nacional. En el

Anexo 3, se encuentra la hoja de datos técnicos sobre el módulo XBee PRO S2B, además se encuentra información sobre su configuración.

4.8 DISEÑO DEL PROTOTIPO

4.8.1 ESTRUCTURA DEL NODO SENSORIAL

a. INTERFAZ DE ACOPLAMIENTO ENTRE EL MÓDULO SENSOR Y EL MÓDULO INALÁMBRICO

En cada nodo sensorial es necesario el acople entre el módulo sensor y el módulo inalámbrico, para lo cual se utiliza el Arduino UNO, el mismo que se encarga de procesar los datos adquiridos por el módulo sensor para su posterior transmisión por medio de la red ZigBee.

Dicho acople se realiza mediante tres sencillos pasos:

1. Acoplamiento entre el módulo sensor y el Arduino UNO
2. Acoplamiento entre el Arduino UNO y módulo inalámbrico
3. Acoplamiento del módulo XBee pro S2B y la XBeeShield.

1. ACOPLAMIENTO ENTRE EL MÓDULO SENSOR Y EL ARDUINO UNO

La información obtenida por el sensor de CO2 MG-811 debe ser procesada por el microcontrolador ATmega 328 del Arduino UNO para lo cual se utiliza lenguaje C en el programa ARDUINO 1.0.6.

Estos dos componentes físicamente conectados lucen como en la figura 4.3, en donde el sensor se conecta por cables a la fuente de 5 Volts y a la entrada analógica A0 del módulo Arduino UNO.

Este montaje se realiza de igual manera tanto para el nodo sensorial 1 como para el nodo sensorial 2.

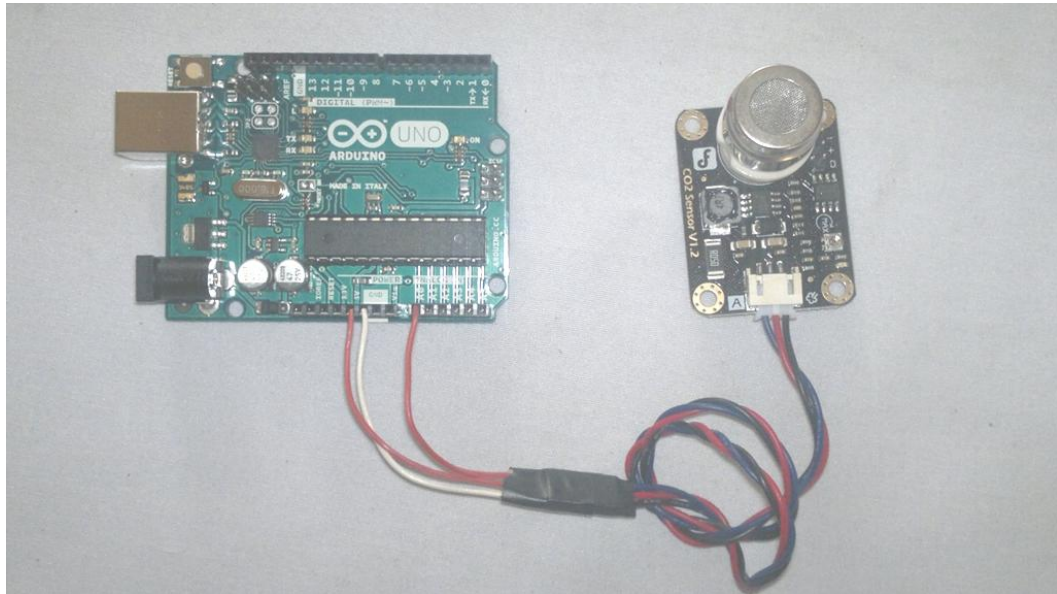
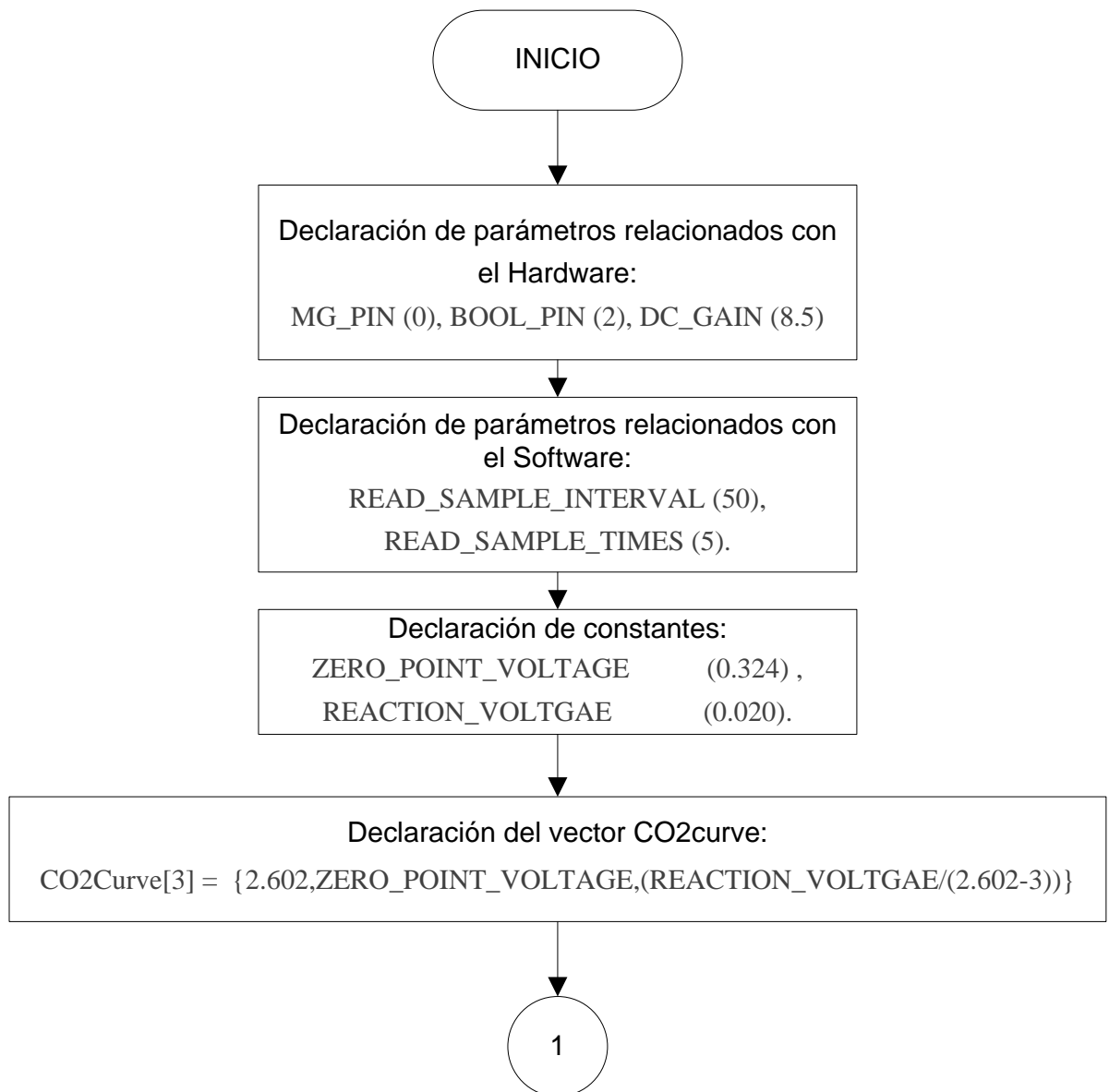
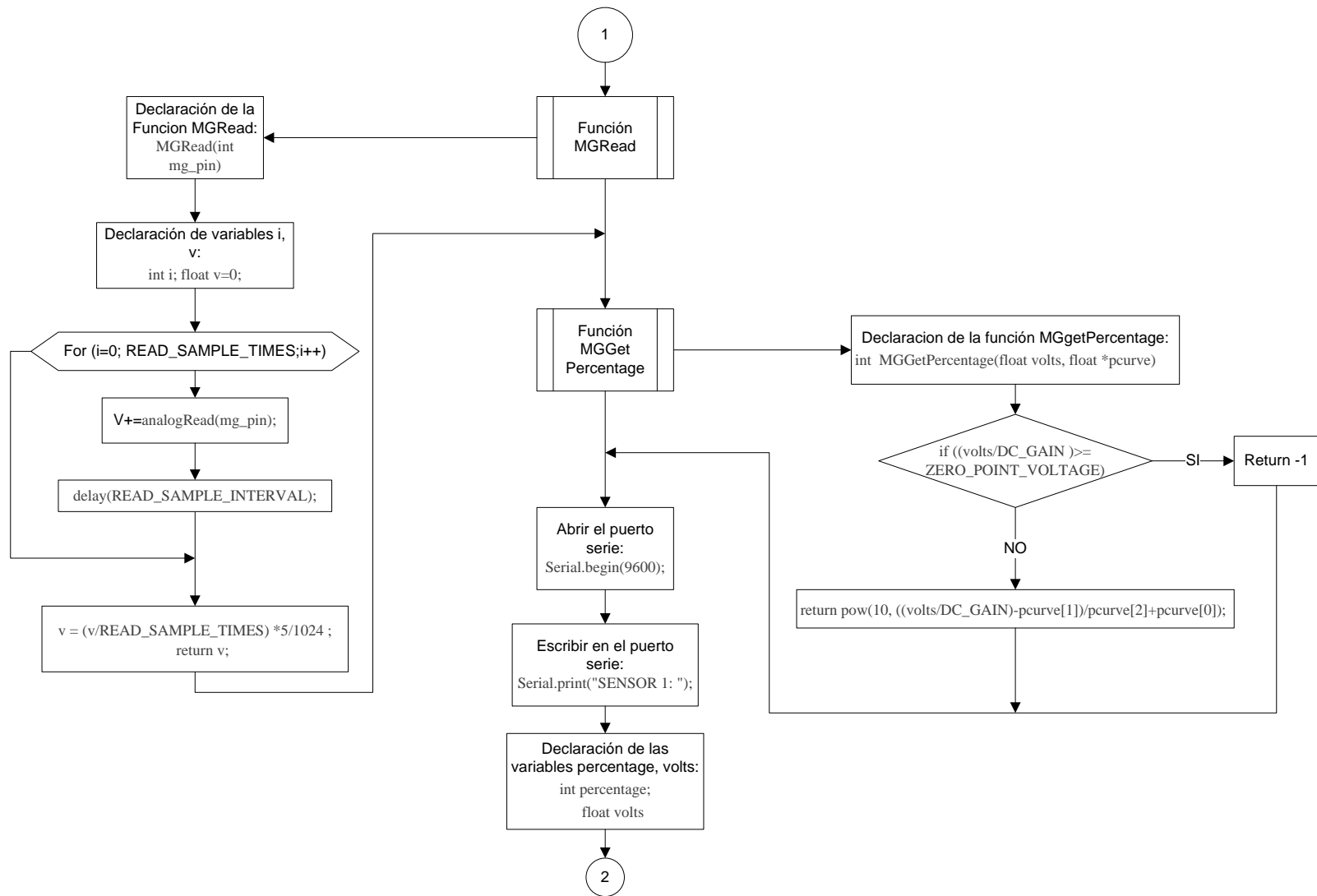


Fig. 4.3. Montaje físico del módulo sensor y el Arduino UNO
Elaborado por: El Autor.

En forma general, la programación contenida en el microcontrolador ATmega 328 del Arduino UNO para poder procesar la información obtenida por el sensor de CO2 MG-811, se describe en el siguiente diagrama de flujo.





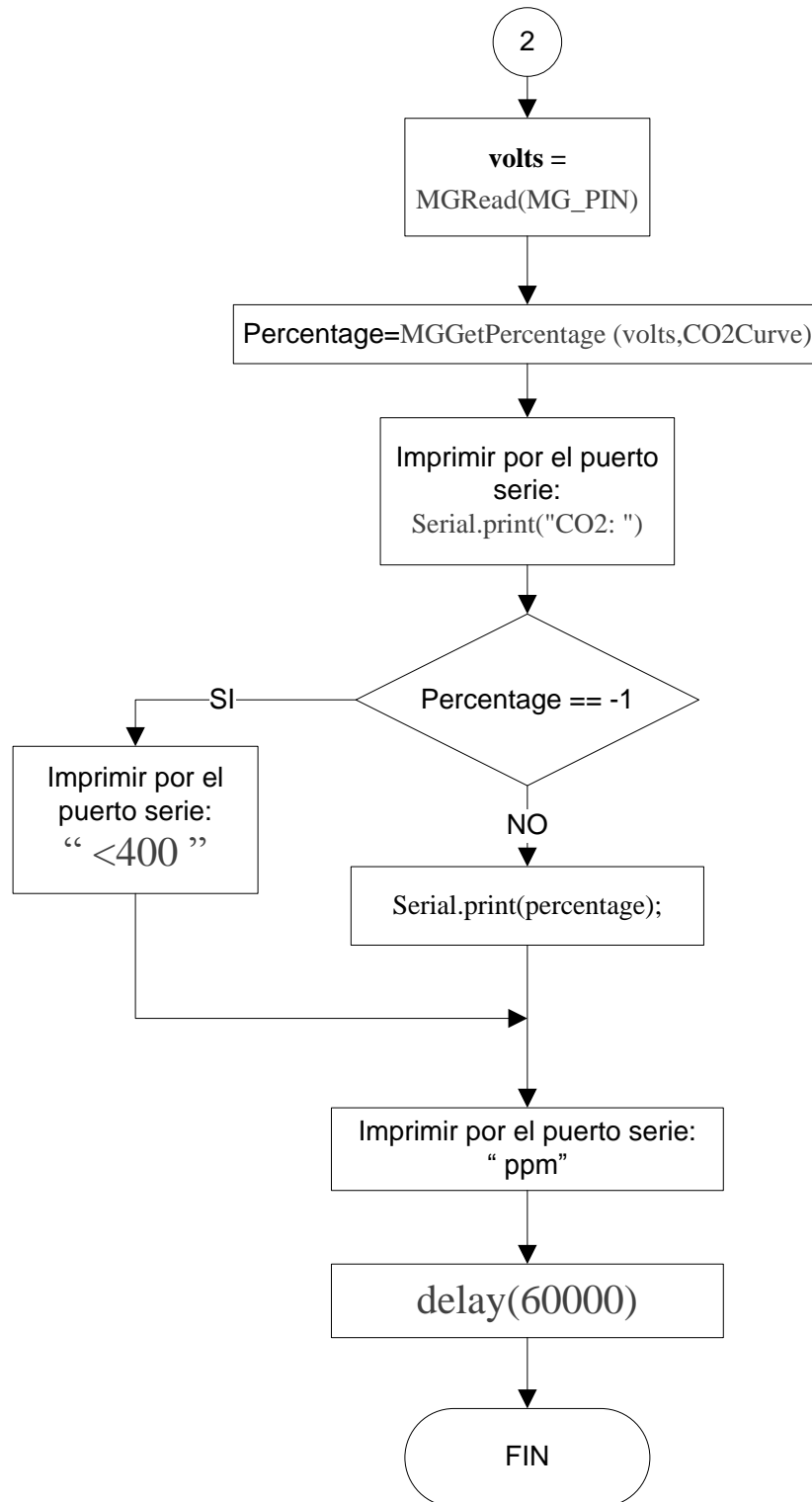


Fig. 4.4. Diagrama de Flujo de la programación en cada microcontrolador
Elaborado por: El Autor.

El acoplamiento entre el módulo sensor de CO2 y el Arduino UNO, es lo que principalmente constituye cada nodo sensorial; la idea es establecer una interfaz que conecte el sensor de CO2 con el microcontrolador donde se procesan los datos, para después enviarlos a un dispositivo capaz de transmitir dichos datos procesados hacia el gateway.

La programación en el microcontrolador del Arduino UNO para cada nodo sensorial, está estructurado de las siguientes partes:

1. Declaración de parámetros relacionados con el Hardware.
2. Declaración de parámetros relacionados con el Software.
3. Declaración de constantes.
4. Declaración del vector **CO2Curve**.
5. Creación de la función **MGRead** para el cálculo del voltaje del sensor de CO2.
6. Creación de la función **MGGetPercentage** para obtener el porcentaje de CO2.
7. Inicialización del puerto Serie.
8. Escritura en el puerto serie “MÓDULO SENSOR 1” o “MÓDULO SENSOR 2” según sea el caso
9. Creación de la función principal **loop()**, donde internamente se ejecutan varios procesos, como por ejemplo: declaración de las variables **percentage** y **volts**, obtención e impresión del valor que devuelve la función **MGRead**, obtención e impresión del valor que devuelve la función **MGGetPercentage**.

La parte fundamental del código resulta en la creación de la función **MGGetPercentage**. Para observar el código completo en cada Arduino UNO de los diferentes módulos sensoriales, favor dirigirse al anexo 4 de este documento.

```
intMGGetPercentage(float volts, float *pcurve)
{
if ((volts/DC_GAIN )>=ZERO_POINT_VOLTAGE) {
return -1;
} else {
returnpow(10, ((volts/DC_GAIN)-pcurve[1])/pcurve[2]+pcurve[0]);
}}
```


Donde el valor de entrada en esta función es la salida del sensor en voltios y los valores de **pcurve** son los puntos de la curva otorgados por el datasheet del sensor. A la salida se obtiene la medición de ppm del CO₂.

El sensor de MG-811 es básicamente un dispositivo que da una salida en el rango de 100-600mV (CO₂ 400-10000ppm). La capacidad de generación de corriente del sensor es bastante limitada. La amplitud de la señal es tan baja y la impedancia de salida de la célula es tan alta que se requiere un circuito de acondicionamiento de señal entre el sensor y la entrada ADC del microcontrolador. La tensión de salida del sensor en aire limpio (típicamente 400 ppm CO₂) está en el rango de 200 mV-600mV, esta tensión de salida se define como el punto cero de la tensión (V_o), que es la tensión de línea de base. La tensión de salida disminuirá a medida que la concentración de CO₂ aumenta. Cuando la concentración de CO₂ es mayor que 400 ppm, la tensión de salida (V_s) es lineal con el logaritmo común de la concentración de CO₂ (CCO₂):

$$V_s = V_o + \Delta V_s / (\log_{10} 400 - \log_{10} 1000) * (\log_{10} CCO_2 - \log_{10} 400)$$

Donde ΔV_s = Salida del sensor@400ppm – Salida del sensor @1000ppm

La Tensión de Reacción (ΔV_s) es la caída de tensión de la concentración de CO₂ de 400 ppm a 1.000 ppm, que pueden diferir de un sensor a otro. El valor típico para ΔV_s es 30mV-90 mV. La ganancia DC del circuito de acondicionamiento de señal es de 8,5. Así que el rango de V_{OUT} es 0.85-5.0V, que es un rango razonable para un microcontrolador de 5V o ADC independiente.

2. ACOPLAMIENTO ENTRE EL ARDUINO UNO Y MÓDULO INALÁMBRICO

Para este paso se utilizó una XBEE SHIELD necesaria para montar cada módulo XBee PRO S2B directamente a la plataforma Arduino como se puede apreciar en la siguiente figura.

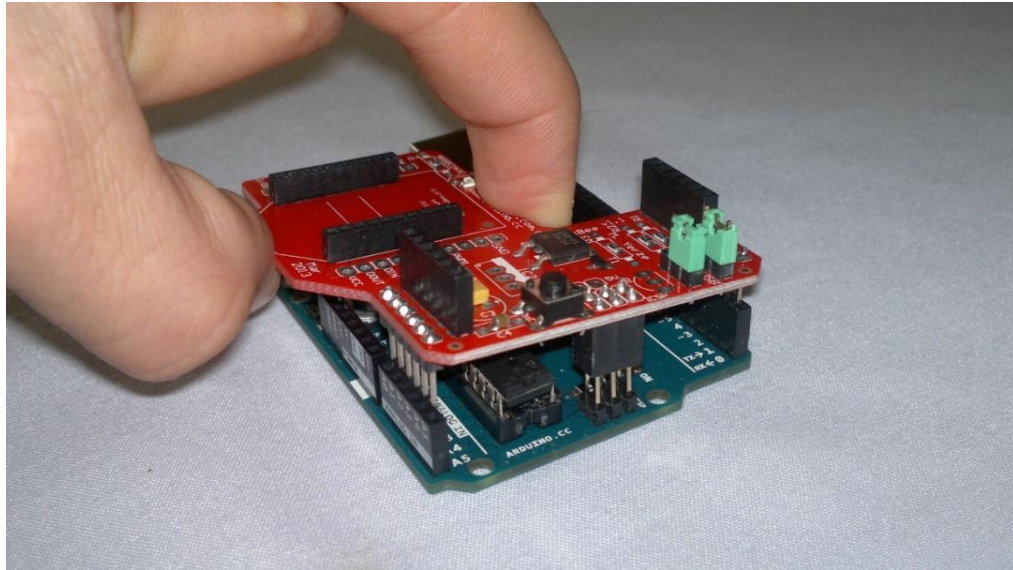


Fig. 4.5. Acoplamiento de la plataforma Arduino UNO y la XbeeShield
Elaborado por: El Autor.

3. ACOPLAMIENTO DEL MÓDULO XBEE PRO S2B Y LA XBEE SHIELD

Luego que la plataforma Arduino UNO procesa los datos provenientes del sensor de CO2 en cada nodo sensorial, se necesita enviar los datos adquiridos por medio de los módulos XBee PRO S2B.

Los módulos XBee PRO S2B deben ser configurados con el software X-CTU desarrollado por la firma DIGI. Para dicha configuración se procede a ejecutar los siguientes pasos:

a) INSTALAR XBEE EXPLORER USB

Instalando el XBee Explorer USB, se puede configurar y operar el módulo Xbee desde el computador, para lo cual se inserta cada módulo XBee en el módulo XBee Explorer USB para proceder a conectarse a la PC mediante el puerto USB como se puede apreciar en la figura 4.6. Actualmente la mayoría de las versiones de Windows instalan automáticamente los drivers para el módulo XBee Explorer USB. Para instalar los drivers de los módulos XBee PRO S2B necesitan ser descargados de la página de DIGI en internet[31].



Fig. 4.6. Acoplamiento de la plataforma Arduino UNO y la XbeeShield
Elaborado por: El Autor.

b) CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE PRO S2B

Con la culminación del paso anterior, se procede a abrir el programa X-CTU y como se observa en la figura 4.7, procedemos a dar seleccionar la pestaña “**ADD DEVICE**” (1) para poder agregar cada módulo XBEE PRO S2B a emplearse en la red sensorial. Luego de esto aparece una pequeña ventana la cual nos indica la asignación de un puerto **COM11** (2) al módulo XBee PRO S2B y procedemos a configurar los siguientes parámetros de comunicación (3):

- BaudRate = 9600.
- Data Bits = 8.
- Parity = None.
- Stop Bits = 1.
- Flow Control = None.

Configurados los parámetros anteriores, procedemos a seleccionar el botón **Finish**(4).

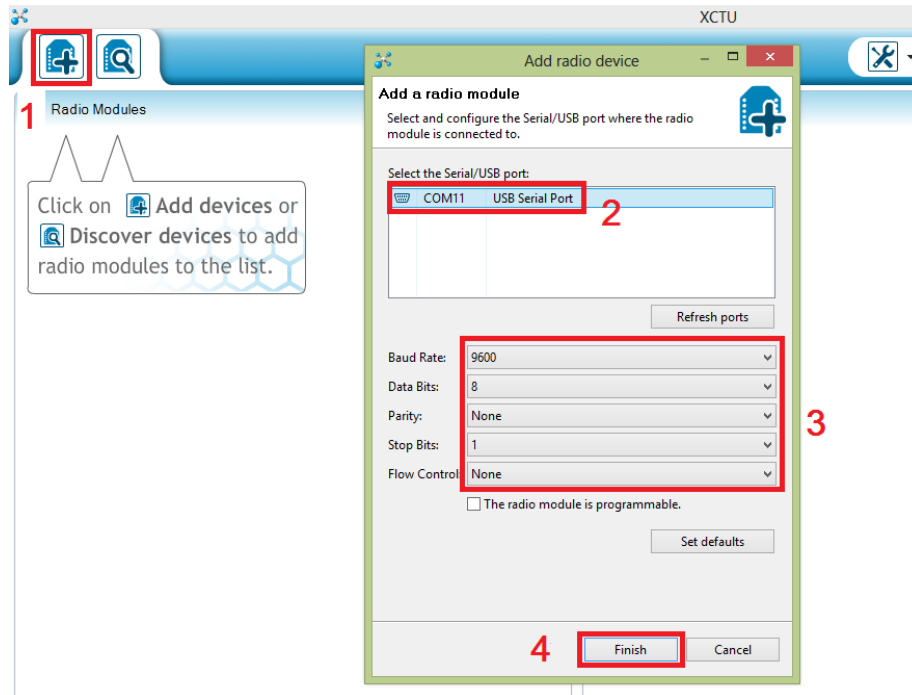


Fig. 4.7. Agregar un nuevo módulo XBee PRO S2B
Elaborado por:El Autor.

Las configuraciones de los XBee PRO S2B difieren dependiendo del papel que desempeñen dentro de la red.

c) CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE PRO COMO ROUTERS AT

Los módulos XBee PRO S2B necesarios para cada nodo sensor fueron configurados con la función **ZigBeeRouter AT** y la versión del firmware más actual (**22A7**) como se observa en la figura 4.8.

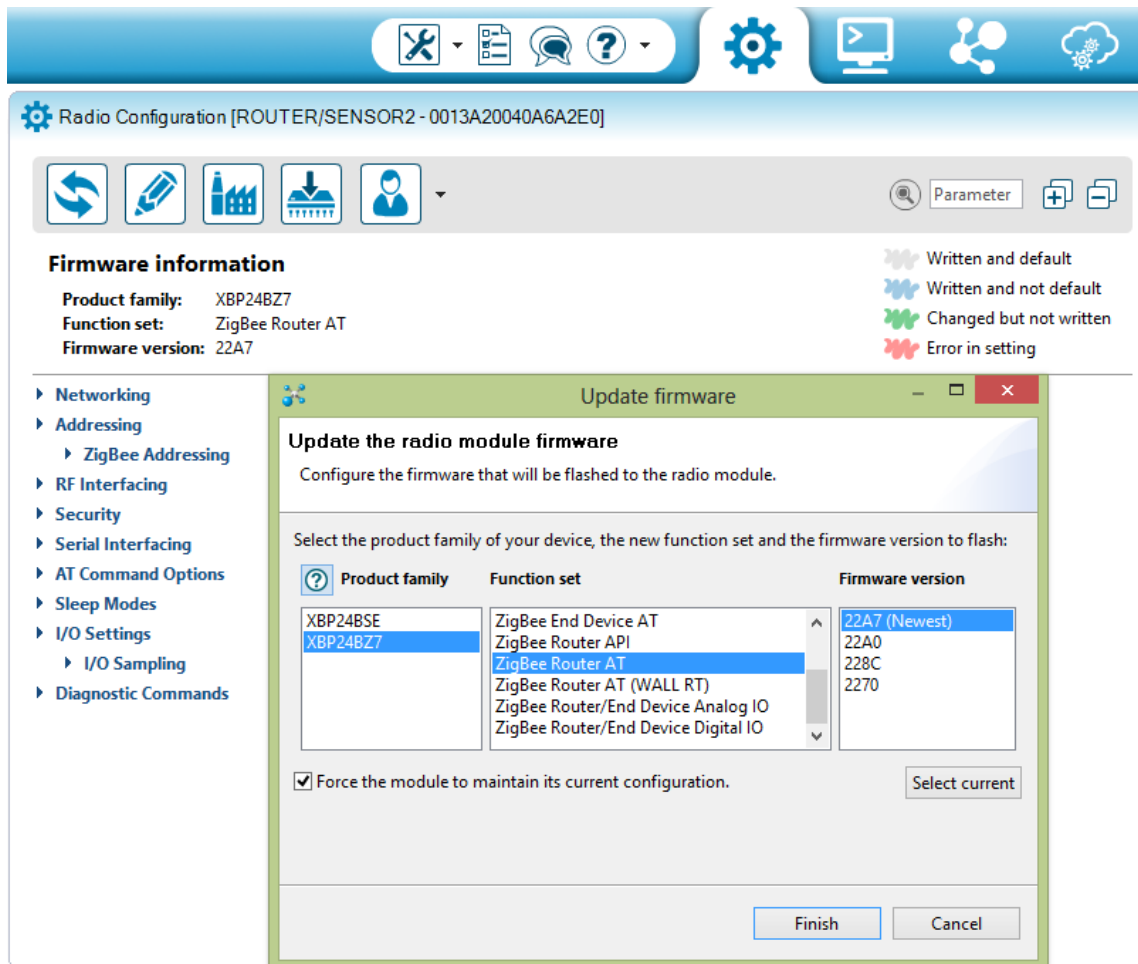


Fig. 4.8. Configuración del módulo XBee PRO S2B como Router AT
 Elaborado por: El Autor.

En las tablas 4.9 y 4.10 se pueden apreciar las configuraciones realizadas a cada módulo de cada nodo sensorial.

Tabla 4.9 Parámetros de configuración para el primer Router AT

MODO AT		
INDICADOR	NOMBRE	PARÁMETRO
ID	PAN ID	55
NI	Nodo Identificador	ROUTER/SENSOR1
MY	Dirección de red (Automática)	10
SD	Duración del escaneo	3
CH	Canal de operación (Automático)	11
SC	Examina solo el canal elegido	7FFF
DH	Dirección de destino en alto	0
DL	Dirección de destino en bajo	0
SH	Número de serie en Alto (por defecto)	13A200
SL	Número de serie en Bajo (por defecto)	40A73BE2
JV	Verificación de canal	1

Elaborado por:El Autor.

Tabla 4.10 Parámetros de configuración para el segundo Router AT

MODO AT		
INDICADOR	NOMBRE	PARÁMETRO
ID	PAN ID	55
NI	Nodo Identificador	ROUTER/SENSOR2
MY	Dirección de red (Automática)	10
SD	Duración del escaneo	3
CH	Canal de operación (Automático)	11
SC	Examina solo el canal elegido	7FFF
DH	Dirección de destino en alto	0
DL	Dirección de destino en bajo	0
SH	Número de serie en Alto (por defecto)	13A200
SL	Número de serie en Bajo (por defecto)	40A6A2E0
JV	Verificación de canal	1

Elaborado por:El Autor.

Después damos un click en el icono **Write radio settings** como se muestra en la figura 4.9 para que se graben los parámetros que hemos puesto, luego de esto podemos sacar cuidadosamente nuestro módulo Xbee del XBee Explorer USB.

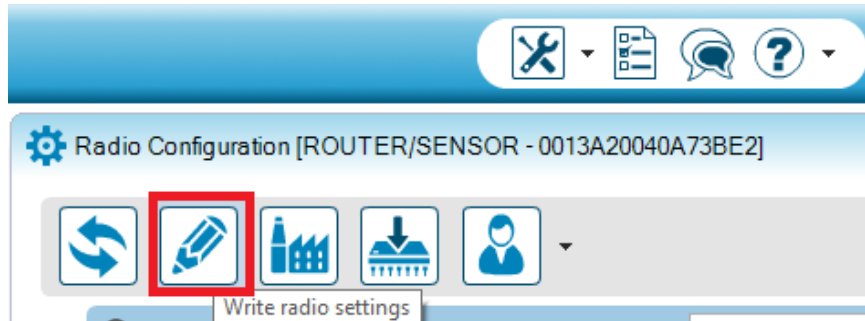


Fig. 4.9. Escritura de parámetros en los módulos XBee
Elaborado por: El Autor.

Se procedió a la conexión física de cada módulo XBee como se muestra en la figura 4.10, en donde el módulo XBee Pro S2B está montado sobre la XbeeShield que previamente ya se había montado a la plataforma Arduino UNO.

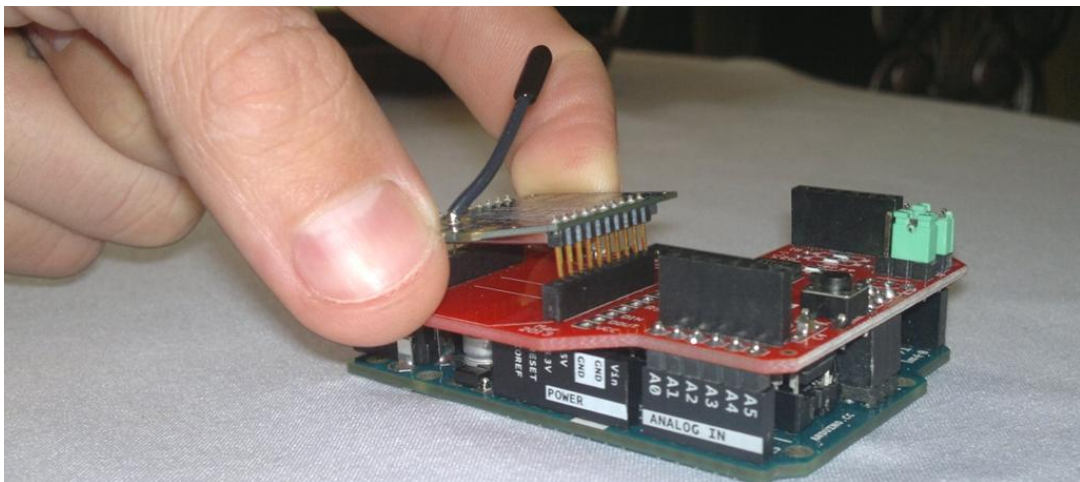


Fig. 4.10. Acoplamiento del módulo XBee PRO S2B y la XbeeShield
Elaborado por: El Autor.

4.8.2 ESTRUCTURA DEL GATEWAY

a. RECEPCIÓN DE LAS MEDICIONES POR MEDIO DEL PROTOCOLO ZIGBEE USANDO UN MÓDULO XBEE PRO S2B.

Para la recepción de las mediciones realizadas en la red por cada nodo sensorial y enviadas por medio del protocolo ZigBee, se utiliza un tercer módulo Xbee Pro S2B conectado a la PC por medio del Xbee USB Explorer y el cable USB (tipo A - Mini B) como se ve en la siguiente figura.



Fig. 4.11. Conexión del gateway hacia la PC
Elaborado por: El Autor.

Las configuraciones para que pueda recibir son similares a las que se realizaron con los módulos para cada nodo sensorial. El módulo Xbee PRO S2B fue configurado con la función **ZigBeeCoordinator AT** y la versión del firmware más actual (**21A7**) como se observa en la siguiente figura.

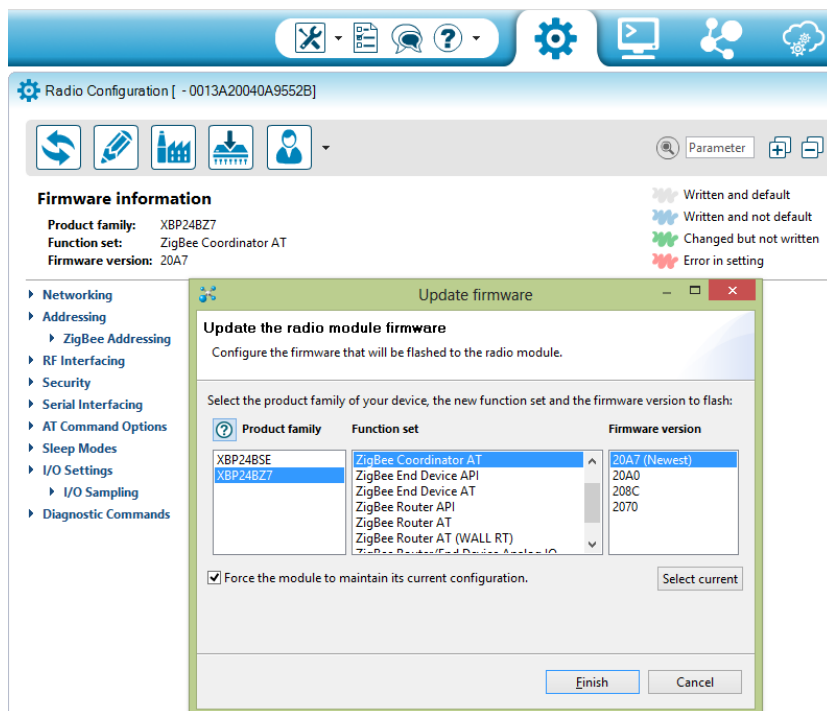


Fig. 4.12. Configuración del Módulo Xbee PRO S2B como Coordinador AT
Elaborado por: El Autor.

En la tabla 4.11 se puede apreciar la configuración realizada a este módulo con los diferentes valores.

Tabla 4.11 Parámetros de configuración para el Coordinador AT

MODO AT		
INDICADOR	NOMBRE	VALOR
ID	PAN ID	55
NI	Nodo Identificador	COORDINADOR
MY	Dirección de red	17
SD	Duración del escaneo	3
CH	Canal de operación	11
SC	Examina solo el canal elegido	40
DH	Dirección de destino en alto	0
DL	Dirección de destino en bajo	FFFF
SH	Número de serie en Alto	13A200
SL	Número de serie en Bajo	40A9552B

Elaborado por: El Autor.

Luego procedemos a escribir los parámetros dando click en el icono **Write radio settings**(como se lo hizo para cada módulo de los nodos sensoriales) para terminar la configuración del gateway.

4.8.3 ESTACION BASE - HMI

a. INTERFAZ HOMBRE – MÁQUINA (HMI)

Para poder visualizar los datos recibidos en el gateway, se procedió a crear una interfaz que fue desarrollada en el programa **Visual Basic 2008**, la cual está encargada de cumplir las siguientes funciones:

- Establecer la comunicación serial con el modulo XBee PRO S2B ubicado en el gateway para obtener los datos provenientes de los diferentes nodos sensoriales.
- Cerrar el puerto serial cada vez que el usuario lo desee para dejar de recibir datos.
- Visualizar en pantalla cada dato obtenido de los nodos sensoriales.
- Limpiar los datos de la pantalla cada vez que el usuario lo necesite.

La estructura funcional general del programa se puede observar en la siguiente figura y su programación se puede ver en el anexo 5 de este documento.

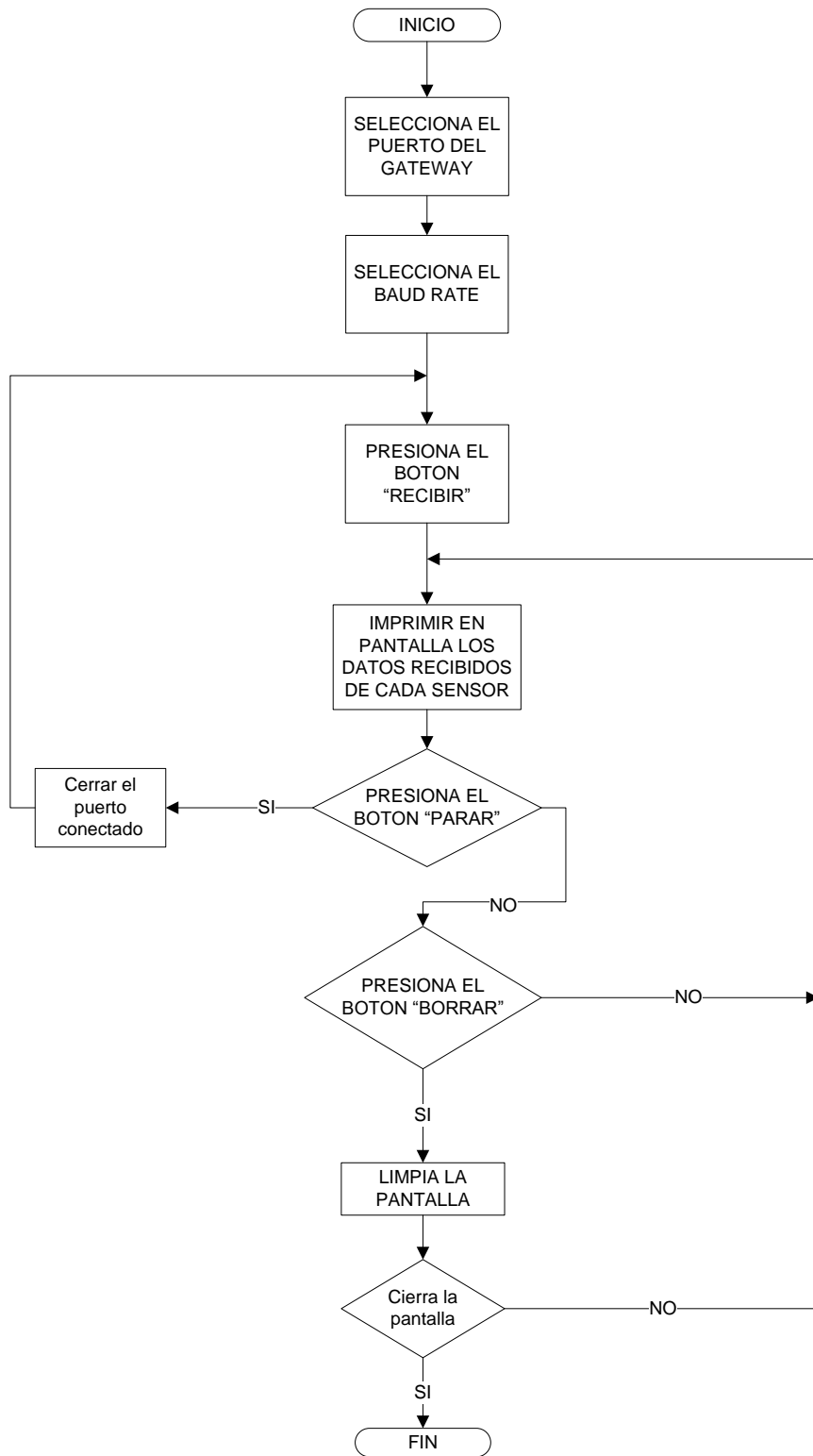


Fig. 4.13. Estructura funcional del HMI
Elaborado por: El Autor.

4.9 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

La implementación del prototipo de red sensorial inalámbrica está conformada por dos nodos sensoriales, un gateway y la estación base. Estos elementos implementados se detallan a continuación.

4.9.1 NODOS SENSORIALES

Para la implementación del prototipo de red sensorial inalámbrica en cada nodo sensorial se utiliza un sensor MG-811 con su placa acondicionadora, un Arduino UNO, una placa XbeeShield, un módulo sensor Xbee PRO S2B (ZB) y una batería de 9 volts. La interconexión de cada elemento se puede ver en la siguiente figura.



Fig. 4.14. Nodos para el prototipo de red sensorial inalámbrica
Elaborado por: El Autor.

4.9.2 GATEWAY

Para la implementación del gateway en el prototipo de red sensorial inalámbrica se utiliza un módulo sensor Xbee PRO S2B (ZB), Xbee USB Explorer y un cable USB (tipo A - Mini B) como se visualiza en la siguiente figura.

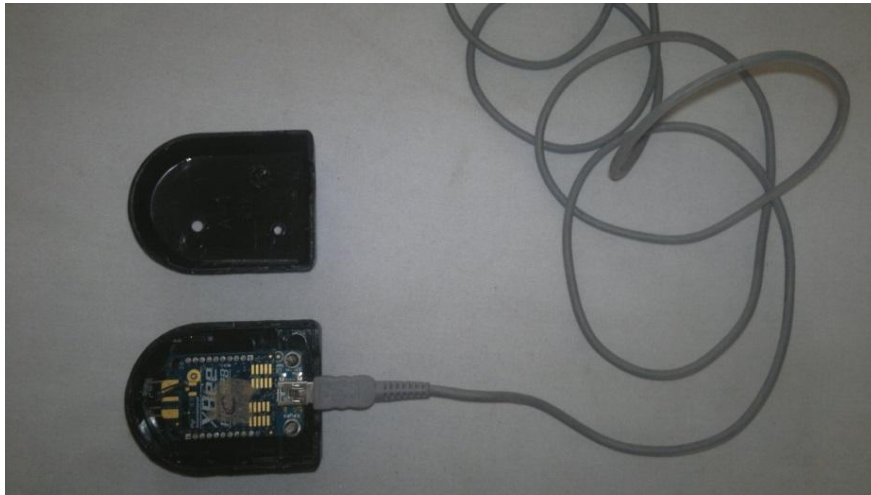


Fig. 4.15. Gateway para la red sensorial inalámbrica de CO₂.
Elaborado por: El Autor.

4.9.3 ESTACIÓN BASE

La estación base está integrada por un computador personal (PC) donde se encuentra instalado el archivo ejecutable con extensión **.exe**, el mismo que servirá como una interfaz Hombre – Máquina para visualizar los datos que llegan al gateway provenientes de cada sensor.

Para que el usuario pueda comenzar a visualizar los datos debe primeramente conectar el gateway a la PC, después debe ejecutar las siguientes acciones descritas con la interfaz abierta:

- Seleccionar el puerto disponible de comunicación.
- Elegir el mismo BautRate (tasa de datos) configurado previamente en el módulo XBee PRO S2B instalado en el gateway (9600 por lo general).

- Seleccionar el botón “RECIBIR” para que la información se pueda visualizar en pantalla. Luego de esto se puede visualizar que el botón cambia al título de “PARAR” como se puede ver en la figura 4.16.
- Al elegir el botón “PARAR” el programa cierra el puerto y no se visualizan más datos que los que ya habían llegado hasta que se vuelva a dar click sobre el botón “RECIBIR”.
- Si se selecciona “SENSOR 1” o “SENSOR 2” solo se visualizaran datos de dichos sensores.
- Seleccionar el botón “BORRAR” para limpiar la pantalla en cualquier momento.

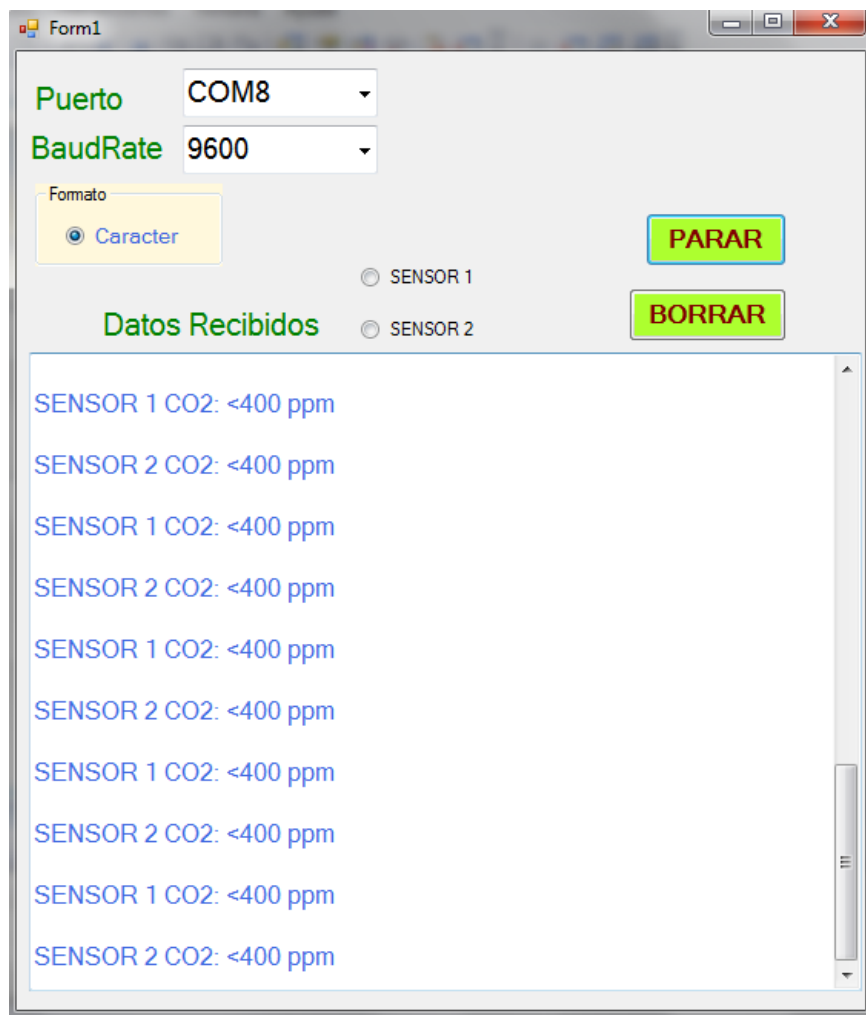


Fig. 4.16. Aspecto del funcionamiento en el HMI.
Elaborado por: El Autor.

4.10 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

4.10.1 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO INDOOR

Para realizar la prueba indoor de funcionamiento sobre la red sensorial inalámbrica se probó la conexión entre el gateway y los diferentes módulos XBeePRO presentes en la red mediante la herramienta **RADIO RANGE TEST** presente en el programa XCTU, esta prueba se la realizo dentro de una domicilio en un área aproximada de 28 m². Cabe recalcar que los módulos XBee PRO de cada módulo sensorial solamente están conectados a la alimentación proveniente de las XBeeShield sin ningún tipo de conexión de los DIN y DOUT hacia el microcontrolador ATmega328P.

En la figura 4.17 se puede observar el valor RSSI(Indicador de fuerza de la señal recibida), el valor y porcentaje de los paquetes que llegan con éxito hacia el gateway desde un módulo XBee PRO.

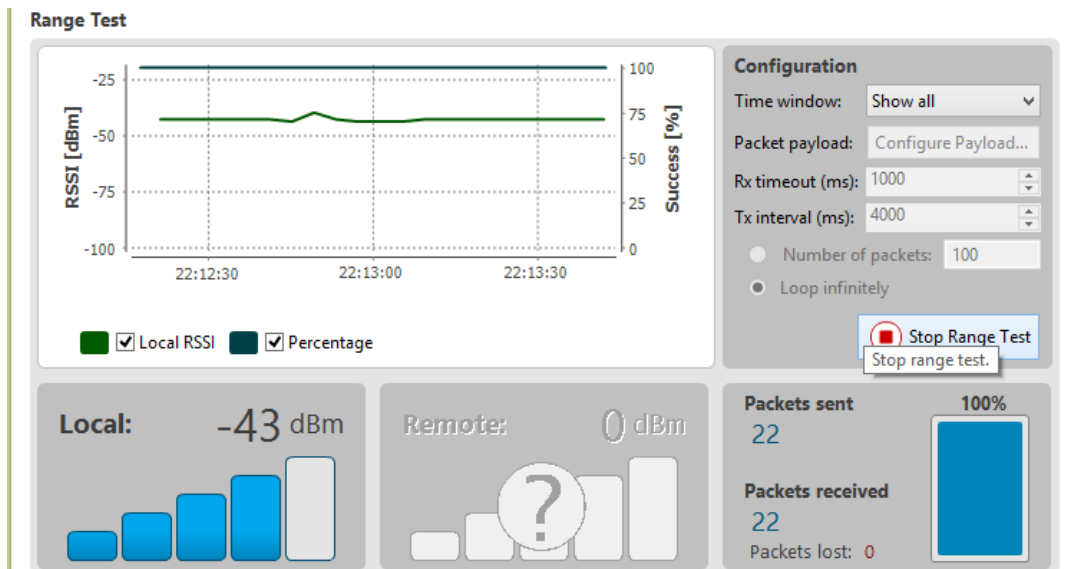


Fig. 4.17. Prueba de conexión entre el gateway y un módulo XBee PRO

Elaborado por: El Autor.

Como se ve en la figura anterior, los paquetes llegan en un 100 % a su destino (22 enviados y 22 recibidos), además se tiene un muy buen nivel de señal entre los dispositivos (-43 dBm).

4.10.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO OUTDOOR

PRUEBA 1

La primera prueba outdoor que se realizó a una distancia considerable, se la ejecutó en las calles de la Ciudadela Presidencial en la ciudad de Ambato, la cual consistía en comprobar la conexión entre un nodo sensorial, el gateway y la estación base a una distancia aproximada de 250 m como se visualiza en la siguiente figura.

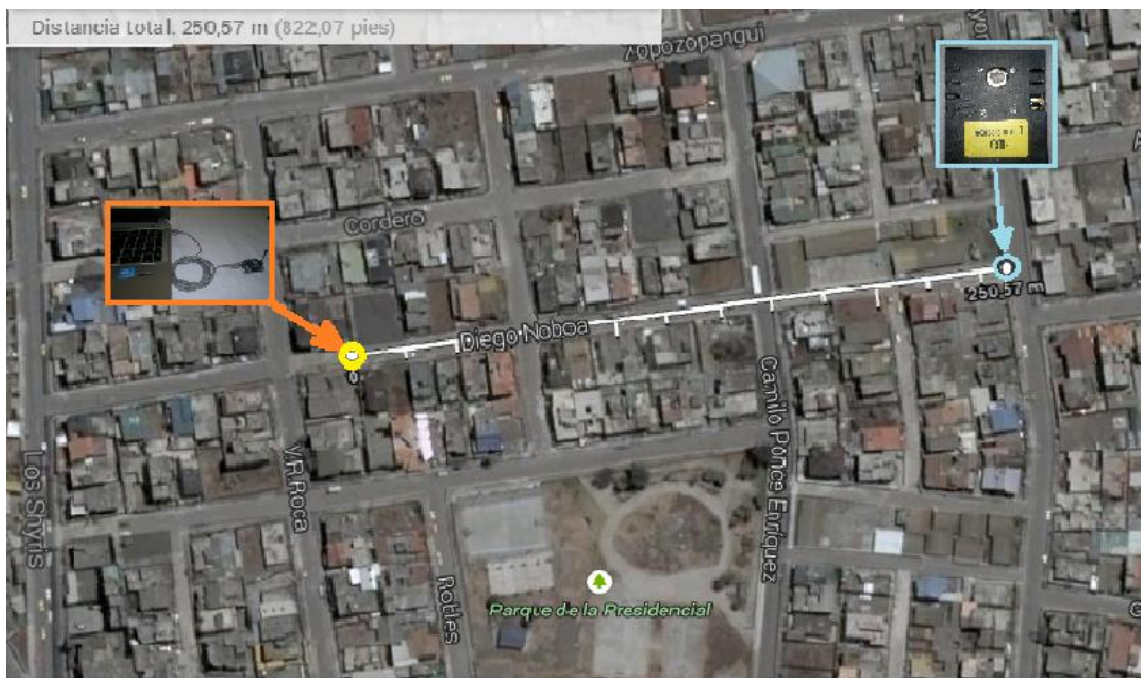


Fig. 4.18. Prueba entre la estación base y un nodo sensorial a 250m
Elaborado por: El Autor.

Esta prueba resultó satisfactoria, recibiendo en la estación base valores menores a 400 ppm considerados como normales dentro del área urbana.

PRUEBA 2

Para esta segunda prueba se utilizó el segundo nodo sensorial, el gateway y la estación base en donde esta última junto con el gateway fueron fijados en la sala de profesores de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato y el nodo sensorial se ubicó a 20 cm de un tubo de escape de un vehículo ubicado en los parqueaderos de dicha facultad a 30 m aprox. de la estación base (acelerada por momentos) y ubicada a 30 m aprox como se puede ver en la siguiente figura.



Fig. 4.19. Prueba entre la estación base y un nodo sensorial a 30m
Elaborado por: El Autor.

El resultado de esta prueba fue exitosa, la estación base recibió valores medidos por el nodo sensorial mayor a 6000 ppm que se considera de muy alto nivel debido a una gran concentración de CO₂ proveniente del tubo de escape en el vehículo.

PRUEBA 3

En esta tercera prueba realizada en un día laboral, se midió la concentración de CO₂ en el parqueadero principal del Mall de los Andes de la ciudad de Ambato con una

capacidad y afluencia diaria de 450 y 3000 vehículos respectivamente, estas mediciones se hicieron con ambos nodos sensoriales.

Las mediciones se hicieron en intervalos de 10 minutos empezando desde las 10 am hasta las 9 pm del día sábado 13 de diciembre del 2014 donde se obtuvieron los valores de los dos nodos sensoriales como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 4.12 Mediciones de CO2 en el garaje del Mall de los Andes en Ambato.
Elaborado por: El Autor.

MEDICIONES DE CO2 EN EL GARAGE DEL MALL DE LOS ANDES - AMBATO		
DIA:	13 DE DICIEMBRE DEL 2014	
Hora	Sensor 1 (ppm)	Sensor 2 (ppm)
10:00	<400	<400
10:10	<400	<400
10:20	<400	<400
10:30	<400	<400
10:40	<400	<400
10:50	<400	<400
11:00	<400	<400
11:10	<400	<400
11:20	<400	<400
11:30	405	<400
11:40	407	<400
11:50	<400	<400
12:00	<400	<400
12:10	<400	<400
12:20	<400	<400
12:30	<400	<400
12:40	<400	<400
12:50	<400	<400
13:00	<400	<400
13:10	<400	<400
13:20	<400	<400
13:30	<400	<400
13:40	<400	<400
13:50	<400	<400
14:00	<400	<400
14:10	<400	<400
14:20	<400	<400

14:30	<400	<400
14:40	<400	<400
14:50	<400	<400
15:00	<400	<400
15:10	<400	<400
15:20	<400	<400
15:30	<400	<400
15:40	<400	<400
15:50	<400	<400
16:00	<400	<400
16:10	<400	<400
16:20	<400	<400
16:30	<400	<400
16:40	<400	<400
16:50	<400	<400
17:00	<400	<400
17:10	<400	<400
17:20	<400	<400
17:30	<400	<400
17:40	<400	<400
17:50	<400	<400
18:00	<400	<400
18:10	401	<400
18:20	402	<400
18:30	401	<400
18:40	<400	<400
18:50	<400	<400
19:00	<400	<400
19:10	<400	<400
19:20	<400	<400
19:30	<400	<400
19:40	408	<400
19:50	405	<400
20:00	<400	<400
20:10	<400	<400
20:20	<400	<400
20:30	<400	<400
20:40	<400	<400
20:50	<400	<400
21:00	<400	<400

El nodo 1 se ubico en la parte alta central del parqueadero, el nodo 2 se fue ubicando en diferentes lugares en el transcurso del día y la estación base con el gateway se ubicaron al fondo de la entrada principal como se observa en la siguiente figura.



Fig. 4.20. Ubicación de la estación base y gateway en el estacionamiento del Mall de los Andes.

Elaborado por: El Autor.

Los resultados de las concentraciones de CO₂ a lo largo del día fueron en promedio menores a 400 ppm, considerados como niveles normales. Esto se debe a que la concentración del CO₂ se disipa rápidamente gracias al buen diseño de construcción el mismo que posee lugares abiertos y muy bien ventilados.

4.11 ANÁLISIS ECONÓMICO

4.11.1 PRESUPUESTO DEL PROTOTIPO

El presupuesto para la implementación del prototipo de red sensorial completo está compuesto por tres partes: el presupuesto del prototipo de red para los nodos sensoriales, para el gateway y los costos de mano de obra para el diseño y construcción como se observa en las tablas siguientes respectivamente.

Tabla 4.13 Presupuesto del prototipo de red para los nodos sensoriales.

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario (\$)	Valor del Rubro (\$)
1	Sensores MG-811	2	\$ 56,05	\$ 112,10
2	Arduino UNO R3	2	\$ 35,00	\$ 70,00
3	XbeeShieldRobotale	2	\$ 20,00	\$ 40,00
4	MódulosXbee Pro (S2B) zb	2	\$ 60,00	\$ 120,00
5	Cajas plásticas	2	\$ 4,50	\$ 9,00
6	Batería de 9 Volts	2	\$ 2,80	\$ 5,60
7	Elementos electrónicos	1	\$ 3,50	\$ 3,50
8	Costos de implementación	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Subtotal, USD \$				\$ 375,20
Imprevistos (5%), USD \$				\$ 18,76
TOTAL, USD \$				\$ 393,96

Elaborado por: El Autor.

Tabla 4.14 Presupuesto del prototipo de red sensorial para el gateway.

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario (\$)	Valor del Rubro (\$)
1	MóduloXbee Pro (S2B) zb	1	\$ 60,00	\$ 60,00
2	Cajas para Módulo Xbee Pro (S2B) zb	1	\$ 2,50	\$ 2,50
3	Elementos electrónicos	1	\$ 3,50	\$ 3,50
4	Costos de implementación	1	\$ 5,00	\$ 5,00
Subtotal, USD \$				\$ 71,00
Imprevistos (5%), USD \$				\$ 3,55
TOTAL, USD \$				\$ 74,55

Elaborado por: El Autor.

Tabla 4.15 Costos de mano de obra del prototipo de red sensorial.

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario (\$)	Valor del Rubro (\$)
1	Construcción y mano de Obra	1	\$ 300,00	\$ 300,00
2	Diseño y asesoramiento	1	\$ 300,00	\$ 300,00
TOTAL, USD \$				\$ 600,00

Elaborado por: El Autor.

Por consiguiente el presupuesto total de implementación para el prototipo de una red sensorial inalámbrica para la medición del nivel de CO₂ en la ciudad de Ambato es de: **\$1068,51**.

Una vez implementado el prototipo de red sensorial inalámbrica para la medición del nivel de CO₂ en la ciudad de Ambato, se han analizado los siguientes beneficios.

- Mediciones de los niveles de CO₂ en tiempo real.
- Obtención de los niveles de CO₂ en forma precisa.
- Conocimiento del estado actual de los niveles de CO₂ presentes en la ciudad de Ambato.
- Generación de tablas de datos para su posterior análisis, diagnósticos y acciones a tomar.
- Facilidad de medir los niveles en cualquier lugar de la ciudad de Ambato.
- Gran cobertura del prototipo de red sensorial inalámbrica.

4.12 ESQUEMA DE RED PARA MEDICIÓN DE CO₂ EN LA CIUDAD DE AMBATO

4.12.1 PUNTOS CRÍTICOS

Analizando la ciudad de Ambato mediante una investigación de campo y obteniendo información previa del Ingeniero Trajano Sánchez, responsable del departamento técnico de la Unidad Municipal de Transporte de la ciudad de Ambato (UMT), se determinaron los siguientes 14 puntos críticos donde se genera mayor cantidad de CO₂ dentro del casco urbano de la ciudad de Ambato.

En cada punto crítico se genera una gran cantidad de CO₂ proveniente del esmog (producido por la combustión) de los vehículos que transitan por estos lugares de la ciudad en horas pico. En estos puntos críticos se obtuvieron las coordenadas descritas en la siguiente tabla.

Tabla 4.16 Puntos críticos de concentración de CO₂ en la ciudad de Ambato.

No	Sector	Latitud	Longitud
1	Antiguo redondel de Izamba	1:13:35.17S	78:35:51.48W
2	Terminal terrestre	1:14:13.07S	78:36:59.45W
3	Mercado Mayorista	1:16:12.96S	78:36:42.29W
4	Redondel de Huachi Chico	1:16:31.54S	78:37:47.48W
5	Mall de los andes	1:15:53.73S	78:37:38.81W
6	Parque Cevallos	1:14:29.52S	78:37:37.26W
7	Parque 12 de Noviembre	1:14:35.29S	78:37:33.20W
8	Consejo Provincial	1:14:31.48S	78:37:47.21W
9	Puente de Ficoa	1:14:22.20S	78:37:50.85W
10	Atocha	1:13:49.81S	78:37:40.02W
11	Entrada Miraflores	1:14:39.40S	78:37:54.26W
12	Viaducto la Yahaira	1:14:51.70S	78:37:54.75W
13	Viaducto La Mascota – Estadio	1:14:37.51S	78:37:22.60W
14	Universidad Técnica de Ambato (Punto central)	1:16:3.73S	78:37:27.47W

Fuente: Unidad Municipal de Transporte de la ciudad de Ambato (UMT)

En la siguiente figura muestra la ubicación general de cada punto crítico donde se genera mayor cantidad de CO2 en la ciudad de Ambato.



Fig. 4.21. Puntos críticos de generación de CO2 en la ciudad de Ambato.
Fuente: GoogleEarth.

4.12.2 DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE REPETICIÓN

Para determinar la ubicación del punto de repetición se analiza el cerro o montaña más alto aledaño a la ciudad de Ambato, que tenga línea de vista con absolutamente todos los puntos críticos antes mencionados. Entre las diferentes alternativas que se presentaron, se determinó que el cerro Quindialó ubicado en la vía a Quisapincha en la localidad del mismo nombre, junto al parque de la familia, cumple con los requisitos para ubicar el punto de repetición como se puede ver en la siguiente figura.



Fig. 4.22. Vista de la ciudad de Ambato desde el cerro Quindialó
Fuente: GoogleEarth

En dicho lugar se encuentran las antenas del cuerpo de Bomberos y Empresa de Agua potable de la ciudad de Ambato, además se encuentran varios equipos de Radio Enlaces entre otros por lo que se sugiere la ubicación de la repetidora en el punto más alto disponible del sector ($1^{\circ}15'17.31''S$ y $78^{\circ}39'26.30''O$, altura = 3040m).

4.12.3 DISEÑO DE LOS ENLACES

Utilizando el programa **PTP Link Planner 3.5.3** de la empresa **CAMBIUM NETWORKS** (que emplea equipos Motorola), se realizaron los cálculos de propagación y línea de vista que existe entre cada punto crítico de medición de CO₂ y el punto de repetición. A continuación se muestra la figura de los enlaces realizados con el programa.

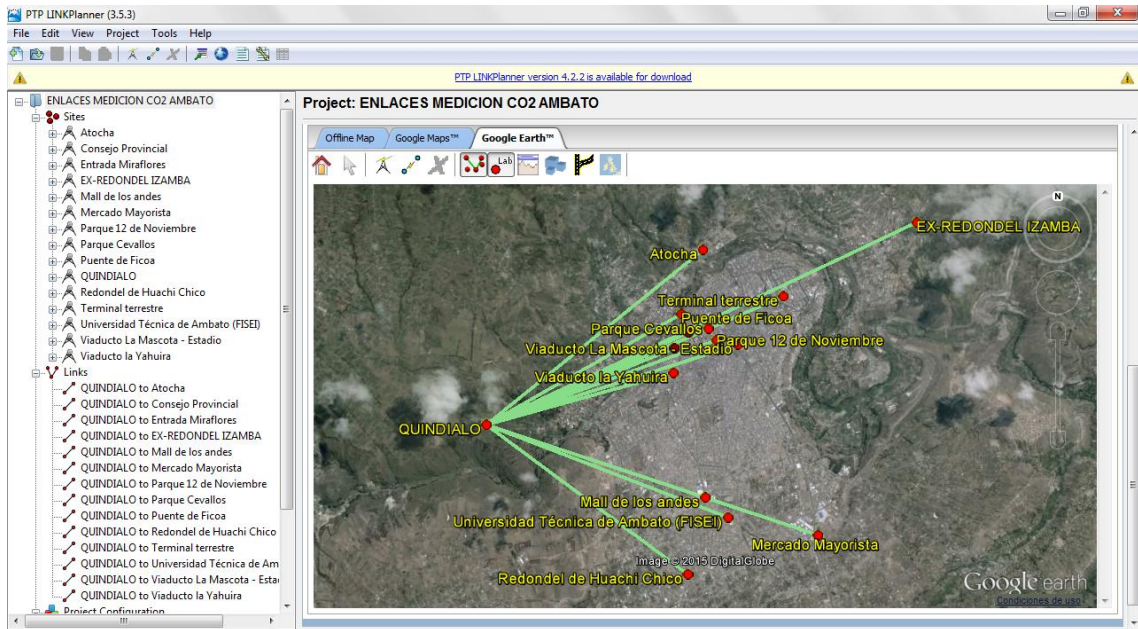


Fig. 4.23. Propagación de los enlaces con respecto al punto de repetición
Fuente: PTP Link Planner, vers. 3.5.3

4.12.4 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENLACES

En la siguiente tabla se obtiene un resumen de la simulación de la propagación de los enlaces proporcionada por el programa **PTP Link Planner 3.5.3** en donde se puede ver el nombre del enlace (**Name**), la distancia en kilómetros que existe entre cada punto crítico de concentración de CO₂ y el punto de repetición (**Range**), la velocidad promedio de entrega de datos en Mbps (**Aggregatethroughput**), la disponibilidad del enlace (**Link Availability**), altura de la antena en el cerro Quilalo en metros (**LeftHeight**), ganancia en el cerro Quilalo en dB (**LeftGain**), altura de la antena en cada punto crítico en metros (**RightHeight**), ganancia de cada punto crítico en dB (**RightGain**) y las pérdidas de cada enlace (**Link Loss**)

Tabla 4.17 Resumen de la simulación de la propagación en los enlaces

Name	Range (km)	Aggregate Throughput (Mbps)	Link Availability	Left Height (m)	Left Gain (dBi)	Right Height (m)	Right Gain (dBi)	Link Loss (dB)
QUINDIALO to Atocha	4.248	249.1	100.0000	10	23.0	10	23.0	120.3
QUINDIALO to Consejo Provincial	3.374	268.4	100.0000	10	23.0	10	23.0	118.3
QUINDIALO to Entrada Miraflores	3.077	280.6	100.0000	10	23.0	10	23.0	117.5
QUINDIALO to EX-REDONDEL IZAMBA	7.347	200.5	100.0000	10	23.0	10	23.0	125.1
QUINDIALO to Mall de los andes	3.507	263.1	100.0000	10	23.0	10	23.0	118.6
QUINDIALO to Mercado Mayorista	5.351	229.3	100.0000	10	23.0	10	23.0	122.3
QUINDIALO to Parque 12 de Noviembre	3.729	255.9	100.0000	10	23.0	10	23.0	119.1
QUINDIALO to Parque Cevallos	3.679	256.7	100.0000	10	23.0	10	23.0	119.0
QUINDIALO to Puente de Ficoa	3.405	267.2	100.0000	10	23.0	10	23.0	118.4
QUINDIALO to Redondel de Huachi Chico	3.812	254.6	100.0000	10	23.0	10	23.0	119.3
QUINDIALO to Terminal terrestre	4.953	239.1	100.0000	10	23.0	10	23.0	121.6
QUINDIALO to Universidad Técnica de Ambato (FISEI)	3.941	252.6	100.0000	10	23.0	10	23.0	119.6
QUINDIALO to Viaducto La Mascota - Estadio	4.017	251.2	100.0000	10	23.0	10	23.0	119.8
QUINDIALO to Viaducto la Yahaira	2.940	286.5	100.0000	10	23.0	10	23.0	117.1

Fuente: PTP Link Planner vers.3.5.3

En el anexo 6 de este documento se adjunta el detalle de todos los cálculos de propagación junto con el resumen del proyecto diseñado para cada punto crítico y el punto de repetición, en donde se detallan a fondo los siguientes ítems.

- **Project Summary.-** Se genera una tabla con el punto de repetición y cada punto crítico.
- Detalle de cada cálculo generado entre el punto de repetición y cada punto crítico de generación de CO2. Entre los principales cálculos que se generan tenemos:
 - ✓ Perfil de cada enlace (línea de vista, reflexión).
 - ✓ Velocidad promedio del enlace.
 - ✓ Disponibilidad del enlace
 - ✓ Distancia.
 - ✓ Banda de radio frecuencia.
 - ✓ Ancho de banda.
 - ✓ Ganancia.
 - ✓ Tablas del performance (alta capacidad y capacidad simétrica).
 - ✓ Factores climáticos, pérdidas y standards.

4.12.5 EQUIPOS PROPUESTOS

Entre las distintas marcas más comerciales de equipos para radio enlace que existe en el mercado tenemos: MOTOROLA, MIKROTIK, UBIQUITI.

Por los bajos costos y su alta performance que proporciona, se propone seleccionar la marca UBIQUITI.

a) EQUIPOS PROPUESTOS PARA RADIO ENLACES

Para enlazar cada punto crítico con un punto de repetición se propone utilizar el equipo **UBIQUITI NANO STATION M5** el mismo que envía/recibe datos IP en cada punto.

Las características generales del equipo son las siguientes.

Cuenta con 150 Mbps de velocidad real al aire libre y hasta 15 km + gama. Es un equipo con una antena con ganancia de 16dBi, diseñada con doble polaridad en 5GHz con aislamiento optimizado.

Conectividad Ethernet dual

Proporciona un puerto Ethernet secundaria con software habilitado para la salida de POE.

POE Inteligente

Hardware remoto, circuitos del reajuste para que el dispositivo se restablezca de forma remota de un lugar de alimentación.

- Procesador: Atheros MIPS 24KC, 400MHz
- Memoria: 32MB SDRAM, 8MB Flash
- Interface de Red: 2 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45) Ethernet Interface
- Peso: 0.4kg
- Tamaño: 29.4 cm x 8 cm x 3cm
- Máximo poder de consumo: 8 watts
- Operación a intemperie: -30C a 80C
- Operación sobre humedad: 5 a 95% de humedad
- Fuente de alimentación: 110-240VAC 15VDC 0.8A US-style plug

El equipo **UBIQUITI NANO STATION M5** tiene el aspecto que se puede ver en la siguiente figura.



Fig. 4.24. UBIQUITI NANO STATION M5

Fuente: dl.ubnt.com/datasheets/nanostationm/nsm_ds_web.pdf

- En el punto de repetición ubicado en el cerro Quindalo se propone ubicar un equipo repetidor **UBIQUITI ROCKET M5** el mismo que tiene las características que se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 4.18 Características del equipo UBIQUITI ROCKET M5

SYSTEM INFORMATION							
Processor Specs		Atheros MIPS 24KC, 400MHz					
Memory Information		64MB SDRAM, 8MB Flash					
Networking Interface		1 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45) Ethernet Interface					
REGULATORY / COMPLIANCE INFORMATION							
Wireless Approvals		FCC Part 15.247, IC RS210, CE					
RoHS Compliance		YES					
OPERATING FREQUENCY 5470MHz-5825MHz							
5GHz TX POWER SPECIFICATIONS			5GHz RX SPECIFICATIONS				
	DataRate	Avg. TX	Tolerance		DataRate	Sensitivity	Tolerance
11a	6-24Mbps	27 dBm	+/-2dB	11a	6-24Mbps	-94 dBm min	+/-2dB
	36Mbps	25 dBm	+/-2dB		36Mbps	-80 dBm	+/-2dB
	48Mbps	23 dBm	+/-2dB		48Mbps	-77 dBm	+/-2dB
	54Mbps	22 dBm	+/-2dB		54Mbps	-75 dBm	+/-2dB
5GHz 11n	MCS0	27 dBm	+/-2dB	5GHz 11n	MCS0	-96 dBm	+/-2dB
	MCS1	27 dBm	+/-2dB		MCS1	-95 dBm	+/-2dB
	MCS2	27 dBm	+/-2dB		MCS2	-92 dBm	+/-2dB
	MCS3	27 dBm	+/-2dB		MCS3	-90 dBm	+/-2dB
	MCS4	26 dBm	+/-2dB		MCS4	-86 dBm	+/-2dB
	MCS5	24 dBm	+/-2dB		MCS5	-83 dBm	+/-2dB
	MCS6	22 dBm	+/-2dB		MCS6	-77 dBm	+/-2dB
	MCS7	21 dBm	+/-2dB		MCS7	-74 dBm	+/-2dB
	MCS8	27 dBm	+/-2dB		MCS8	-95 dBm	+/-2dB
	MCS9	27 dBm	+/-2dB		MCS9	-93 dBm	+/-2dB
	MCS10	27 dBm	+/-2dB		MCS10	-90 dBm	+/-2dB
	MCS11	27 dBm	+/-2dB		MCS11	-87 dBm	+/-2dB
	MCS12	26 dBm	+/-2dB		MCS12	-84 dBm	+/-2dB
	MCS13	24 dBm	+/-2dB		MCS13	-79 dBm	+/-2dB
	MCS14	22 dBm	+/-2dB		MCS14	-78 dBm	+/-2dB
MCS15	21 dBm	+/-2dB	MCS15	-75 dBm	+/-2dB		
PHYSICAL / ELECTRICAL / ENVIRONMENTAL							
Enclosure Size		16cm length x 8cm width x 3cm height					
Weight		0.5 kg					
RF Connector		2x RPSMA (Waterproof)					
Enclosure Characteristics		Outdoor UV Stabilized Plastic					
Mounting Kit		Pole Mounting Kit included					
Max Power Consumption		8 Watts					
Power Supply		24V, 1A POE Supply Included					
Power Method		Passive Power over Ethernet (pairs 4,5+; 7,8 return)					
Operating Temperature		-30C to 75C					
Operating Humidity		5 to 95% Condensing					
Shock and Vibration		ETSI300-019-1.4					

Fuente: http://dl.ubnt.com/rocketM5_DS.pdf

El equipo UBIQUITI ROCKET M5 tiene el aspecto que se puede ver en la siguiente figura.



Fig. 4.25. UBIQUITI ROCKET M5

Fuente: http://dl.ubnt.com/rocketM5_DS.pdf

Para cubrir todo el casco urbano de la ciudad de Ambato se propone utilizar una Antena sectorial de 90 grados **UBIQUITI AM-5G20-90** que se instalaría junto con el equipo **UBIQUITI ROCKET M5** como se puede ver en la siguiente figura, ambos funcionarían en el punto repetidor.



Fig. 4.26. Antena UBIQUITI AM-5G20-90 armada junto con Ubiquiti ROCKET M5.

Fuente: <http://www.ds3comunicaciones.com/ubiquiti/AM-5G20-90.html>

Las especificaciones principales de la antena **Ubiquiti AM-5G20-90** se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 4.19 Especificaciones principales de la antena Ubiquiti AM-5G20-90

AM-5G20-90	
Dimensions	700 x 135 x 70 mm
Weight	5.9 kg (Mount Included)
Frequency	5.15 - 5.85 GHz
Gain	19.4 - 20.3 dBi
HPOL Beamwidth	91° (6 dB)
VPOL Beamwidth	85° (6 dB)
Elevation Beamwidth	4°
Electrical Downtilt	2°
Max. VSWR	1.5:1
Wind Loading	41 lbf @ 125 mph
Wind Survivability	125 mph
Polarization	Dual Linear
Cross-Pol Isolation	28 dB Min.
ETSI Specification	EN 302 326 DN2
Mounting	Universal Pole Mount, RocketM Bracket, and Weatherproof RF Jumpers Included

Fuente: http://dl.ubnt.com/guides/sector/airMAX_Sector_AM-5G20-90_QSG.pdf

b) INTERFACE DE ZIGBEE A IP

Para transformar los datos obtenidos en cada sensor a datos IP se propone utilizar el equipo **F8914 ZigBee Terminal** el mismo que posee las siguientes características:

- Chip de procesamiento de diseño de bajo consumo de energía de alta potencia ZigBee industrial,
- Apoyar modos de disparo múltiple del sueño y reducir la disipación de potencia más alejado.
- Carcasa: hierro, proporcionando IP30.
- Rango de protección de energía: DC 5 ~ 35 V
- Estabilidad y Fiabilidad.
- Soporte de hardware y software de fiabilidad WDT
- RS232 / RS485 / RS422 puertos: 15KV ESD protección
- Puerto de alimentación: revertir voltaje y protección contra sobretensiones puerto de antena: protección contra rayos (opcional)

Estándar y Conveniencia

- Adoptar bloque de terminales interfaz
- Conveniente para los puertos RS232 / RS485 estándar
- Soporte de aplicaciones industriales que pueden conectarse a dispositivos serie directamente.
- TTL interface RS232 nivel lógico personalizable.
- Soporta modo intelectual textuales, entra en estado de comunicación de forma automática cuando se alimenta
- Apoyo de varios modos de trabajo.

Alta performance

- De configuración conveniente y interfaz de mantenimiento
- Soporte ZigBee repetidor de corta distancia
- Soporte de transmisión de datos inalámbrica y la función del dispositivo terminal
- de Apoyo punto a punto, punto a multipunto, Peer-to-Peer y malla de
- soporte a la red 65.000 nodos
- nodo central textuales, nodo de rutas y terminales difusión
- Difusión de la ayuda y la transferencia de la dirección de destino
- Apoyar alcance de comunicación de ancho
- Provee 3 I/O canales de entrada, compatible con 3 canales de salida de onda, 3 entradas analógicas y 3 entradas de contadores de pulso.

El aspecto físico del equipo **F8914 ZigBee Terminal** se puede visualizar en la siguiente figura.



Fig. 4.27. F8914 ZigBee Terminal

Fuente: <http://www.ctiresources.com.my/wp-content/uploads/downloads/2012/10/F8914-ZigBee-Terminal.pdf>

4.12.6 PRESUPUESTO DE LA PROPUESTA DE ENLACE

El presupuesto estimado para la propuesta de enlace de la red sensorial inalámbrica en la ciudad de Ambato se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 4.20 Presupuesto de la propuesta de enlace en la ciudad de Ambato.

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario (\$)	Valor del Rubro (\$)
1	UBIQUITI NANO STATION M5	14	\$ 100,00	\$ 1.400,00
2	F8914 ZigBee Terminal	14	\$ 81,05	\$ 1.134,70
3	Antena sectorial UBIQUITI AM-5G20-90	1	\$ 250,00	\$ 250,00
4	UBIQUITI ROCKET M5	1	\$ 170,00	\$ 170,00
5	Tubo poste 3m	14	\$ 50,00	\$ 700,00
6	Cable FTP (30m) por c/pto crítico	14	\$ 60,00	\$ 840,00
7	Sensores MG-811	13	\$ 56,05	\$ 728,65
8	Arduino UNO R3	13	\$ 35,00	\$ 455,00
9	XbeeShieldRobotale	13	\$ 20,00	\$ 260,00

10	MódulosXbee Pro (S2B) zb	13	\$ 60,00	\$ 780,00
11	Cajas plásticas	13	\$ 4,50	\$ 58,50
12	Batería de 9 Volts	13	\$ 2,80	\$ 36,40
13	Elementos electrónicos para nodos sensoriales	13	\$ 3,50	\$ 45,50
14	Módulo Xbee Pro (S2B) zb para punto de monitoreo	1	\$ 60,00	\$ 60,00
15	Caja para Módulo Xbee Pro (S2B) zb (punto de monitoreo)	1	\$ 2,50	\$ 2,50
16	Elementos electrónicos para punto de monitoreo	1	\$ 3,50	\$ 3,50
17	Costos de implementación de los nodos sensoriales	13	\$ 15,00	\$ 195,00
18	Costos de implementación del punto de monitoreo	1	\$ 5,00	\$ 5,00
19	Instalación de antena repetidora	1	\$ 250,00	\$ 250,00
20	Instalación en puntos críticos	14	\$ 50,00	\$ 700,00
Subtotal, USD \$				\$ 8.074,75
Imprevistos (5%), USD \$				\$ 403,74
TOTAL, USD \$				\$ 8.478,49

Elaborado por: El Autor.

Por consiguiente el presupuesto total de implementación para el prototipo de una red sensorial inalámbrica para la medición del nivel de CO2 en la ciudad de Ambato es de: **\$8478,49.**

4.12.7 ESQUEMA GENERAL DE RED PROPUESTO

El esquema general de la red diseñada se trata del tipo punto – multipunto, donde en forma general el punto repetidor tendría un equipo encargado de la repetición de la información y una antena sectorial en cambio los puntos críticos tendrían una antena que se enlazaría al equipo repetidor, el esquema se puede ver en la siguiente figura.

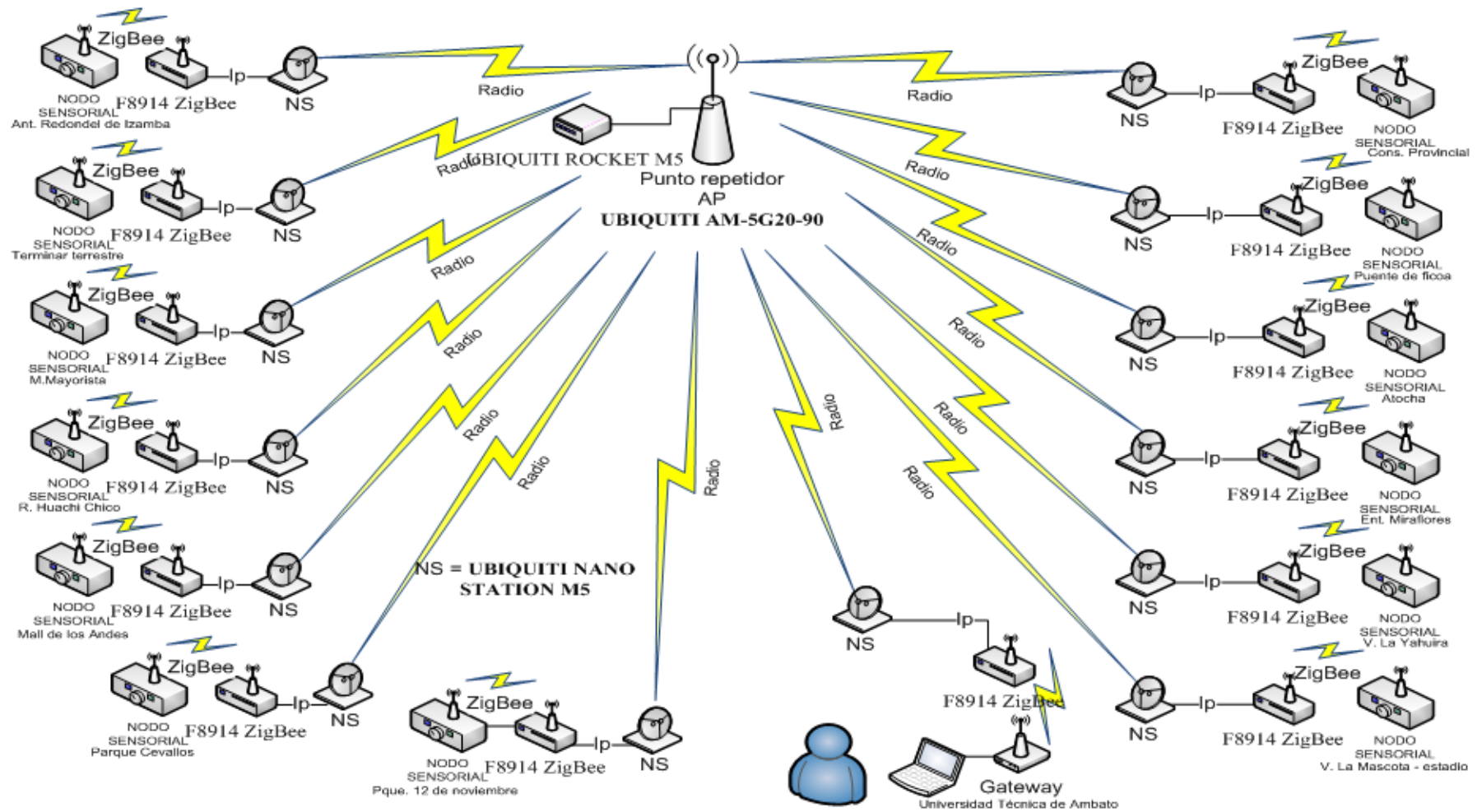


Fig. 4.28. Esquema general de la red sensorial inalámbrica propuesta.
Elaborado por: El Autor

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La mejor tecnología para ser utilizada en este tipo de redes sensoriales inalámbricas es la ZigBee, debido principalmente a su gran capacidad de cobertura, la operación en la banda libre ISM (Industrial, Scientific & Medical) de 2.4 GHz sin ningún tipo de interferencia con otras tecnologías inalámbricas presentes en el ambiente, las velocidades de transferencia entre 20 - 250 kbps suficientes para la cantidad de datos enviada desde los sensores, la asequible implementación de la red, la seguridad, versatilidad y escalabilidad que puede tener este tipo de redes.

- El diseño del sistema propuesto es escalable y puede ir creciendo a medida que aumente los puntos críticos donde se concentre mayor cantidad de CO₂ en la ciudad de Ambato.

- Mediante la interfaz gráfica del prototipo de red inalámbrica se determina el comportamiento de los datos que llegan al gateway desde cada nodo sensorial, mostrando los valores medidos.

- Al realizar las mediciones en diferentes puntos en la ciudad de Ambato se determinó que el sistema propuesto es adecuado para medir concentraciones de

CO₂ en espacios encerrados o directamente desde la fuente donde se genera, debido a que su concentración se disipa al entrar en contacto con el resto de compuestos del aire presentes en cada punto de medición.

5.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable implementar una red completa de sensores en Ambato, aumentando los nodos sensoriales en los puntos críticos donde se concentre mayor cantidad de CO₂ para obtener una mayor certeza del nivel general presente en esta ciudad.
- Se recomienda aplicar este estudio para desarrollar más proyectos en la medición de agentes contaminantes presentes en el ambiente, esto es viable debido a que la capacidad de los puertos analógicos y digitales del dispositivo Arduino resulta amplia para procesar y activar señales provenientes de la temperatura, humedad, monóxido de carbono, etc.
- Adicional a la interfaz gráfica se recomienda crear una base de datos para poder almacenar la información obtenida y posteriormente poder generar reportes o informes que ayuden a la generación de estadísticas de medición de CO₂ en la ciudad de Ambato.
- Es conveniente analizar las mediciones de CO₂ en la ciudad de Ambato y buscar mecanismos que ayuden a bajar los niveles que se generan para aumentar la calidad de vida de los habitantes de dicha ciudad.
- Es recomendable no utilizar los equipos en espacios abiertos para que las mediciones tengan la mayor veracidad posible en el punto donde se ubique cada nodo sensorial.

REFERENCIAS

- [1] T. W. Bank, «Emisiones de CO2 per capita en diferentes países,» 2014. [En línea]. Available: <http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>.
- [2] «El Norte,» [En línea]. Available: <http://www.elnorte.ec/ecuador/30810-omm-propone-en-ecuador-urgente-reducci%C3%B3n-emisiones-co2.html>.
- [3] J. C. Estrada Jiménez y D. J. Reinoso, «Biblioteca digital Escuela Politécnica Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1137/1/CD-1984.pdf>. [Último acceso: 16 Enero 2015].
- [4] L. V. Guagchinga Moreno y E. M. Guamaní Mena, «Repositorio Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga,» 2012. [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6042/1/T-ESPEL-0981.pdf>. [Último acceso: 18 Enero 2015].
- [5] R. E. Rosero Yugsi y M. A. Flores Marcillo, «Repositorio Universidad Politécnica Salesiana sede Quito,» [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6330/1/UPS-ST001079.pdf>. [Último acceso: 18 Enero 2015].
- [6] D. Digón, B. Bordetas, A. Otín, A. Medrano y S. Celma, «Paper Universidad de Zaragoza de España,» [En línea]. Available: <http://taee2008.unizar.es/papers/p118.pdf>. [Último acceso: 18 Enero 2015].
- [7] E. E. Flores Carbajal, «Repositorio Universidad de Cantabria de España,» 2007. [En línea]. Available: <http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1288/349251.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 18 Enero 2015].
- [8] D. A. Arias Álvarez y D. S. Gudiño Ponce, «Repositorio Escuela Politécnica del Ejército,» 2007. [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/686>. [Último acceso: 18 Enero 2015].
- [9] D. V. Reyes Mena, «Repositorio Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,» 2007. [En línea]. Available:

- <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3556/1/18T00557.pdf>. [Último acceso: 02 Febrero 2015].
- [10] C. A. Reinoso Jerez, «Repositorio Digital Biblioteca PUCE,» 2013. [En línea]. Available: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/6250>.
- [11] P. Pico Valencia, «UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA,» Junio 2012. [En línea]. Available: http://acceda.ulpgc.es/xmlui/bitstream/handle/10553/7560/TFM_Pablo_Pico_2012.pdf?sequence=5..
- [12] «Redes computacionales,» 13 Marzo 2013. [En línea]. Available: <http://redesjeaneth.blogspot.com/p/red-inalambrica-las-redes-inalambricas.html>.
- [13] A. Haek Pérez, D. Bellido Toré, J. Aguilar Porro, J. Durán Díaz, J. A. Cano Martín, O. J. González de Uña, P. J. Gámez Chamorro, V. Herrero Solana y V. López Mielgo, TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS, Andalucía: Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía IDEA, 2008.
- [14] Carmen de Pablos Heredero, INFORMÁTICA Y COMUNICACIONES EN LA EMPRESA, España: ESIC EDITORIAL, 2004.
- [15] H. Labiod, H. Afifi y C. de Santis, WI-FI, BLUETOOTH, ZIGBEE AND WIMAX, editorial Springer Verlag, 2007.
- [16] D. Gascón, «Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible,» Julio 2010. [En línea]. Available: <http://www.libelium.com/libelium-downloads/libelium-bit-coit.pdf>.
- [17] D. M. T. Z. K. Sohraby, Available Wireless Technologies: Technology, Protocols, and Applications, John Wiley & Sons, Inc, 2007, p. 103.
- [18] J. P. Dignani, «ANÁLISIS DEL PROTOCOLO ZIGBEE,» 2011. [En línea]. Available: http://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Especializaciones/Redes_y_Seguridad/Trabajos_Finales/Dignanni_Jorge_Pablo.pdf. [Último acceso: 18 Diciembre 2014].
- [19] «Interempresas,» Institut Químic de Sarrià, 10 Enero 2012. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/100595-Analisis-del-CO2-atmosferico.html>.
- [20] «Ampere,» [En línea]. Available: <http://www.ampere.mx/monitoreo-a11.html>.
- [21] «VAISALA / Nota de aplicación,» 2013. [En línea]. Available:

- <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228ES-A.pdf>.
- [22] L. NEMOTO & CO., «USER'S MANUAL FOR NAP-21A,» 15 Diciembre 1995. [En línea]. Available: https://www.eleparts.co.kr/front/download.php?file_name=NAP-21A.pdf. [Último acceso: 22 Enero 2015].
- [23] «DFRobot,» [En línea]. Available: <http://www.dfrobot.com/image/data/SEN0159/CO2b%20MG811%20datasheet.pdf>.
- [24] «FIGARO Product Information TGS 4160,» Abril 2012. [En línea]. Available: <http://lib.chipdip.ru/048/DOC000048782.pdf>.
- [25] Texas Instruments, «MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER,» Diciembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f2001.pdf>. [Último acceso: 22 Enero 2015].
- [26] R. E. Ltd., «PICAXE-28X2 SHIELD BASE,» Abril 2011. [En línea]. Available: <http://www.picaxe.com/docs/axe401.pdf>. [Último acceso: 2015 Enero 22].
- [27] Arduino, «Arduino Uno,» 2015. [En línea]. Available: <http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardUno>. [Último acceso: 23 Enero 2015].
- [28] Amp'ed RF Inc, «Electronic Components Datasheet Search,» 2008. [En línea]. Available: <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/248146/ETC2/ZB21/93/1/ZB21.html>. [Último acceso: 24 Enero 2015].
- [29] F. Ltd, «EasyBee,» 29 Enero 2006. [En línea]. Available: http://www.rfsolutions.co.uk/acatalog/DS480-8_EasyBee.pdf. [Último acceso: 23 Enero 2015].
- [30] MEMSIC INC., «MICAZ WIRELESS MEASUREMENT SYSTEM,» [En línea]. Available: http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/micaz_datasheet-t.pdf. [Último acceso: 24 Enero 2015].
- [31] DIGI, «XBee / XBee-PRO ZB (S2B) Modules,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.digi.com/support/productdetail?pid=4549>. [Último acceso: 22 Enero 2015].

ANEXOS

ANEXO 1.- HOJA DE DATOS SENSOR DE CO2 MG-811

MG811 CO2 Sensor

Features

- Good sensitivity and selectivity to CO2
- Low humidity and temperature dependency
- Long stability and reproducibility

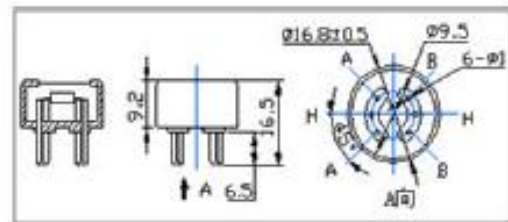
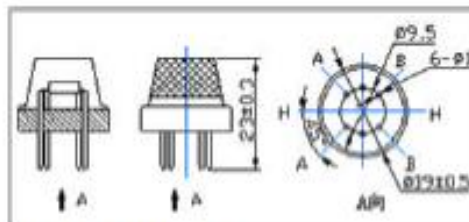
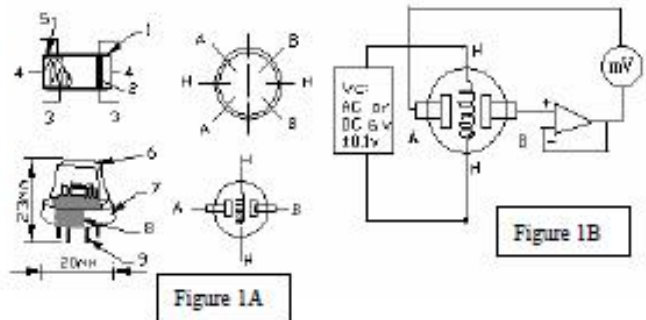
Application

- Air Quality Control
- Ferment Process Control
- Room Temperature CO2 concentration Detection



Structure and Testing Circuit

Sensor Structure and Testing Circuit as Figure. It composed by solid electrolyte layer (1), Gold electrodes (2), Platinum Lead (3), Heater (4), Porcelain Tube (5), 100mm double-layer stainless net (6), Nickel and copper plated ring (7), Bakelite (8), Nickel and copper plated pin (9).

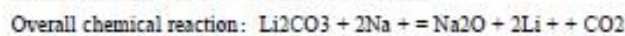
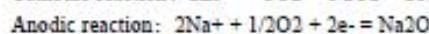
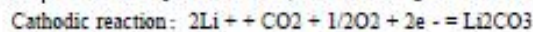


Working Principle

Sensor adopt solid electrolyte cell Principle, It is composed by the following solid cells:

Air, Au|NASICON|| carbonate|Au, air, CO2

When the sensor exposed to CO2, the following electrodes reaction occurs:



The Electromotive force(EMF) result from the above electrode reaction, accord with according to Nernst's equation:

$$\text{EMF} = E_c - (R \times T) / (2F) \ln (P(\text{CO}_2))$$

$P(\text{CO}_2)$ —CO2---partial Pressure E_c —Constant Volume R —Gas Constant volume

T — Absolute Temperature (K) F —Faraday constant

From Figure 1B, Sensor Heating voltage supplied from other circuit, When its surface temperature is high enough, the sensor equals to a cell, its two sides would output voltage signal, and its result accord with Nerast' sequation. In sensor testing, the impedance of amplifier should be within 100—1000GΩ, Its testing current should be control below 1pA.

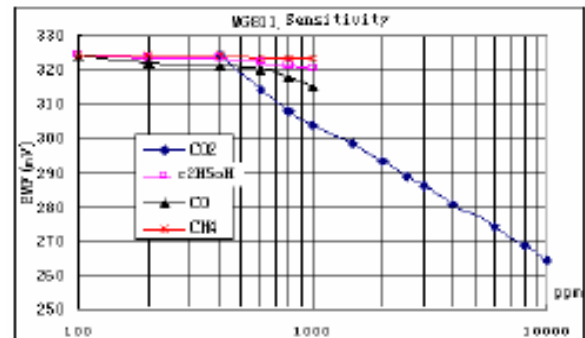
Specifications :

Symbol	Parameter Name	Technical	Remarks
V_{H1}	Heating Voltage	6.0±0.1 V	AC or DC
R_{H1}	Heating Resistor	30.0±5% Ω	Room Temperature
I_{H1}	Heating Current	@200mA	
P_{H1}	Heating Power	@1200mW	
T_{ao}	Operating Temperature	-20—50	
T_{as}	Storage Temperature	-20—70	
$\Delta E_{M F}$	Output	30—50mV	350—10000ppmCO ₂

Sensitivity :

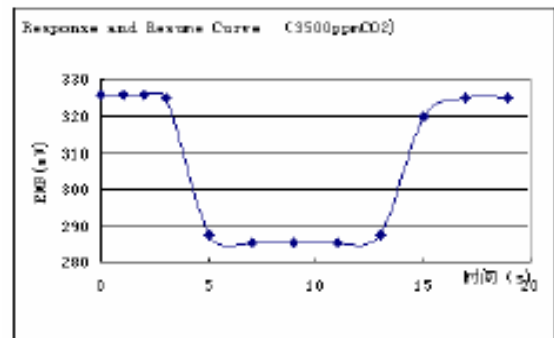
Figure 2 Shows gas sensor sensitivity curve. :

Conditions:
 Tem : 28 C、
 RH: 65%、
 Oxygen : 21%
 EMF: sensor EMF under different gas and concentration .

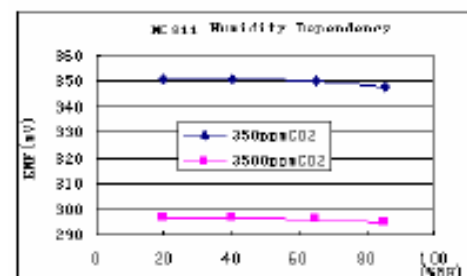
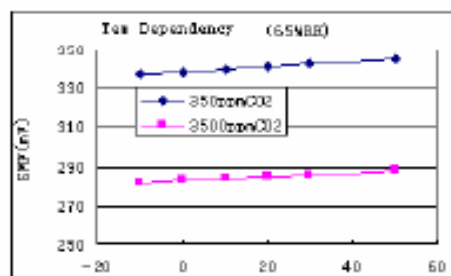


Response and Resume Characteristic :

Figure 3 shows Solid electrolyte sensor response and resume characteristics.



Temperature and Humidity Dependency :



ANEXO 2.- HOJA DE DATOS ATMEL 328P



ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P

ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES
IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH

DATASHEET SUMMARY

Features

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller Family
- Advanced RISC Architecture
 - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 20 MIPS Throughput at 20MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 4/8/16/32KBytes of In-System Self-Programmable Flash program memory
 - 256/512/512/1KBytes EEPROM
 - 512/1K/1K/2KBytes Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
- Atmel® QTouch® library support
 - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
 - QTouch and QMatrix® acquisition
 - Up to 64 sense channels
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Six PWM Channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
 - Temperature Measurement
 - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
 - Temperature Measurement
 - Programmable Serial USART
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I²C compatible)
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change

Atmel-027110-AVR-ATmega-Datasheet_10/05/14

- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 23 Programmable I/O Lines
 - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- Operating Voltage:
 - 1.8 - 5.5V
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C
- Speed Grade:
 - 0 - 4MHz@1.8 - 5.5V, 0 - 10MHz@2.7 - 5.5V, 0 - 20MHz @ 4.5 - 5.5V
- Power Consumption at 1MHz, 1.8V, 25°C
 - Active Mode: 0.2mA
 - Power-down Mode: 0.1µA
 - Power-save Mode: 0.75µA (Including 32kHz RTC)

1.1 Pin Descriptions

1.1.1 VCC

Digital supply voltage.

1.1.2 GND

Ground.

1.1.3 Port B (PB7:0) XTAL1/XTAL2/TOSC1/TOSC2

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Depending on the clock selection fuse settings, PB6 can be used as input to the inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

Depending on the clock selection fuse settings, PB7 can be used as output from the inverting Oscillator amplifier.

If the Internal Calibrated RC Oscillator is used as chip clock source, PB7...6 is used as TOSC2...1 input for the Asynchronous Timer/Counter2 if the AS2 bit in ASSR is set.

The various special features of Port B are elaborated in ["Alternate Functions of Port B"](#) on page 82 and ["System Clock and Clock Options"](#) on page 27.

1.1.4 Port C (PC5:0)

Port C is a 7-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The PC5...0 output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

1.1.5 PC6/RESET

If the RSTDISBL Fuse is programmed, PC6 is used as an I/O pin. Note that the electrical characteristics of PC6 differ from those of the other pins of Port C.

If the RSTDISBL Fuse is unprogrammed, PC6 is used as a Reset input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a Reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in [Table 29-11](#) on page 305. Shorter pulses are not guaranteed to generate a Reset.

The various special features of Port C are elaborated in ["Alternate Functions of Port C"](#) on page 85.

1.1.6 Port D (PD7:0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

The various special features of Port D are elaborated in ["Alternate Functions of Port D"](#) on page 88.

1.1.7 AV_{CC}

AV_{CC} is the supply voltage pin for the A/D Converter, PC3:0, and ADC7:6. It should be externally connected to V_{CC} , even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to V_{CC} through a low-pass filter. Note that PC6...4 use digital supply voltage, V_{CC} .

1.1.8 AREF

AREF is the analog reference pin for the A/D Converter.

1.1.9 ADC7:6 (TQFP and QFN/MLF Package Only)

In the TQFP and QFN/MLF package, ADC7:6 serve as analog inputs to the A/D converter. These pins are powered from the analog supply and serve as 10-bit ADC channels.

ANEXO 3.- HOJA DE DATOS Xbee-PRO (S2B)

Specifications of the Xbee/XBee-PRO ZB RF Module

Specifications of the Xbee®/XBee-PRO® ZB RF Module

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)	XBee-PRO (S2B)
Performance			
Indoor/Urban Range	up to 133 ft. (40 m)	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft. (60 m) International variant	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft. (60 m) International variant
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 400 ft. (120 m)	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft. (1500 m) International variant	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft. (1500 m) International variant
Transmit Power Output	2mW (+3dBm), boost mode enabled 1.25mW (+1dBm), boost mode disabled	50mW (+17 dBm) 10mW (+10 dBm) for International variant	63mW (+18 dBm) 10mW (+10 dBm) for International variant
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps	250,000 bps
Data Throughput	up to 35000 bps (see chapter 4)	up to 35000 bps (see chapter 4)	up to 35000 bps (see chapter 4)
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 bps - 1 Mbps (non-standard baud rates also supported)	1200 bps - 1 Mbps (non-standard baud rates also supported)	1200 bps - 1 Mbps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-95 dBm, boost mode enabled -95 dBm, boost mode disabled	-102 dBm	-102 dBm
Power Requirements			
Supply Voltage	2.1 - 3.6 V	3.0 - 3.4 V	2.7 - 3.6 V
Operating Current (Transmit, max output power)	40mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 35mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	295mA (@3.3 V) 170mA (@3.3 V) International variant	205mA, up to 220 mA with programmable variant (@3.3 V) 117mA, up to 132 mA with programmable variant (@3.3 V), International variant
Operating Current (Receive)	40mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 38mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	45 mA (@3.3 V)	47 mA, up to 62 mA with programmable variant (@3.3 V)
Idle Current (Receiver off)	15mA	15mA	15mA
Power-down Current	< 1 uA @ 25°C	3.5 uA typical @ 25°C	3.5 uA typical @ 25°C
General			
Operating Frequency Band	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960 x 1.297 (2.438cm x 3.294cm)	0.960 x 1.297 (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (Industrial)	-40 to 85° C (Industrial)	-40 to 85° C (Industrial)
Antenna Options	Integrated Whip Antenna, Embedded PCB Antenna, RPSMA, or U.FL Connector	Integrated Whip Antenna, Embedded PCB Antenna, RPSMA or U.FL Connector	Integrated Whip Antenna, Embedded PCB Antenna, RPSMA or U.FL Connector
I/O Interface	3.3V CMOS UART (not 5V tolerant), DIO, ADC	3.3V CMOS UART (not 5V tolerant), DIO, ADC	3.3V CMOS UART (not 5V tolerant), DIO, ADC
Networking & Security			
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer, and Mesh	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer, and Mesh	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer, and Mesh
Number of Channels	16 Direct Sequence Channels	14 Direct Sequence Channels	15 Direct Sequence Channels
Channels	11 to 26	11 to 24	11 to 25
Addressing Options	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)
Agency Approvals			
United States (FCC Part 15.247)	FCC ID: OUR-XBEE2	FCC ID: MCO-XBEEPRO2	FCC ID: MCO-PROS2B

Pin Signals for the XBee/XBee-PRO ZB RF Module

Pin Assignments for the XBee/XBee-PRO Modules

(Low-asserted signals are distinguished with a horizontal line above signal name.)

Pin #	Name	Direction	Default State	Description
1	VCC	-	-	Power supply
2	DOUT	Output	Output	UART Data Out
3	DIN / <u>CONFIG</u>	Input	Input	UART Data In
4	DIO12	Both	Disabled	Digital I/O 12
5	<u>RESET</u>	Both	Open-Collector with pull-up	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	RSSI PWM / DIO10	Both	Output	RX Signal Strength Indicator / Digital I/O
7	DIO11	Both	Input	Digital I/O 11
8	[reserved]	-	Disabled	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DIO8	Both	Input	Pin Sleep Control Line or Digital I/O 8
10	GND	-	-	Ground
11	DIO4	Both	Disabled	Digital I/O 4
12	<u>CTS</u> / DIO7	Both	Output	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7. CTS, if enabled, is an output.
13	ON / SLEEP	Output	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9
14	VREF	Input	-	Not used for EMQSO. Used for programmable secondary processor. For compatibility with other XBee modules, we recommend connecting this pin voltage reference if Analog sampling is desired. Otherwise, connect to GND.
15	Associate / DIO5	Both	Output	Associated Indicator, Digital I/O 5
16	<u>RTS</u> / DIO6	Both	Input	Request-to-Send Flow Control, Digital I/O 6. RTS, if enabled, is an input.
17	AO3 / DIO3	Both	Disabled	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AO2 / DIO2	Both	Disabled	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AO1 / DIO1	Both	Disabled	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AO0 / DIO0 / Commissioning Button	Both	Disabled	Analog Input 0, Digital I/O 0, or Commissioning Button

- Signal Direction is specified with respect to the module
- See Design Notes section below for details on pin connections.

Electrical Characteristics of the XBee/XBee-PRO ZB RF Module

DC Characteristics of the XBee/XBee-PRO

Symbol	Parameter	Condition	Min	Typical	Max	Units
V_{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	$0.2 * V_{CC}$	V
V_{IH}	Input High Voltage	All Digital Inputs	$0.8 * V_{CC}$	-	-	V
V_{OL}	Output Low Voltage	$V_{CC} \geq 2.7$ V	-	-	$0.18 * V_{CC}$	V
V_{OH}	Output High Voltage	$V_{CC} \geq 2.7$ V	$0.82 * V_{CC}$	-	-	V
I_{IN}	Input Leakage Current	$V_{IN} = V_{CC}$ or GND, all inputs, per pin	-	-	0.5uA	uA
I_{OHS}	Output source current (standard)	All digital outputs except RSSI/PWM, DIO10, DIO4			4	mA
I_{OHH}	Output source current (high current)	RSSI/PWM, DIO10, DIO4 digital outputs			8	mA
I_{OLS}	Output sink current (standard)	All digital inputs except RSSI/PWM, DIO10, DIO4			4	mA
I_{OLH}	Output sink current (high current)	RSSI/PWM, DIO10, DIO4 digital outputs			8	mA
$I_{OH} + I_{OL}$	Total output current for all I/O pins	All digital outputs			40	mA
V_{REF1}	VREF Internal	EM250 has an internal reference that is fixed	1.19	1.2	1.21	V
V_{ADC}	ADC input voltage range		0		VREF1	V
R_{IS}	Input Impedance	When taking a sample	1			M Ohm
R_I	Input Impedance	When not taking a sample	10			M Ohm

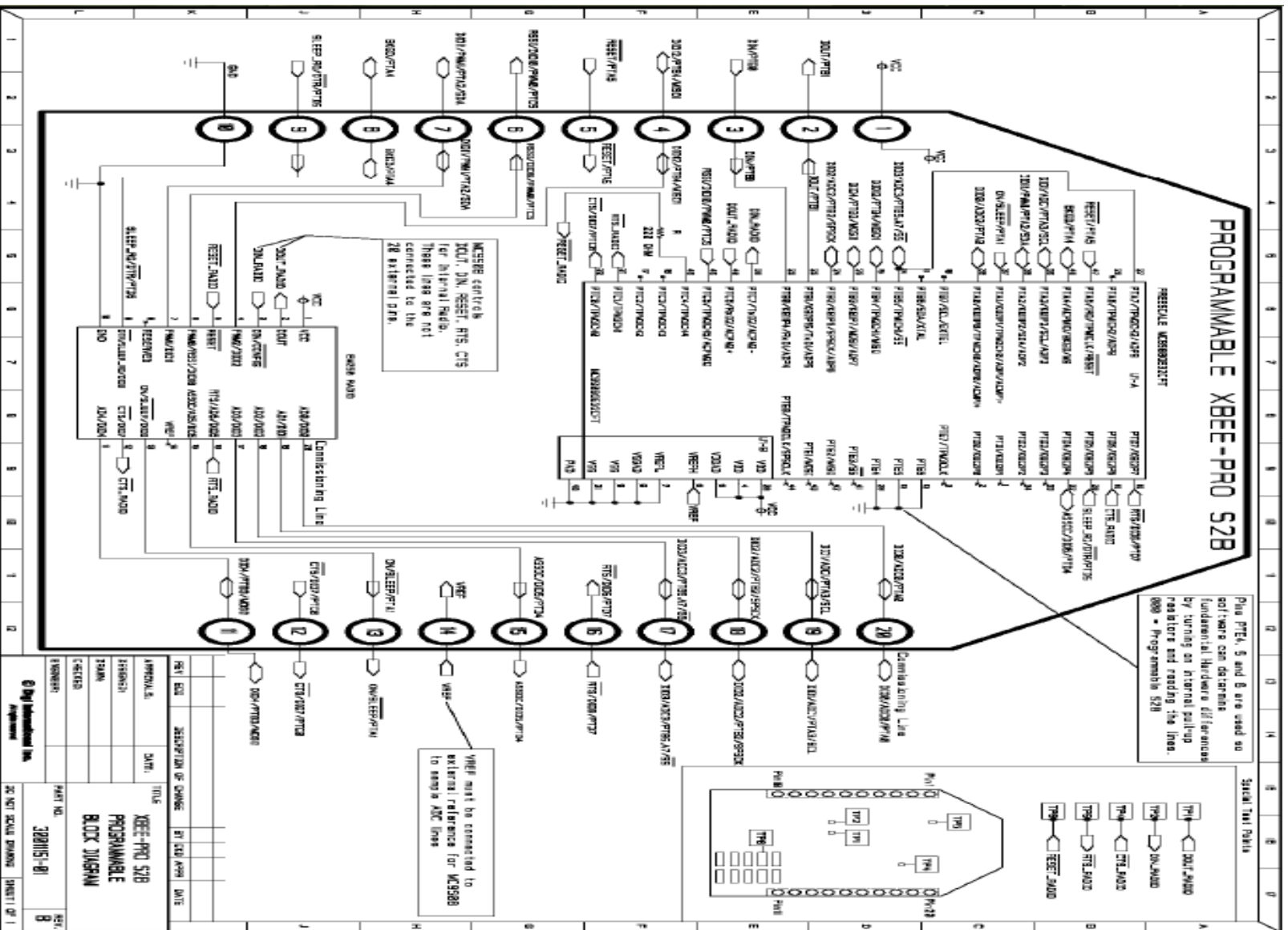
Note – The signal-ended ADC measurements are limited in their range and only guaranteed for accuracy in the range 0 to VREF1. The nature of the ADC's internal design allows for measurements outside of this range (+/- 200mV), but the accuracy of such measurements are not guaranteed.

Module Operation for Programmable Variant

The S2B modules that have the programmable option populated have a secondary processor with 32k of flash and 2k of RAM. This allows module integrators to put custom code on the XBee module to fit their own unique needs. The DIN, DOUT, RTS, CTS, and RESET lines are intercepted by the secondary processor to allow it to be in control of the data transmitted and received. All other lines are in parallel and can be controlled by either the EM250 or the MC9S08QE micro (see Block Diagram for details). The EM250 by default has control of certain lines. These lines can be released by the EM250 by sending the proper command(s) to disable the desired DIO line(s) (see XBee Command Reference Tables).

In order for the secondary processor to sample with ADCs, the XBee pin 14 (VREF) needs to be connected to a reference voltage.

Digi provides a bootloader that can take care of programming the processor over the air or through the serial interface. This means that over the air updates can be supported through an XMODEM protocol. The processor can also be programmed and debugged through a one wire interface BKGD (Pin 8).



XBee Programmable Bootloader

Overview

The XBee Programmable module is equipped with a Freescale MC9S08QExx application processor. This application processor comes with a supplied bootloader. The following section describes how to interface the customer's application code running on this processor to the XBee Programmable module's supplied bootloader.

This section discusses how to initiate firmware updates using the supplied bootloader for wired and over-the-air updates.

Bootloader Software Specifics

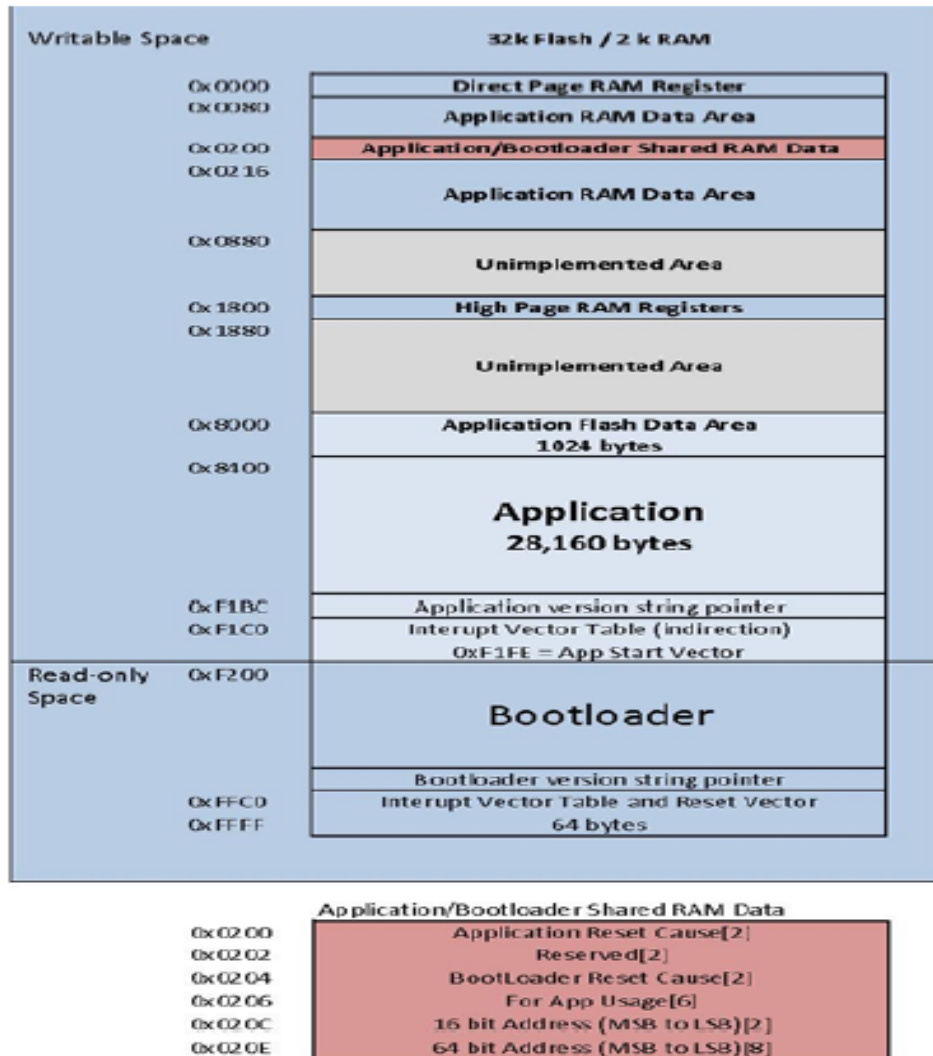
Memory Layout

Figure 1 shows the memory map for the MC9S08QE32 application processor.

The supplied bootloader occupies the bottom pages of the flash from 0xF200 to 0xFFFF. Application code cannot write to this space.

The application code can exist in Flash from address 0x8400 to 0xF1BC. 1k of Flash from 0x8000 to 0x83FF is reserved for Non Volatile Application Data that will not be erased by the bootloader during a flash update.

A portion of RAM is accessible by both the application and the bootloader. Specifically, there is a shared data region used by both the application and the bootloader that is located at RAM address 0x200 to 0x215. Application code should not write anything to AppResetCause or BLResetCause unless informing the bootloader of the impending reset reason.



2. XBee ZB RF Module Operation

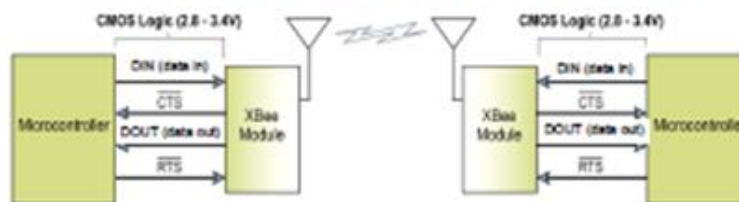
Serial Communications for the XBee/XBee-PRO ZB RF Module

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

UART Data Flow

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

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

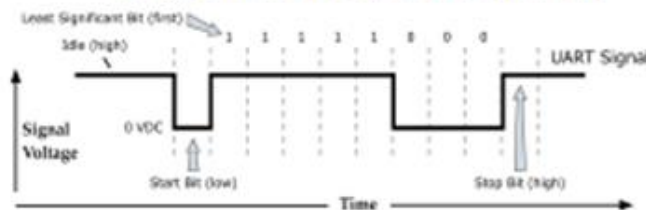


Serial Data

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

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

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



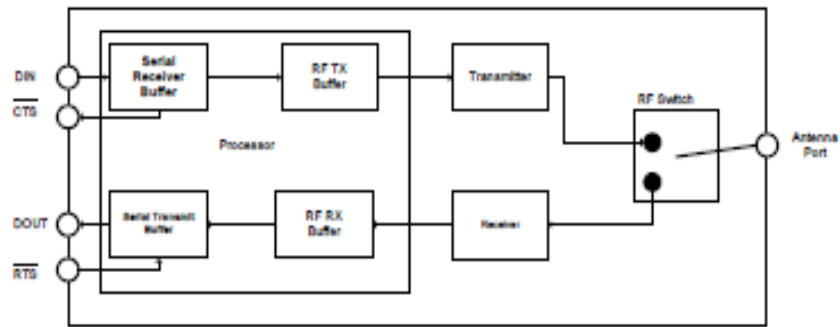
Serial communications depend on the two UARTs (the microcontroller's and the RF module's) to be configured with compatible settings (baud rate, parity, start bits, stop bits, data bits).

The UART baud rate, parity, and stop bits settings on the XBee module can be configured with the BD, NB, and SB commands respectively. See the command table in chapter 10 for details.

Serial Buffers

The XBee modules maintain small buffers to collect received serial and RF data, which is illustrated in the figure below. The serial receive buffer collects incoming serial characters and holds them until they can be processed. The serial transmit buffer collects data that is received via the RF link that will be transmitted out the UART.

Internal Data Flow Diagram



Serial Receive Buffer

When serial data enters the RF module through the DIN Pin (pin 3), the data is stored in the serial receive buffer until it can be processed. Under certain conditions, the module may not be able to process data in the serial receive buffer immediately. If large amounts of serial data are sent to the module, $\overline{\text{CTS}}$ flow control may be required to avoid overflowing the serial receive buffer.

Cases in which the serial receive buffer may become full and possibly overflow:

1. If the module is receiving a continuous stream of RF data, the data in the serial receive buffer will not be transmitted until the module is no longer receiving RF data.
2. If the module is transmitting an RF data packet, the module may need to discover the destination address or establish a route to the destination. After transmitting the data, the module may need to retransmit the data if an acknowledgment is not received, or if the transmission is a broadcast. These issues could delay the processing of data in the serial receive buffer.

Serial Transmit Buffer

When RF data is received, the data is moved into the serial transmit buffer and sent out the UART. If the serial transmit buffer becomes full enough such that all data in a received RF packet won't fit in the serial transmit buffer, the entire RF data packet is dropped.

Cases in which the serial transmit buffer may become full resulting in dropped RF packets

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

Serial Flow Control

The $\overline{\text{RTS}}$ and $\overline{\text{CTS}}$ module pins can be used to provide $\overline{\text{RTS}}$ and/or $\overline{\text{CTS}}$ flow control. $\overline{\text{CTS}}$ flow control provides an indication to the host to stop sending serial data to the module. $\overline{\text{RTS}}$ flow control allows the host to signal the module to not send data in the serial transmit buffer out the uart. $\overline{\text{RTS}}$ and $\overline{\text{CTS}}$ flow control are enabled using the D6 and D7 commands.

$\overline{\text{CTS}}$ Flow Control

If $\overline{\text{CTS}}$ flow control is enabled (D7 command), when the serial receive buffer is 17 bytes away from being full, the module de-asserts $\overline{\text{CTS}}$ (sets it high) to signal to the host device to stop sending serial data. $\overline{\text{CTS}}$ is re-asserted after the serial receive buffer has 34 bytes of space.

$\overline{\text{RTS}}$ Flow Control

If $\overline{\text{RTS}}$ flow control is enabled (D6 command), data in the serial transmit buffer will not be sent out the DOUT pin as long as $\overline{\text{RTS}}$ is de-asserted (set high). The host device should not de-assert $\overline{\text{RTS}}$ for long

periods of time to avoid filling the serial transmit buffer. If an RF data packet is received, and the serial transmit buffer does not have enough space for all of the data bytes, the entire RF data packet will be discarded.

Note: If the XBee is sending data out the UART when RTS is de-asserted (set high), the XBee could send up to 5 characters out the UART after RTS is de-asserted.

Serial Interface Protocols

The XBee modules support both transparent and API (Application Programming Interface) serial interfaces.

Transparent Operation

When operating in transparent mode, the modules act as a serial line replacement. All UART data received through the DIN pin is queued up for RF transmission. When RF data is received, the data is sent out through the DOUT pin. The module configuration parameters are configured using the AT command mode interface.

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

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

RF modules that contain the following firmware versions will support Transparent Mode: 20xx (AT coordinator), 22xx (AT router), and 28xx (AT end device).

A Comparison of Transparent and API Operation

The following table compares the advantages of transparent and API modes of operation:

Transparent Operation Features	
Simple interface	All received serial data is transmitted unless the module is in command mode.
Easy to support	It is easier for an application to support transparent operation and command mode.
API Operation Features	
Easy to manage data transmissions to multiple destinations	Transmitting RF data to multiple remotes only requires changing the address in the API frame. This process is much faster than in transparent operation where the application must enter AT command mode, change the address, exit command mode, and then transmit data. Each API transmission can return a transmit status frame indicating the success or reason for failure.
Received data frames indicate the sender's address	All received RF data API frames indicate the source address.
Advanced ZigBee addressing support	API transmit and receive frames can expose ZigBee addressing fields including source and destination endpoints, cluster ID and profile ID. This makes it easy to support ZDO commands and public profile traffic.
Advanced networking diagnostics	API frames can provide indication of IO samples from remote devices, and node identification messages.
Remote Configuration	Set / read configuration commands can be sent to remote devices to configure them as needed using the API.

As a general rule of thumb, API firmware is recommended when a device:

- sends RF data to multiple destinations
- sends remote configuration commands to manage devices in the network
- receives IO samples from remote devices
- receives RF data packets from multiple devices, and the application needs to know which device sent which packet
- must support multiple ZigBee endpoints, cluster IDs, and/or profile IDs
- uses the ZigBee Device Profile services.

If the above conditions do not apply (e.g. a sensor node, router, or a simple application), then AT firmware might be suitable. It is acceptable to use a mixture of devices running API and AT firmware in a network.

Modes of Operation for the XBee/XBee-PRO ZB RF Module

Idle Mode

When not receiving or transmitting data, the RF module is in Idle Mode. The module shifts into the other modes of operation under the following conditions:

- Transmit Mode (Serial data in the serial receive buffer is ready to be packetized)
- Receive Mode (Valid RF data is received through the antenna)
- Sleep Mode (End Devices only)
- Command Mode (Command Mode Sequence is issued)

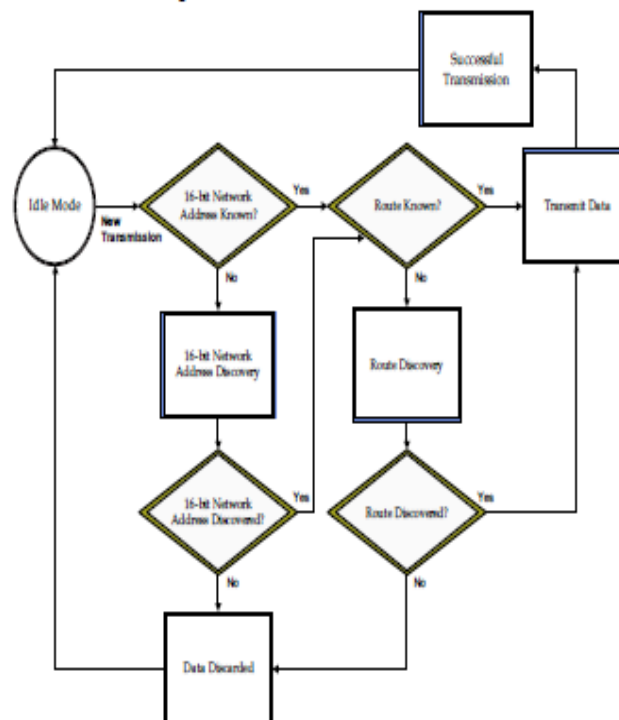
Transmit Mode

When serial data is received and is ready for packetization, the RF module will exit Idle Mode and attempt to transmit the data. The destination address determines which node(s) will receive the data.

Prior to transmitting the data, the module ensures that a 16-bit network address and route to the destination node have been established.

If the destination 16-bit network address is not known, network address discovery will take place. If a route is not known, route discovery will take place for the purpose of establishing a route to the destination node. If a module with a matching network address is not discovered, the packet is discarded. The data will be transmitted once a route is established. If route discovery fails to establish a route, the packet will be discarded.

Transmit Mode Sequence



When data is transmitted from one node to another, a network-level acknowledgement is transmitted back across the established route to the source node. This acknowledgement packet indicates to the source node that the data packet was received by the destination node. If a network acknowledgement is not received, the source node will re-transmit the data.

It is possible in rare circumstances for the destination to receive a data packet, but for the source to not receive the network acknowledgment. In this case, the source will retransmit the data, which could cause the destination to receive the same data packet multiple times. The XBee modules do not filter out duplicate packets. The application should include provisions to address this potential issue

See Data Transmission and Routing in chapter 4 for more information.

Receive Mode

If a valid RF packet is received, the data is transferred to the serial transmit buffer.

Command Mode

To modify or read RF Module parameters, the module must first enter into Command Mode - a state in which incoming serial characters are interpreted as commands. Refer to the API Mode section in chapter 9 for an alternate means of configuring modules.

AT Command Mode

To Enter AT Command Mode:

Send the 3-character command sequence "+++" and observe guard times before and after the command characters. [Refer to the "Default AT Command Mode Sequence" below.]

Default AT Command Mode Sequence (for transition to Command Mode):

- No characters sent for one second [GT (Guard Times) parameter = 0x3E8]
- Input three plus characters ("+++") within one second [CC (Command Sequence Character) parameter = 0x2B.]
- No characters sent for one second [GT (Guard Times) parameter = 0x3E8]

Once the AT command mode sequence has been issued, the module sends an "OK\r" out the DOUT pin. The "OK\r" characters can be delayed if the module has not finished transmitting received serial data.

When command mode has been entered, the command mode timer is started (CT command), and the module is able to receive AT commands on the DIN pin.

All of the parameter values in the sequence can be modified to reflect user preferences.

NOTE: Failure to enter AT Command Mode is most commonly due to baud rate mismatch. By default, the BD (Baud Rate) parameter = 3 (9600 bps).

To Send AT Commands:

Send AT commands and parameters using the syntax shown below.

Figure 2-01. Syntax for sending AT Commands



To read a parameter value stored in the RF module's register, omit the parameter field.

The preceding example would change the RF module Destination Address (Low) to "0x1F". To store the new value to non-volatile (long term) memory, subsequently send the WR (Write) command.

For modified parameter values to persist in the module's registry after a reset, changes must be saved to non-volatile memory using the WR (Write) Command. Otherwise, parameters are restored to previously saved values after the module is reset.

Command Response

When a command is sent to the module, the module will parse and execute the command. Upon successful execution of a command, the module returns an "OK" message. If execution of a command results in an error, the module returns an "ERROR" message.

Applying Command Changes

Any changes made to the configuration command registers through AT commands will not take effect until the changes are applied. For example, sending the BD command to change the baud rate will not change the actual baud rate until changes are applied. Changes can be applied in one of the following ways:

- The AC (Apply Changes) command is issued.
- AT command mode is exited.

To Exit AT Command Mode:

1. Send the ATCN (Exit Command Mode) command (followed by a carriage return).
[OR]
2. If no valid AT Commands are received within the time specified by CT (Command Mode Timeout) Command, the RF module automatically returns to Idle Mode.

For an example of programming the RF module using AT Commands and descriptions of each configurable parameter, please see the Command Reference Table chapter.

Sleep Mode

Sleep modes allow the RF module to enter states of low power consumption when not in use. The XBee RF modules support both pin sleep (sleep mode entered on pin transition) and cyclic sleep (module sleeps for a fixed time). XBee sleep modes are discussed in detail in chapter 6.

3. XBee ZigBee Networks

Introduction to ZigBee

ZigBee is an open global standard built on the IEEE 802.15.4 MAC/PHY. ZigBee defines a network layer above the 802.15.4 layers to support advanced mesh routing capabilities. The ZigBee specification is developed by a growing consortium of companies that make up the ZigBee Alliance. The Alliance is made up of over 300 members, including semiconductor, module, stack, and software developers.

ZigBee Stack Layers

The ZigBee stack consists of several layers including the PHY, MAC, Network, Application Support Sublayer (APS), and ZigBee Device Objects (ZDO) layers. Technically, an Application Framework (AF) layer also exists, but will be grouped with the APS layer in remaining discussions. The ZigBee layers are shown in the figure below.

A description of each layer appears in the following table:

ZigBee Layer	Description
PHY	Defines the physical operation of the ZigBee device including receive sensitivity, channel rejection, output power, number of channels, chip modulation, and transmission rate specifications. Most ZigBee applications operate on the 2.4 GHz ISM band at a 250kbps data rate. See the IEEE 802.15.4 specification for details.
MAC	Manages RF data transactions between neighboring devices (point to point). The MAC includes services such as transmission retry and acknowledgment management, and collision avoidance techniques (CSMA-CA).
Network	Adds routing capabilities that allows RF data packets to traverse multiple devices (multiple "hops") to route data from source to destination (peer to peer).
APS (AF)	Application layer that defines various addressing objects including profiles, clusters, and endpoints.
ZDO	Application layer that provides device and service discovery features and advanced network management capabilities.

Networking Concepts For the XBee/XBee-PRO ZB RF Module

Device Types

ZigBee defines three different device types: coordinator, router, and end device.

Node Types / Sample of a Basic ZigBee Network Topology

A **coordinator** has the following characteristics: it

- Selects a channel and PAN ID (both 64-bit and 16-bit) to start the network
- Can allow routers and end devices to join the network
- Can assist in routing data
- Cannot sleep--should be mains powered
- Can buffer RF data packets for sleeping end device children.

A **router** has the following characteristics: it

- Must join a ZigBee PAN before it can transmit, receive, or route data
- After joining, can allow routers and end devices to join the network
- After joining, can assist in routing data
- Cannot sleep--should be mains powered.
- Can buffer RF data packets for sleeping end device children.

An **end device** has the following characteristics: it

- Must join a ZigBee PAN before it can transmit or receive data
- Cannot allow devices to join the network
- Must always transmit and receive RF data through its parent. Cannot route data.
- Can enter low power modes to conserve power and can be battery-powered.

An example of such a network is shown below:



In ZigBee networks, the coordinator must select a PAN ID (64-bit and 16-bit) and channel to start a network. After that, it behaves essentially like a router. The coordinator and routers can allow other devices to join the network and can route data.

After an end device joins a router or coordinator, it must be able to transmit or receive RF data through that router or coordinator. The router or coordinator that allowed an end device to join becomes the "parent" of the end device. Since the end device can sleep, the parent must be able to buffer or retain incoming data packets destined for the end device until the end device is able to wake and receive the data.

PAN ID

ZigBee networks are called personal area networks or PANs. Each network is defined with a unique PAN identifier (PAN ID). This identifier is common among all devices of the same network. ZigBee devices are either preconfigured with a PAN ID to join, or they can discover nearby networks and select a PAN ID to join.

ZigBee supports both a 64-bit and a 16-bit PAN ID. Both PAN IDs are used to uniquely identify a network. Devices on the same ZigBee network must share the same 64-bit and 16-bit PAN IDs. If multiple ZigBee networks are operating within range of each other, each should have unique PAN IDs.

The 16-bit PAN ID is used as a MAC layer addressing field in all RF data transmissions between devices in a network. However, due to the limited addressing space of the 16-bit PAN ID (65,535 possibilities), there is a possibility that multiple ZigBee networks (within range of each other) could use the same 16-bit PAN ID. To resolve potential 16-bit PAN ID conflicts, the ZigBee Alliance created a 64-bit PAN ID.

The 64-bit PAN ID (also called the extended PAN ID), is intended to be a unique, non-duplicated value. When a coordinator starts a network, it can either start a network on a preconfigured 64-bit PAN ID, or it can select a random 64-bit PAN ID. The 64-bit PAN ID is used during joining; if a device has a preconfigured 64-bit PAN ID, it will only join a network with the same 64-bit PAN ID. Otherwise, a device could join any detected PAN and inherit the PAN ID from the network when it joins. The 64-bit PAN ID is included in all ZigBee beacons and is used in 16-bit PAN ID conflict resolution.

Routers and end devices are typically configured to join a network with any 16-bit PAN ID as long as the 64-bit PAN ID is valid. Coordinators typically select a random 16-bit PAN ID for their network.

Since the 16-bit PAN ID only allows up to 65,535 unique values, and since the 16-bit PAN ID is randomly selected, provisions exist in ZigBee to detect if two networks (with different 64-bit PAN IDs) are operating on

the same 16-bit PAN ID. If such a conflict is detected, the ZigBee stack can perform PAN ID conflict resolution to change the 16-bit PAN ID of the network in order to resolve the conflict. See the ZigBee specification for details.

To summarize, ZigBee routers and end devices should be configured with the 64-bit PAN ID of the network they want to join. They typically acquire the 16-bit PAN ID when they join a network.

Operating Channel

ZigBee utilizes direct-sequence spread spectrum modulation and operates on a fixed channel. The 802.15.4 PHY defines 16 operating channels in the 2.4 GHz frequency band. XBee modules support all 16 channels and XBee-PRO modules support 14 of the 16 channels.

ZigBee Application Layers: In Depth

This section provides a more in-depth look at the ZigBee application stack layers (APS, ZDO) including a discussion on ZigBee endpoints, clusters, and profiles. Much of the material in this section can introduce unnecessary details of the ZigBee stack that are not required in many cases.

Skip this section if

- The XBee does not need to interoperate or talk to non-Digi ZigBee devices
- The XBee simply needs to send data between devices.

Read this section if

- The XBee may talk to non-Digi ZigBee devices
- The XBee requires network management and discovery capabilities of the ZDO layer
- The XBee needs to operate in a public application profile (smart energy, home automation, etc.)

Application Support Sublayer (APS)

The APS layer in ZigBee adds support for application profiles, cluster IDs, and endpoints.

Application Profiles

Application profiles specify various device descriptions including required functionality for various devices. The collection of device descriptions forms an application profile. Application profiles can be defined as "Public" or "Private" profiles. Private profiles are defined by a manufacturer whereas public profiles are defined, developed, and maintained by the ZigBee Alliance. Each application profile has a unique profile identifier assigned by the ZigBee Alliance.

Examples of public profiles include:

- Home Automation
- Smart Energy
- Commercial Building Automation

The Smart Energy profile, for example, defines various device types including an energy service portal, load controller, thermostat, in-home display, etc. The Smart Energy profile defines required functionality for each device type. For example, a load controller must respond to a defined command to turn a load on or off. By defining standard communication protocols and device functionality, public profiles allow interoperable ZigBee solutions to be developed by independent manufacturers.

Digi XBee ZB firmware operates on a private profile called the Digi Drop-In Networking profile. However, the API firmware in the module can be used in many cases to talk to devices in public profiles or non-Digi private profiles. See the API Operations chapter for details.

Clusters

A cluster is an application message type defined within a profile. Clusters are used to specify a unique function, service, or action. For example, the following are some clusters defined in the home automation profile:

- On/Off - Used to switch devices on or off (lights, thermostats, etc.)
- Level Control - Used to control devices that can be set to a level between on and off
- Color Control - Controls the color of color capable devices.

Each cluster has an associated 2-byte cluster identifier (cluster ID). The cluster ID is included in all application transmissions. Clusters often have associated request and response messages. For example, a smart energy gateway (service portal) might send a load control event to a load controller in order to schedule turning on or off an appliance. Upon executing the event, the load controller would send a load control report message back to the gateway.

Devices that operate in an application profile (private or public) must respond correctly to all required clusters. For example, a light switch that will operate in the home automation public profile must correctly implement the On/Off and other required clusters in order to interoperate with other home automation devices. The ZigBee Alliance has defined a ZigBee Cluster Library (ZCL) that contains definitions or various general use clusters that could be implemented in any profile.

XBee modules implement various clusters in the Digi private profile. In addition, the API can be used to send or receive messages on any cluster ID (and profile ID or endpoint). See the Explicit Addressing ZigBee Command API frame in chapter 3 for details.

Endpoints

The APS layer includes supports for endpoints. An endpoint can be thought of as a running application, similar to a TCP/IP port. A single device can support one or more endpoints. Each application endpoint is identified by a 1-byte value, ranging from 1 to 240. Each defined endpoint on a device is tied to an application profile. A device could, for example, implement one endpoint that supports a Smart Energy load controller, and another endpoint that supports other functionality on a private profile.

ZigBee Device Profile

Profile ID 0x0000 is reserved for the ZigBee Device Profile. This profile is implemented on all ZigBee devices. Device Profile defines many device and service discovery features and network management capabilities. Endpoint 0 is a reserved endpoint that supports the ZigBee Device Profile. This endpoint is called the ZigBee Device Objects (ZDO) endpoint.

ZigBee Device Objects (ZDO)

The ZDO (endpoint 0) supports the discovery and management capabilities of the ZigBee Device Profile. A complete listing of all ZDP services is included in the ZigBee specification. Each service has an associated cluster ID.

The XBee ZB firmware allows applications to easily send ZDO messages to devices in the network using the API. See the ZDO Transmissions section in chapter 4 for details.

Coordinator Operation For the XBee/XBee-PRO ZB RF Module

Forming a Network

The coordinator is responsible for selecting the channel, PAN ID (16-bit and 64-bit), security policy, and stack profile for a network. Since a coordinator is the only device type that can start a network, each ZigBee network must have one coordinator. After the coordinator has started a network, it can allow new devices to join the network. It can also route data packets and communicate with other devices on the network.

To ensure the coordinator starts on a good channel and unused PAN ID, the coordinator performs a series of scans to discover any RF activity on different channels (energy scan) and to discover any nearby operating PANs (PAN scan). The process for selecting the channel and PAN ID are described in the following sections.

Channel Selection

When starting a network, the coordinator must select a "good" channel for the network to operate on. To do this, it performs an energy scan on multiple channels (frequencies) to detect energy levels on each channel. Channels with excessive energy levels are removed from its list of potential channels to start on.

PAN ID Selection

After completing the energy scan, the coordinator scans its list of potential channels (remaining channels after the energy scan) to obtain a list of neighboring PANs. To do this, the coordinator sends a beacon request

(broadcast) transmission on each potential channel. All nearby coordinators and routers (that have already joined a ZigBee network) will respond to the beacon request by sending a beacon back to the coordinator. The beacon contains information about the PAN the device is on, including the PAN identifiers (16-bit and 64-bit). This scan (collecting beacons on the potential channels) is typically called an active scan or PAN scan.

After the coordinator completes the channel and PAN scan, it selects a random channel and unused 16-bit PAN ID to start on.

Security Policy

The security policy determines which devices are allowed to join the network, and which device(s) can authenticate joining devices. See chapter 5 for a detailed discussion of various security policies.

Persistent Data

Once a coordinator has started a network, it retains the following information through power cycle or reset events:

- PAN ID
- Operating channel
- Security policy and frame counter values
- Child table (end device children that are joined to the coordinator).

The coordinator will retain this information indefinitely until it leaves the network. When the coordinator leaves a network and starts a new network, the previous PAN ID, operating channel, and child table data are lost.

XBee ZB Coordinator Startup

The following commands control the coordinator network formation process.

Network formation commands used by the coordinator to form a network.

Command	Description
ID	Used to determine the 64-bit PAN ID. If set to 0 (default), a random 64-bit PAN ID will be selected.
SC	Determines the scan channels bitmask (up to 16 channels) used by the coordinator when forming a network. The coordinator will perform an energy scan on all enabled SC channels. It will then perform a PAN ID scan and then form the network on one of the SC channels.
SD	Set the scan duration period. This value determines how long the coordinator performs an energy scan or PAN ID scan on a given channel.
ZS	Set the ZigBee stack profile for the network.
EE	Enable or disable security in the network.
NK	Set the network security key for the network. If set to 0 (default), a random network security key will be used.
KY	Set the trust center link key for the network. If set to 0 (default), a random link key will be used.
EO	Set the security policy for the network.

Once the coordinator starts a network, the network configuration settings and child table data persist through power cycles as mentioned in the "Persistent Data" section.

When the coordinator has successfully started a network, it

- Allows other devices to join the network for a time (see NJ command)
- Sets AI=0
- Starts blinking the Associate LED
- Sends an API modem status frame ("coordinator started") out the UART (API firmware only).

These behaviors are configurable using the following commands:

Command	Description
NJ	Sets the permit-join time on the coordinator, measured in seconds.
D5	Enables the Associate LED functionality.
LT	Sets the Associate LED blink time when joined. Default is 1 blink per second.

If any of the command values in the network formation commands table changes, the coordinator will leave its current network and start a new network, possibly on a different channel. Note that command changes must be applied (AC or CN command) before taking effect.

Permit Joining

The permit joining attribute on the coordinator is configurable with the NJ command. NJ can be configured to always allow joining, or to allow joining for a short time.

Joining Always Enabled

If NJ=0xFF (default), joining is permanently enabled. This mode should be used carefully. Once a network has been deployed, the application should strongly consider disabling joining to prevent unwanted joins from occurring.

Joining Temporarily Enabled

If NJ < 0xFF, joining will be enabled only for a number of seconds, based on the NJ parameter. The timer is started once the XBee joins a network. Joining will not be re-enabled if the module is power cycled or reset. The following mechanisms can restart the permit-joining timer:

- Changing NJ to a different value (and applying changes with the AC or CN commands)
- Pressing the commissioning button twice (enables joining for 1 minute)
- Issuing the CB command with a parameter of 2 (software emulation of a 2 button press - enables joining for 1 minute).

Resetting the Coordinator

When the coordinator is reset or power cycled, it checks its PAN ID, operating channel and stack profile against the network configuration settings (ID, CH, ZS). It also verifies the saved security policy against the security configuration settings (EE, NK, KY). If the coordinator's PAN ID, operating channel, stack profile, or security policy is not valid based on its network and security configuration settings, then the coordinator will leave the network and attempt to form a new network based on its network formation command values.

To prevent the coordinator from leaving an existing network, the WR command should be issued after all network formation commands have been configured in order to retain these settings through power cycle or reset events.

Leaving a Network

There are a couple of mechanisms that will cause the coordinator to leave its current PAN and start a new network based on its network formation parameter values. These include the following:

- Change the ID command such that the current 64-bit PAN ID is invalid.
- Change the SC command such that the current channel (CH) is not included in the channel mask.
- Change the ZS or any of the security command values (excluding NK).
- Issue the NR0 command to cause the coordinator to leave.
- Issue the NR1 command to send a broadcast transmission, causing all devices in the network to leave and migrate to a different channel.
- Press the commissioning button 4 times or issue the CB command with a parameter of 4.
- Issue a network leave command.

Note that changes to ID, SC, ZS, and security command values only take effect when changes are applied (AC or CN commands).

Replacing a Coordinator (Security Disabled Only)

In rare occasions, it may become necessary to replace an existing coordinator in a network with a new physical device. If security is not enabled in the network, a replacement XBee coordinator can be configured with the PAN ID (16-bit and 64-bit), channel, and stack profile settings of a running network in order to replace an existing coordinator.

NOTE: Having two coordinators on the same channel, stack profile, and PAN ID (16-bit and 64-bit) can cause problems in the network and should be avoided. When replacing a coordinator, the old coordinator should be turned off before starting the new coordinator.

To replace a coordinator, the following commands should be read from a device on the network:

AT Command	Description
OP	Read the operating 64-bit PAN ID.
OI	Read the operating 16-bit PAN ID.
CH	Read the operating channel.
ZS	Read the stack profile.

Each of the commands listed above can be read from any device on the network. (These parameters will be the same on all devices in the network.) After reading these commands from a device on the network, these parameter values should be programmed into the new coordinator using the following commands.

AT Command	Description
ID	Set the 64-bit PAN ID to match the read OP value.
II	Set the initial 16-bit PAN ID to match the read OI value.
SC	Set the scan channels bitmask to enable the read operating channel (CH command). For example, if the operating channel is 0x0B, set SC to 0x0001. If the operating channel is 0x17, set SC to 0x1000.
ZS	Set the stack profile to match the read ZS value.

Note: II is the initial 16-bit PAN ID. Under certain conditions, the ZigBee stack can change the 16-bit PAN ID of the network. For this reason, the II command cannot be saved using the WR command. Once II is set, the coordinator leaves the network and starts on the 16-bit PAN ID specified by II.

Example: Starting a Coordinator

1. Set SC and ID to the desired scan channels and PAN ID values. (The defaults should suffice.)
2. If SC or ID is changed from the default, issue the WR command to save the changes.
3. If SC or ID is changed from the default, apply changes (make SC and ID changes take effect) either by sending the AC command or by exiting AT command mode.
4. The Associate LED will start blinking once the coordinator has selected a channel and PAN ID.
5. The API Modem Status frame ("Coordinator Started") is sent out the UART (API firmware only).

6. Reading the AI command (association status) will return a value of 0, indicating a successful startup.
7. Reading the MY command (16-bit address) will return a value of 0, the ZigBee-defined 16-bit address of the coordinator.

After startup, the coordinator will allow joining based on its NJ value.

Example: Replacing a Coordinator (security disabled)

1. Read the OP, OI, CH, and ZS commands on the running coordinator.
2. Set the ID, SC, and ZS parameters on the new coordinator, followed by WR command to save these parameter values.
3. Turn off the running coordinator.
4. Set the II parameter on the new coordinator to match the read OI value on the old coordinator.
5. Wait for the new coordinator to start (AI=0).

Router Operation for the XBee/XBee-PRO ZB RF Module

Routers must discover and join a valid ZigBee network before they can participate in a ZigBee network. After a router has joined a network, it can allow new devices to join the network. It can also route data packets and communicate with other devices on the network.

Discovering ZigBee Networks

To discover nearby ZigBee networks, the router performs a PAN (or active) scan, just like the coordinator does when it starts a network. During the PAN scan, the router sends a beacon request (broadcast) transmission on the first channel in its scan channels list. All nearby coordinators and routers operating on that channel (that are already part of a ZigBee network) respond to the beacon request by sending a beacon back to the router. The beacon contains information about the PAN the nearby device is on, including the PAN identifier (PAN ID), and whether or not joining is allowed. The router evaluates each beacon received on the channel to determine if a valid PAN is found. A router considers a PAN to be valid if the PAN:

- Has a valid 64-bit PAN ID (PAN ID matches ID if ID > 0)
- Has the correct stack profile (ZS command)
- Is allowing joining.

If a valid PAN is not found, the router performs the PAN scan on the next channel in its scan channels list and continues scanning until a valid network is found, or until all channels have been scanned. If all channels have been scanned and a valid PAN was not discovered, all channels will be scanned again.

The ZigBee Alliance requires that certified solutions not send beacon request messages too frequently. To meet certification requirements, the XBee firmware attempts 9 scans per minute for the first 5 minutes, and 3 scans per minute thereafter. If a valid PAN is within range of a joining router, it should typically be discovered within a few seconds.

Joining a Network

Once the router discovers a valid network, it sends an association request to the device that sent a valid beacon requesting a join on the ZigBee network. The device allowing the join then sends an association response frame that either allows or denies the join.

When a router joins a network, it receives a 16-bit address from the device that allowed the join. The 16-bit address is randomly selected by the device that allowed the join.

Authentication

In a network where security is enabled, the router must then go through an authentication process. See the Security chapter for a discussion on security and authentication.

After the router is joined (and authenticated, in a secure network), it can allow new devices to join the network.

Persistent Data

Once a router has joined a network, it retains the following information through power cycle or reset events:

- PAN ID
- Operating channel
- Security policy and frame counter values
- Child table (end device children that are joined to the coordinator).

The router will retain this information indefinitely until it leaves the network. When the router leaves a network, the previous PAN ID, operating channel, and child table data are lost.

XBee ZB Router Joining

When the router is powered on, if it is not already joined to a valid ZigBee network, it immediately attempts to find and join a valid ZigBee network.

Note: The DJ command can be set to 1 to disable joining. The DJ parameter cannot be written with WR, so a power cycle always clears the DJ setting.

The following commands control the router joining process.

Command	Description
ID	Sets the 64-bit PAN ID to join. Setting ID=0 allows the router to join any 64-bit PAN ID.
SC	Set the scan channels bitmask that determines which channels a router will scan to find a valid network. SC on the router should be set to match SC on the coordinator. For example, setting SC to 0x281 enables scanning on channels 0x0B, 0x12, and 0x14, in that order.
SD	Set the scan duration, or time that the router will listen for beacons on each channel.
ZS	Set the stack profile on the device.
EE	Enable or disable security in the network. This must be set to match the EE value (security policy) of the coordinator.
KY	Set the trust center link key. If set to 0 (default), the link key is expected to be obtained (unencrypted) during joining.

Once the router joins a network, the network configuration settings and child table data persist through power cycles as mentioned in the "Persistent Data" section previously. If joining fails, the status of the last join attempt can be read in the AI command register.

If any of the above command values change, when command register changes are applied (AC or CN commands), the router will leave its current network and attempt to discover and join a new valid network.

When a ZB router has successfully joined a network, it:

- Allows other devices to join the network for a time
- Sets AI=0
- Starts blinking the Associate LED
- Sends an API modem status frame ("associated") out the UART (API firmware only).

These behaviors are configurable using the following commands:

Command	Description
NJ	Sets the permit-join time on the router, or the time that it will allow new devices to join the network, measured in seconds. If NJ=0xFF, permit joining will always be enabled.
DS	Enables the Associate LED functionality.
LT	Sets the Associate LED blink time when joined. Default is 2 blinks per second (router).

Permit Joining

The permit joining attribute on the router is configurable with the NJ command. NJ can be configured to always allow joining, or to allow joining for a short time.

Joining Always Enabled

If NJ=0xFF (default), joining is permanently enabled. This mode should be used carefully. Once a network has been deployed, the application should strongly consider disabling joining to prevent unwanted joins from occurring.

Joining Temporarily Enabled

If NJ < 0xFF, joining will be enabled only for a number of seconds, based on the NJ parameter. The timer is started once the XBee joins a network. Joining will not be re-enabled if the module is power cycled or reset. The following mechanisms can restart the permit-joining timer:

- Changing NJ to a different value (and applying changes with the AC or CN commands)
- Pressing the commissioning button twice (enables joining for 1 minute)
- Issuing the CB command with a parameter of 2 (software emulation of a 2 button press - enables joining for 1 minute)
- Causing the router to leave and rejoin the network.

Router Network Connectivity

Once a router joins a ZigBee network, it remains connected to the network on the same channel and PAN ID as long as it is not forced to leave. (See Leaving a Network section for details.) If the scan channels (SC), PAN ID (ID) and security settings (EE, KY) do not change after a power cycle, the router will remain connected to the network after a power cycle.

If a router may physically move out of range of the network it initially joined, the application should include provisions to detect if the router can still communicate with the original network. If communication with the original network is lost, the application may choose to force the router to leave the network (see Leaving a Network section for details). The XBee firmware includes two provisions to automatically detect the presence of a network, and leave if the check fails.

Power-On Join Verification

The JV command (join verification) enables the power-on join verification check. If enabled, the XBee will attempt to discover the 64-bit address of the coordinator when it first joins a network. Once it has joined, it will also attempt to discover the 64-bit address of the coordinator after a power cycle event. If 3 discovery attempts fail, the router will leave the network and try to join a new network. Power-on join verification is disabled by default (JV defaults to 0).

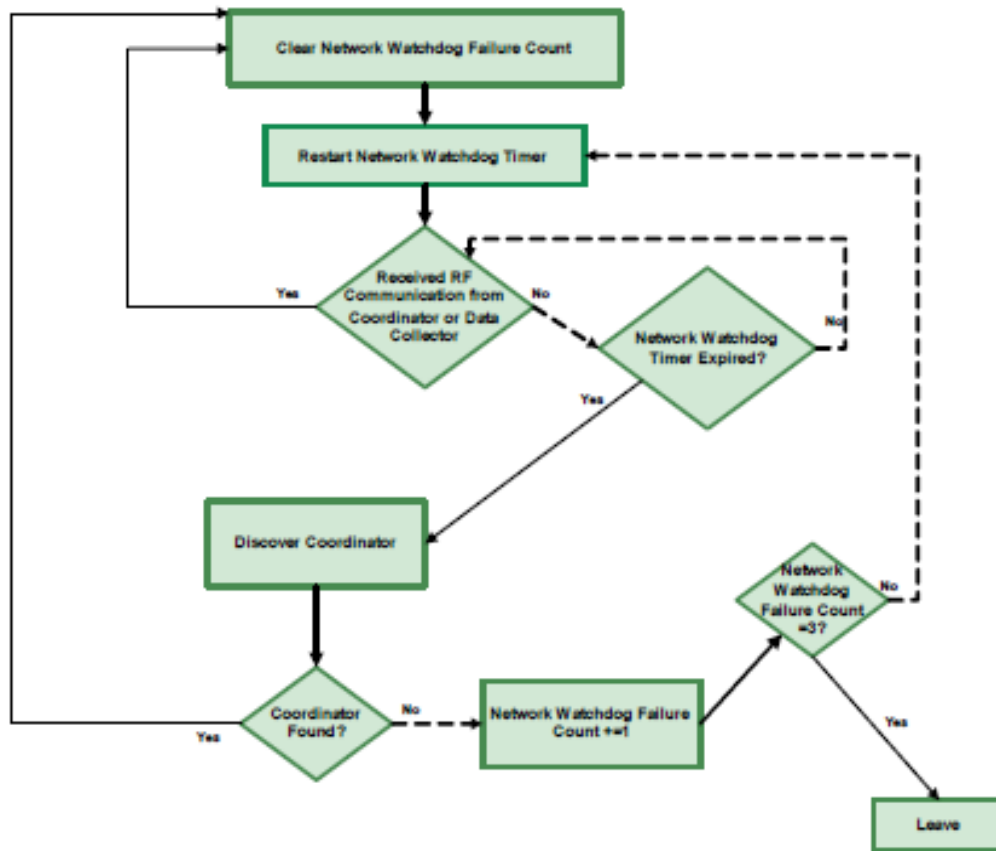
Network Watchdog

The NW command (network watchdog timeout) can be used for a powered router to periodically check for the presence of a coordinator to verify network connectivity. The NW command specifies a timeout in minutes where the router must receive communication from the coordinator or data collector. The following events restart the network watchdog timer:

- RF data received from the coordinator
- RF data sent to the coordinator and an acknowledgment was received
- Many-to-one route request was received (from any device)
- Changing the value of NW.

If the watchdog timer expires (no valid data received for NW time), the router will attempt to discover the 64-bit address of the coordinator. If the address cannot be discovered, the router records one watchdog timeout. Once three consecutive network watchdog timeouts have expired ($3 * NW$) and the coordinator has not responded to the address discovery attempts, the router will leave the network and attempt to join a new network. Anytime a router receives valid data from the coordinator or data collector, it will clear the watchdog timeouts counter and restart the watchdog timer. The watchdog timer (NW command) is settable to several days. The network watchdog feature is disabled by default (NW defaults to 0).

Network Watchdog Behavior



Leaving a Network

There are a couple of mechanisms that will cause the router to leave its current PAN and attempt to discover and join a new network based on its network joining parameter values.

These include the following:

- Change the ID command such that the current 64-bit PAN ID is invalid.
- Change the SC command such that the current channel (CH) is not included in the channel mask.
- Change the ZS or any of the security command values.
- Issue the NR0 command to cause the router to leave.
- Issue the NR1 command to send a broadcast transmission, causing all devices in the network to leave and migrate to a different channel.
- Press the commissioning button 4 times or issue the CB command with a parameter of 4.

- Issue a network leave command.

Note that changes to ID, SC, ZS, and security command values only take effect when changes are applied (AC or CN commands).

Resetting the Router

When the router is reset or power cycled, it checks its PAN ID, operating channel and stack profile against the network configuration settings (ID, SC, ZS). It also verifies the saved security policy is valid based on the security configuration commands (EE, KY). If the router's PAN ID, operating channel, stack profile, or security policy is invalid, the router will leave the network and attempt to join a new network based on its network joining command values.

To prevent the router from leaving an existing network, the WR command should be issued after all network joining commands have been configured in order to retain these settings through power cycle or reset events.

Example: Joining a Network

After starting a coordinator (that is allowing joins), the following steps will cause a router to join the network:

1. Set ID to the desired 64-bit PAN ID, or to 0 to join any PAN.
2. Set SC to the list of channels to scan to find a valid network.
3. If SC or ID is changed from the default, apply changes (make SC and ID changes take effect) by issuing the AC or CN command.
4. The Associate LED will start blinking once the router has joined a PAN.
5. If the Associate LED is not blinking, the AI command can be read to determine the cause of join failure.
6. Once the router has joined, the OP and CH commands will indicate the operating 64-bit PAN ID and channel the router joined.
7. The MY command will reflect the 16-bit address the router received when it joined.
8. The API Modem Status frame ("Associated") is sent out the UART (API firmware only).
9. The joined router will allow other devices to join for a time based on its NJ setting.

ANEXO 4.- PROGRAMACIÓN DE CADA ARDUINO PARA LOS MÓDULOS SENSORIALES

```
/****** Parámetros relacionados con el Hardware *****/
#define MG_PIN (0) //define
#define BOOL_PIN (2)
#define DC_GAIN (8.5) //define the DC gain of amplifier

/****** Parámetros relacionados con el software *****/
#define READ_SAMPLE_INTERVAL (50) //define cuántas muestras se van a
                                  tomar en el funcionamiento normal
#define READ_SAMPLE_TIMES (5) //define el intervalo de tiempo (en
                               milisegundos) entre cada muestra tomada

/****** Declaración de constantes *****/
.
#define ZERO_POINT_VOLTAGE (0.324) //define la salida del sensor en
                                   voltios cuando la concentración de CO2 es 400ppm
#define REACTION_VOLTAGE (0.020) //define la caída de tensión del
                                   sensor cuando el sensor detecta el CO2 dentro de los 1000 ppm

/****** Globales *****/
Float CO2Curve[3] =
{2.602,ZERO_POINT_VOLTAGE,(REACTION_VOLTAGE/(2.602-3))};
//Dos puntos son tomados desde la curva del datasheet
//con estos dos puntos, se forma una línea que es
//"aproximadamente equivalente" a la curva original
//Formato de los datos:{ x, y, pendiente };
//point1: (lg400, 0.324)
//point2: (lg1000, 3)
//pendiente = (REACTION_VOLTAGE) / (log400 -log1000)
```

```

void setup()
{
Serial.begin(9600);           //configuración del UART, baudrate = 9600bps
  pinMode(BOOL_PIN, INPUT);   //poner BOOL_PIN como entrada
  digitalWrite(BOOL_PIN, HIGH); //poner BOOL_PIN en estado alto

Serial.print("SENSOR 1: ");   //Podría ser "SENSOR 2: " en el segundo sensor
}
void loop()
{
int percentage;
float volts;

volts = MGRead(MG_PIN);
percentage = MGGetPercentage(volts,CO2Curve);
Serial.print("CO2:");
if (percentage == -1) {
Serial.print( "<400" );
  } else {
Serial.print(percentage);
  }
Serial.print( "ppm" );
Serial.print("\n");

delay(60000);           //tiempo de espera para enviar el siguiente dato
}

```

/****** FUNCIÓN MGRead *****/

Entrada: mg_pin - Entrada Analógica

Salida: Voltaje que envía el sensor

Observación: Esta función lee la salida del sensor.

*****/

```

floatMGRead(intmg_pin)
{
int i;
float v=0;
for (i=0;i<READ_SAMPLE_TIMES;i++) {
    v += analogRead(mg_pin);
delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
}
v = (v/READ_SAMPLE_TIMES) *5/1024 ;
return v;
}

```

******* FUNCIÓN MQGetPercentage *******

Entrada: medida de la salida del sensor en voltios

pcurve - puntos de la curva del datasheet del sensor

Salida: medición de ppm del CO2

Observación: Mediante el uso de la pendiente y un punto de la línea.

X (valor logarítmico de ppm) de la línea podrían derivarse

si Y (salida MG-811) se proporciona. Como es una coordenada logarítmica,

la potencia de 10 se utiliza para convertir el resultado en un valor no logarítmico.

*******/**

```

intMGGetPercentage(float volts, float *pcurve)
{
if ((volts/DC_GAIN )>=ZERO_POINT_VOLTAGE) {
return -1;
} else {
returnpow(10, ((volts/DC_GAIN)-pcurve[1])/pcurve[2]+pcurve[0]);
}
}

```

ANEXO 5.- PROGRAMACIÓN DEL HMI EN EL PROTOTIPO DE RED SENSORIAL

```
PublicClass Form1
Friend estado, num, linea, kk, i AsInteger
Friend carac AsString
Friend auto, espe AsInteger
Friend cuenta AsByte
'Datos de la trama
Friend vector(10000) AsString

PrivateSub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load
Me.SerialPort1.Encoding = System.Text.Encoding.Default

ForEach sp AsStringInMy.Computer.Ports.SerialPortNames
Me.cbcom.Items.Add(sp)
Next
Me.rbccharacterin.Checked = True
Me.rbccharacter.Checked = True
estado = 0
    linea = 0
i = 0
EndSub

PrivateSub btrecibir_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btrecibir.Click
Dim k AsInteger
If estado = 1 Then
Me.SerialPort1.Close()           'cerrar el puerto serie
    estado = 0
Me.btrecibir.Text = "RECIBIR"'cambia el texto del boton
'Activa la propiedad DiscardNull del puerto serie activo
    Me.SerialPort1.DiscardNull = True
Me.Timer1.Enabled = True'Desactiva la funcion Timer1

Else
Try
Me.SerialPort1.PortName() = Me.cbcom.Text
    k = Me.cbbaud.Text
Me.SerialPort1.BaudRate() = k
Me.SerialPort1.Close()           'cerrar el puerto serie
Me.SerialPort1.Open()            'Abrir el puerto serie
    estado = 1
Me.btrecibir.Text = "PARAR"'cambia el texto del boton
Me.Timer1.Enabled = True'Activa la funcion Timer1
Catch ex As Exception
Me.SerialPort1.Close()
    estado = 1
    rbsen1.Checked = False
    rbsen2.Checked = False

Me.btrecibir.Text = "ACTIVA"
```

```

EndTry
        estado = 1
EndIf
EndSub

PrivateSub Timer1_Tick(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Timer1.Tick
Dim canti As Integer
Dim carac As String

Try
        'Lee el numero de Bytes de entrada
canti = Me.SerialPort1.BytesToRead()

        If i > (canti - 1) Then
                i = 0
EndIf

If canti > 0 Then
If rbcaracterin.Checked = TrueThen
        carac = Me.SerialPort1.ReadChar()
        carac = ChrW(carac)
        vector(i) = carac
        i += 1

If (vector(7) = 2 Or vector(30) = 2) And
        rbsen2.Checked = TrueThen

For i As Integer = 0 To 22
Me.txrecibir.AppendText(vector(i))
Next

Else
If (vector(7) = 1 Or vector(30) = 1) And
        rbsen1.Checked = TrueThen
For i As Integer = 23 To 45
Me.txrecibir.AppendText(vector(i))
Next
Else
Me.txrecibir.AppendText(carac)
EndIf

EndIf

EndIf

        estado = 0
        linea = 1
Me.SerialPort1.ReadTimeout() = 50
Else
'vbCrLf
If linea = 1 Then
        estado = estado + 1
EndIf

If estado > 3 Then
        estado = 0
        linea = 0
Me.txrecibir.AppendText(vbCrLf)
EndIf

```

```
EndIf
Catch ex As Exception
EndTry
EndSub

PrivateSub cbbaud_SelectedIndexChanged(ByVal sender As System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles cbbaud.SelectedIndexChanged
Dim k As Integer
    k = Me.cbbaud.Text
Me.SerialPort1.BaudRate() = k
EndSub

PrivateSub btborrar_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btborrar.Click
Me.txrecibir.Text = ""
EndSub

EndClass
```

**ANEXO 6. -PROPAGACIÓN DE ENLACES PARA MEDICIÓN DE
CO2 EN LA CIUDAD DE AMBATO**