



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

MONITOREO DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL UTILIZANDO REDES
DE SENSORES INALÁMBRICAS

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingenieros en Electrónica y Redes de Información

Profesor Guía

MSc. Juan Manuel Lema Sevillano

Autores

Jorge Patricio Soasti de la Cruz

Andrés Ovidio Robles Sierra

Año

2016

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con los estudiantes, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Juan Manuel Lema Sevillano
MSc. Electrónica y Telecomunicaciones
CI: 1712998622

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Jorge Patricio Soasti De La Cruz
CI:1720096542

Andrés Ovidio Robles Sierra
CI:1716816697

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación se realizó gracias a la colaboración del Sr. Santiago Solórzano y el Ing. Juan Lema, a quienes nos gustaría expresar nuestro agradecimiento, por hacer posible el estudio de nuestro proyecto. Un agradecimiento especial a nuestros padres, al apoyo brindado durante todos estos años de estudio, nos ha permitido madurar y cumplir poco a poco los objetivos planeados.

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de investigación en primera instancia a Dios, como la inspiración fundamental para cumplir cada uno de nuestros objetivos. Al apoyo diario de nuestros padres. A la familia, a los amigos, a los profesores con los que compartimos experiencias enriquecedoras. Para todos ellos la dedicatoria de este trabajo de investigación.

RESUMEN

La tecnología Inalámbrica de Sensores (WSN, *Wireless Sensor Network*) se ha ido desarrollando a lo largo de los años, convirtiéndose en una herramienta muy valiosa al momento de obtener y procesar información sobre el entorno en el que vivimos. Una de sus importantes contribuciones beneficia al medio ambiente por medio del monitoreo y control de la contaminación. Este trabajo describe el análisis, diseño e implementación de una red WSN capaz de monitorear, por medio de nodos sensores, las emisiones de CO₂ producidas principalmente por el parque vehicular en la ciudad de Quito, afectando directamente a la salud en lugares de concentración masiva de personas.

El manejo de la información se lo realiza a través de una estación base encargada de recibir los datos obtenidos por los nodos conectados a la red WSN; la misma que será almacenada en una base de datos.

De igual manera se realiza un estudio de las características de WSN; entre ellas tenemos: topologías, protocolos de enrutamiento, dispositivos existentes en el mercado, precios, rendimiento, consumo de energía, factores de calidad para la implementación. Además, se realizan pruebas de funcionamiento de la red, con el fin de lograr una obtención precisa de datos de medición.

Se analiza el reglamento vigente ambiental de contaminación existente actualmente en la ciudad de Quito. De igual manera, los índices de contaminación: mínimos, tolerables y de riesgo para la salud de las personas. Se investiga el método existente para la obtención de reportes de calidad del aire y los principales contaminantes existentes; teniendo en cuenta como contaminante principal de estudio el CO₂ existente en diferentes sectores de la ciudad.

Para la visualización e interpretación de los datos, se construye una aplicación con una interfaz amigable para el usuario capaz de generar un reporte de emisiones de CO₂, durante un periodo de tiempo establecido previamente.

ABSTRACT

Wireless technology Sensors (WSN, Wireless Sensor Network) has been developed over the years, becoming a valuable tool when obtaining and processing information about the environment in which we live. One of his major contributions benefiting the environment by monitoring and pollution control. This paper describes the analysis, design and implementation of a WSN network capable of monitoring, by sensor nodes, CO₂ emissions mainly produced by the vehicle fleet in the Quito city, directly affecting health in places of mass concentration of people.

The management of information is done through a base station receiving charge data obtained by WSN nodes connected to the network; the same that will be stored in a database.

Similarly, a study of the characteristics of WSN is performed; among them we are: topologies, routing protocols, existing devices on the market, price, performance, power consumption, quality factors for implementation. Also, performance tests are performed on the network, in order to achieve accurate obtainment of measurement data.

Environmental regulations of existing pollution is analyzed in the city of Quito. Similarly, the pollution: minimal, tolerable risk to the health of people. The existing method for obtaining air quality reports and contaminants main existing under investigation; taking into account as the main contaminant study the existing CO₂ in different parts of the city.

For visualization and interpretation of data, an application is built with a friendly user interface capable of generating report CO₂ emissions over a period of time previously established.

ÍNDICE

Introducción.....	1
1. Capítulo I Redes Inalámbricas y Redes WSN..	3
1.1 <i>Redes Inalámbricas</i> ..	3
1.1.1 Clasificación de las Redes Inalámbricas.....	3
1.1.1.1 WPAN (Wireless Personal Area Network).....	4
1.1.1.2 WLAN (Wireless Local Area Network).....	7
1.1.1.3 WMAN (Wireless Metropolitan Area Network).....	8
1.1.1.4 WWAN (Wireless Wide Area Network).....	8
1.1.2 Arquitectura de las Redes Inalámbricas.	9
1.1.2.1 Redes Inalámbricas Centralizadas	9
1.1.2.2 Redes Inalámbricas Distribuidas	10
1.1.3 Control de Acceso al Medio	10
1.1.3.1 Propiedades de los Medios Inalámbricos	10
1.1.3.1.1 Canal Variante en el Tiempo	10
1.1.3.1.2 Errores de Ráfaga	11
1.1.3.1.3 Detección de Portadora	11
1.1.3.2 Clasificación de Protocolos MAC.....	12
1.1.3.2.1 Protocolos MAC Centralizados.....	13
1.2 <i>Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)</i>	14
1.2.1 Introducción a WSN.....	14
1.2.2 Características de WSN	15
1.2.3 Arquitectura de una Red WSN	17
1.2.3.1 Elementos de una Red WSN.....	17
1.2.3.1.1 Nodos Sensores o de Medida.....	18
1.2.3.1.2 Puerta de Enlace.....	19
1.2.3.1.3 Estación Base	19
1.2.3.2 Arquitectura de un Nodo Sensor	20
1.2.4 Topologías de las Redes WSN.....	21
1.2.4.1 Punto a Punto.....	21

1.2.4.2 Estrella.....	22
1.2.4.3 Malla	22
1.2.4.4 Árbol.....	25
1.2.5 El Estándar IEEE 802.15.4	25
1.2.5.1 Características de IEEE 802.15.4	25
1.2.5.2 Modulación en IEEE 802.15.4.....	26
1.2.5.3 Acceso al Medio en IEEE 802.15.4	28
1.2.5.4 Potencia de Transmisión y Sensibilidad de Recepción en IEEE 802.15.4	28
1.2.6 ZigBee	29
1.2.6.1 Redes ZigBee.....	29
1.2.6.2 Seguridad en ZigBee	31
1.2.6.2.1 Claves de Red Y Claves de Enlace.....	32
1.2.6.3 Enrutamiento en ZigBee	33
1.2.6.3.1 Red Mallada Ad hoc On- Demand Distance Vector (AODV)	34
1.2.6.3.2 Enrutamiento de Varios a Uno (Many-to-One)	35
1.2.6.3.3 Enrutamiento de Origen (Source Routing)	36
1.2.6.4 Direccionamiento en ZigBee.....	37
1.2.6.5 Aplicaciones de WSN con ZigBee.....	39
1.2.7 Equipamiento para una Red WSN	40
1.2.7.1 Microcontrolador (Arduino)	40
1.2.7.2 Escudos (Shields)	42
1.2.7.3 Módulos Transceptores XBee	43
1.2.7.3.1 Tipos de Módulos Transceptores XBee	43
1.2.7.3.2 Modos de Operación de Módulos Transceptores XBee	46
1.2.7.3.3 Modo XBee API.....	47
1.2.7.4 Adaptador USB de XBee (XBee Explorer).....	50
1.2.7.5 Software X-CTU	51
1.2.7.6 Sensores para Redes WSN	52
1.2.7.6.1 Sensor de CO ₂	53
1.2.7.6.2 Características del Sensor de CO ₂ MG- 811	53

1.2.7.6.2 Especificaciones del Sensor de CO ₂ MG- 811	54
1.2.8 Consumo de Energía en las Redes WSN	55
1.2.8.1 Suministro de Energía.....	56
1.2.8.2 Turnigy (Batería Lipo).....	56
1.2.8.3 Panel Solar	57

2. Capítulo II. Los Espacios Públicos y la Contaminación

Ambiental.....	60
----------------	----

<i>2.1 Lugares de Concentración Masiva de Personas en la Ciudad de Quito y Exposición a Contaminación.....</i>	<i>61</i>
--	-----------

<i>2.2 Contaminación Ambiental.....</i>	<i>66</i>
---	-----------

2.2.1 Tipos de Contaminación Ambiental	67
--	----

2.2.2 Contaminación del Aire.....	68
-----------------------------------	----

2.2.2.1 Contaminantes Comunes en el Aire.....	68
---	----

2.2.2.2 Efectos de la Contaminación del Aire Sobre la Salud Humana...	69
---	----

2.2.2.3 Norma Vigente Sobre la Contaminación del Aire	70
---	----

2.2.2.4 El Dióxido de Carbono (CO ₂).....	71
---	----

2.2.2.4.1 Definición de CO ₂	72
---	----

2.2.2.4.2 Fuentes Generadoras de CO ₂	73
--	----

2.2.2.4.3 Efectos Ambientales de las emisiones de CO ₂	73
---	----

2.2.2.4.4 Efectos del CO ₂ Sobre la Salud Humana.....	74
--	----

2.2.2.4.5 Monitoreo de los Niveles de CO ₂ en Quito.....	75
---	----

3. Capítulo III. Diseño e Implementación de una Red

WSN para Monitoreo de Niveles de CO ₂	79
--	----

<i>3.1 Diseño de la Red WSN.</i>	<i>79</i>
---------------------------------------	-----------

<i>3.2 Diseño de la Aplicación para Gestión y Monitoreo de CO₂....</i>	<i>80</i>
---	-----------

3.2.1 Diseño de la Base de Datos	81
--	----

3.2.2 Interfaz Principal de la Aplicación	82
---	----

3.2.3 Interfaz de Gestión.....	82
--------------------------------	----

3.2.4 Interfaz de Monitoreo	83
3.2.5 Interfaz de Visualización de Datos	84
<i>3.3 Implementación de Red WSN y del Prototipo de Nodo</i>	
<i>Sensor</i>	85
3.3.1 Construcción de los Nodos Sensores.....	85
3.3.2 Configuración de los Nodos Sensores	87
3.3.2.1 Nodos Finales	88
3.3.2.2 Nodo Router.....	89
3.3.2.3 Nodo Coordinador (Gateway).....	90
3.3.3 Ubicación de Nodos y Establecimiento de la Red WSN.....	90
3.3.4 Toma de Mediciones y Datos Finales.....	91
<i>3.4 Presupuesto del prototipo ...</i>	96
4. Capítulo IV.- Análisis de Resultados	97
<i>4.1 Recolección de Datos a través de Nodos Sensores</i> <i>(Prueba 1)</i>	97
<i>4.2 Recolección de Datos a través de Nodos Sensores</i> <i>(Prueba 2)</i>	99
<i>4.3 Recolección de Datos a través de Nodos Sensores</i> <i>(Prueba 3) en lugar libre de emisiones de CO₂</i>	100
Conclusiones	102
Recomendaciones	104
Referencias.	105
ANEXOS	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las Redes Inalámbricas	4
Figura 2. Comunicación entre Nodos ZigBee.....	6
Figura 3. Red Inalámbrica Centralizada	9
Figura 4. Red Inalámbrica Distribuida	10
Figura 5. Nodos Ocultos y Nodos Expuestos	11
Figura 6. Captura	12
Figura 7. Red Inalámbrica de Sensores (WSN)	15
Figura 8. Nodos Críticos en WSN	16
Figura 9. Estructura General de una WSN.....	17
Figura 10. Red Básica de Sensores Inalámbricos con Nodos	20
Figura 11. Arquitectura de un Nodo Sensor	20
Figura 12. Topología en Par.....	21
Figura 13. Topología en Estrella	22
Figura 14. Topología en Malla.....	22
Figura 15. Configuración en Malla #1.....	23
Figura 16. Configuración en Malla #2.....	24
Figura 17. Red Extendida.....	24
Figura 18. Topología en Árbol.....	25
Figura 19. 802.15.4 y ZigBee en el Modelo de Capas OSI	26
Figura 20. Modulación DSSS en 802.15.4	27
Figura 21. Canalización de la Banda de 2,4 GHz.....	27
Figura 22. Red ZigBee	30
Figura 23. Red en Malla	31
Figura 24. Intrusión de Radio	32
Figura 25. Distribución de la Clave de Red	33
Figura 26. Transmisión de la Petición de Ruta (Broadcast).	35
Figura 27. Direccionamiento en una red ZigBee	38
Figura 28. Aplicaciones de WSN.....	39
Figura 29. Arduino Uno	42
Figura 30. XBee Shield (Saint Smart).	42
Figura 31. XBee Series 2	44

Figura 32. Versiones Regular y PRO de XBee.....	45
Figura 33. Tipos de Conectores USB para XBee	50
Figura 34. Uso de X-CTU para Configuración de Módulos XBee.....	51
Figura 35. Ventana de Configuración del Xbee	52
Figura 36. Sensor de CO2 MG-811.....	53
Figura 37. Conexión del Sensor CO2 MG-811	54
Figura 38. Estados de un Nodo Sensor	55
Figura 39. Turnigy 700mAh 3S 30C Lipo Pack (XT30)	57
Figura 40. Panel Solar.....	58
Figura 41. Ubicación de la Plaza Foch.....	62
Figura 42. Plaza Foch	62
Figura 43. Bulevar Naciones Unidas	63
Figura 44. Ubicación Bulevar Naciones Unidas	64
Figura 45. Ubicación Parque de la Floresta	64
Figura 46. Distribución de Lugares de Entretenimiento.....	66
Figura 47. Composición Química	72
Figura 48. Medición de Máximo Contaminante en el Aire en una Fecha Específica.....	75
Figura 49. Niveles Utilizados para Definir Mediciones por Estaciones.....	76
Figura 50. Concentración de CO en un Período	77
Figura 51. Diseño de WSN para Monitoreo de CO2	80
Figura 52. Diagrama de la Base de Datos	81
Figura 53. Interfaz Principal.....	82
Figura 54. Interfaz de Gestión	83
Figura 55. Interfaz de Monitoreo	84
Figura 56. Interfaz de Visualización de Datos	85
Figura 57. Diseño 3D Protección de Nodos	86
Figura 58. Distribución de los Elementos del Nodo.....	86
Figura 59. Prototipo del Nodo Final y Router	87
Figura 60. Configuración del Nodo Final (Networking).....	88
Figura 61. Configuración del Nodo Final (Addressing).....	88
Figura 62. Configuración del Nodo Router (Networking)	89

Figura 63. Configuración del Nodo Router (Addressing).....	89
Figura 64. Configuración del Nodo Coordinador	90
Figura 65. Distribución de Nodos en el Sector	91
Figura 66. Ubicación del Nodo Gateway	92
Figura 67. Ubicación del Nodo Router	93
Figura 68. Ubicación del Nodo Final	93
Figura 69. Aplicación Web	94
Figura 70. Presentación de Datos en el Smartphone.....	95
Figura 71. Valores de Concentración CO2 vs Periodo de Tiempo (Nodo1)	97
Figura 72. Valores de Concentración CO2 vs Periodo de Tiempo (Nodo2)	98
Figura 73. Valores de Concentración CO2 vs Periodo de Tiempo (Nodo1)	99
Figura 74. Valores de Concentración CO2 vs Periodo de Tiempo (Nodo2) ...	100
Figura 75. Valores Normales Nodo 1	101
Figura 76. Valores Normales Nodo2	101
Figura 77. Arduino Mega 2560	110
Figura 78. Arduino Mega ADK Rev3	111
Figura 79. Arduino Uno	112
Figura 80. Placas Arduino	113
Figura 81. Tipos de Antenas de Módulos XBee	115
Figura 82. Datasheet MG-811	116

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clases de Dispositivos Bluetooth	5
Tabla 2. Comparativo de ZigBee con otras Tecnologías.....	6
Tabla 3. Características de IEEE 802.15.4	26
Tabla 4. Comparación entre Métodos de Enrutamiento	37
Tabla 5. Comparación Precios de Elementos de WSN	40
Tabla 6. Descripción de los Pines del XBee Series 2	44
Tabla 7. Comparación de XBee Regulares Series 1 y Series 2.....	46
Tabla 8. Estructura de una Trama API	48
Tabla 9. Tipos de Tramas API.....	50
Tabla 10. Relación de Configuración entre el Panel Solar y la Batería de Almacenamiento	58
Tabla 11. Contaminantes más Comunes Presentes en el Aire	68
Tabla 12. Límites de Emisiones Máximos Permitidos para Fuentes Móviles con Motor a Gasolina.....	70
Tabla 13. Efectos Sobre la Salud a Diferentes Escalas de Emisiones de CO2	74
Tabla 14. Límites Numéricos, Niveles de Contaminación del Aire (ug/m3).....	77
Tabla 15. Características de los Módulos XBee	87
Tabla 16. Registros en la Base de Datos	92
Tabla 17. Presupuesto para el Prototipo de WSN	96
Tabla 18. Valores Mayores a los 400ppm Registrados por los (Nodos 1y 2)	98
Tabla 19. Valores Mayores a los 400ppm Registrados por los (Nodos 1y 2)	100
Tabla 20. Valores Obtenidos sin Contaminación en (ppm).....	101
Tabla 21. Especificaciones Técnicas de Arduino Mega 2560	110
Tabla 22. Especificaciones Técnicas de Arduino Mega ADK Rev 3.	111
Tabla 23. Especificaciones Técnicas de Arduino Uno	112

Introducción

El uso de las redes de datos se ha convertido en parte de la vida cotidiana de las personas; por ejemplo, al momento de realizar una transacción bancaria, al utilizar las telecomunicaciones para comunicarse con otras personas, al ser monitoreados por cámaras de seguridad desplegadas en toda la ciudad.

Las redes de datos han ido evolucionando y brindando nuevas soluciones e innovaciones tecnológicas. Una derivación de estas redes son las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN, *Wireless Sensor Networks*), una tecnología moderna y que aún se sigue desarrollando.

En las WSN se emplean varios nodos sensores con la capacidad de comunicarse entre sí de manera inalámbrica; sin necesidad de poseer mayor infraestructura física. Este hecho ha traído varias ventajas al momento de monitorear y obtener información de entornos poco accesibles; además de una gran variedad de aplicaciones en diferentes campos como la medicina, agricultura, contaminación ambiental, aplicaciones militares, domótica, entre otros. Tomando en cuenta esta gran ventaja de las redes WSN y la problemática de contaminación vehicular actual existente en la ciudad de Quito, se desarrolla este trabajo, cuyo objetivo es monitorear las emisiones de CO₂ y por medio de un reporte, dar a conocer dichas mediciones.

La contaminación en la ciudad de Quito ha alcanzado elevados índices de emisiones de CO₂ al incrementar periódicamente el parque vehicular y el consumo de combustibles. El Ministerio y la Secretaría del Ambiente, a través de su página web, dan a conocer niveles de emisiones de gases contaminantes y calidad del aire existente en varios puntos de la ciudad. Esta forma de monitoreo que se realiza actualmente, permite determinar la existencia de contaminantes comunes en sectores estratégicos por la afluencia vehicular formando una Red Metropolitana Ambiental. Las estaciones situadas en diferentes puntos de la ciudad proporcionan un índice de calidad del aire de manera bastante general. El enfoque que se proporciona en el presente trabajo de titulación es complementar el monitoreo actual, a través de una red WSN que utiliza específicamente sensores de CO₂, permitiendo obtener mediciones

a niveles más cercanos, precisamente a los que se exponen las personas diariamente; haciéndolo viable para la implementación futura en distintos puntos de la ciudad.

Al ser una red inalámbrica no implica gastos extremadamente altos en términos de infraestructura. De igual forma, al ser inalámbrica puede ser movilizadada y adaptada en cualquier lugar.

En los siguientes capítulos se mencionará a detalle la funcionalidad de las redes inalámbricas de sensores, componentes y los dispositivos interconectados.

Por otra parte, se dará información acerca de determinados lugares de contaminación masiva de personas en la ciudad de Quito y el impacto de la contaminación ambiental sobre la salud de las personas. Esta identificación del problema permite ofrecer una solución alternativa para el control de la contaminación mediante el diseño e implementación de una red WSN capaz de recolectar datos de las emisiones de CO₂.

Finalmente se ofrecen Conclusiones, Recomendaciones y Anexos que se espera sirvan de soporte para quienes deseen desarrollar proyectos afines.

1. Capítulo I Redes Inalámbricas y Redes WSN

1.1 Redes Inalámbricas

La comunicación inalámbrica es aquella en que no se necesita cables para llevar información, y se puede transmitir datos por medio de ondas de radio, microondas o luz infrarroja; es decir, utiliza el espacio libre para transmitir los datos desde el emisor hacia el receptor y viceversa (Carballeiro, 2012, p. 14). Las redes cableadas seguirán siendo más veloces y más seguras, pero en algunas aplicaciones las redes inalámbricas son indispensables; sin embargo, ambas pueden trabajar de manera conjunta, obteniéndose mayor movilidad con las redes inalámbricas y mayor velocidad con las redes cableadas.

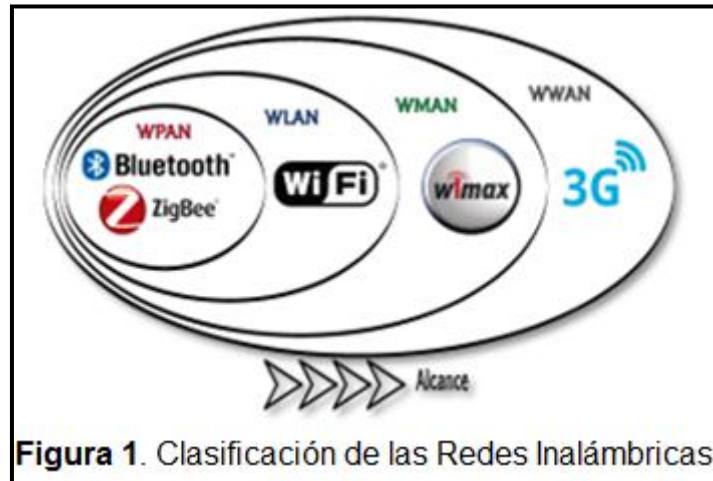
La principal ventaja de las redes inalámbricas es la movilidad. Por ejemplo, se puede dar acceso a Internet a cientos de estudiantes en un campus universitario, están desplazándose continuamente de un lugar a otro y sin pérdida de conectividad. Otra ventaja importante tiene que ver con el costo. En el mismo ejemplo, sería muy caro colocar puntos de red por todo el campus universitario para dar acceso a todos los estudiantes. Entre otras ventajas que se destacan están: el corto tiempo de implementación, la gran cobertura, el acceso desde zonas remotas, etc. Así mismo, las redes inalámbricas poseen desventajas, entre las que se encuentran: la interferencia, la atenuación, el ancho de banda, entre otras.

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) promueve estándares internacionales para las redes inalámbricas, en los cuales se definen las características para cada una de ellas.

1.1.1 Clasificación de las Redes Inalámbricas.

Las redes inalámbricas se pueden clasificar según la cobertura o el área en la que pueden establecer comunicación, específicamente se tiene: WPAN, WLAN, WMAN y WWAN (Carballeiro, 2012, p. 19).

En la Figura 1 se muestra esta clasificación de las redes inalámbricas, junto a una comparación en cuanto a cobertura y las principales tecnologías que hacen referencia a cada una de ellas.



A continuación, se describirá las principales características de las distintas Redes Inalámbricas.

1.1.1.1 WPAN (Wireless Personal Area Network).

Una Red inalámbrica de Área Personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*) es una red de corto alcance y baja velocidad, la cual comúnmente puede llegar a transmitir hasta decenas de metros. Este tipo de red se usa para conectar dispositivos finales como: asistente digital personal (PDA, *Personal Digital Assistant*), impresoras, teléfonos móviles, etc. Sin necesidad del uso de cables. Los estándares asociados a este tipo de redes son: IEEE 802.15.x, entre los que se encuentran las especificaciones de Bluetooth y ZigBee.

- **Bluetooth (802.15.1)**

Bluetooth es una tecnología orientada a redes de área personal. Una red considerada de corto alcance, por lo que está diseñada para la comunicación entre dispositivos personales como los mencionados en la sección 1.1.1.1 “WPAN (Wireless Personal Area Network)”. Los dispositivos Bluetooth no necesitan una línea de vista para comunicarse, dicha característica se encuentra especificada en el estándar IEEE

802.15.1. Su alcance de comunicación es de 1 hasta 100 metros según la clase I, II o III, como se puede observar en la Tabla 1. La banda que utiliza para dicha comunicación es 2,4GHz, una banda libre puede transmitir velocidades de aproximadamente 1 Mbps. (Kioskea, 2014).

Tabla 1. Clases de Dispositivos Bluetooth

Clase	Potencia (pérdida de señal)	Alcance
I	100 mW (20 dBm)	100 metros
II	2,5 mW (4 dBm)	15-20 metros
III	1 mW (0 dBm)	10 metros

Tomado de Kioskea (2014)

Existe una relación directa entre la potencia generada por los dispositivos Bluetooth y la distancia de conectividad entre ellos. Al existir mayor potencia se obtiene mayor alcance en metros.

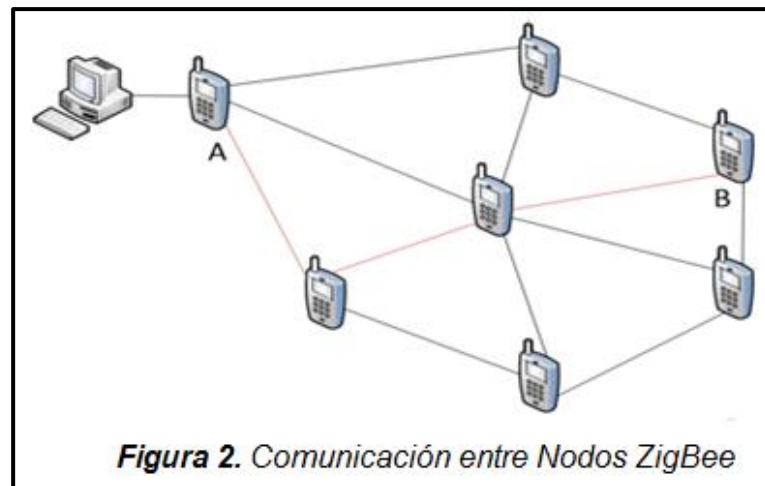
Al incrementar la potencia para obtener mayor alcance se corre el riesgo de pérdida de señal, variando entre 0 y 20 dBm dependiendo de la clase a la que pertenece el dispositivo Bluetooth.

- **ZigBee**

ZigBee es una especificación de un conjunto de protocolos, basada en el estándar 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal. ZigBee opera en la banda de 868 MHz en Europa, 915MHz en EEUU y Australia y 2,4 GHz a nivel mundial (Almansa, 2013, p. 13).

ZigBee está orientado al bajo consumo de energía, bajo coste, baja tasa de datos y simplicidad en hardware y software. Al ser de bajo consumo significa que los dispositivos pueden utilizar baterías, y éstas pueden lograr un tiempo de vida desde meses hasta años. Otras tecnologías tienen mayores tasas de transmisión como WiFi o Bluetooth a costa de un alto consumo de energía; en cambio ZigBee aprovecha la ventaja de tener menores tasas, economizando así dicho consumo. Esto ha sido muy atractivo para aplicaciones en donde se utilizan sensores

inalámbricos o domótica ya que funcionan perfectamente con tasas de transmisión bajas. Por esta característica y por su baja complejidad los dispositivos enfocados en esta tecnología son de bajo coste. Otra de las principales características de la tecnología ZigBee, es su capacidad de crear redes Ad-Hoc, en la que varios dispositivos pueden comunicarse entre sí, sin necesidad de un punto de acceso.



Como se muestra en la Figura 2, el nodo A debe comunicarse con el nodo B, pero la distancia es demasiado grande como para establecer una comunicación directa; por lo tanto, un determinado paquete buscará el camino adecuado hasta llegar a su destino. ZigBee tiene la capacidad de formar nuevos caminos en caso de fallos; es decir, la red puede recuperarse sin necesidad de la interacción del usuario. ZigBee va formando la red con el uso de Acuse de Recibo (ACK, *Acknowledgement*) y enrutamiento de mensajes. Los dispositivos que involucra ZigBee pueden ser: dispositivos finales, routers y coordinadores.

Tabla 2. Comparativo de ZigBee con otras Tecnologías

	WLAN (802.11)	Bluetooth-based WPAN (802.15.1)	Low-Rate WPAN (802.15.4) ZigBee
Rango	~ 100m	~ 10 - 100 m	~ 10 m
Tasa de Datos	~ 2 - 11 Mbs	~ 1 Mbs	~ 0.25 Mbs
Consumo de Potencia	Medio	Bajo	Muy Bajo
Tamaño	Grande	Pequeño	Muy Pequeño
Coste/Complejidad	Alto	Bajo	Muy Bajo

Tomado de IDEA (2008, p.24)

En la Tabla 2 se observa las características principales de ZigBee en comparación a las de otras tecnologías como Bluetooth y WiFi, destacando su bajo consumo de potencia y bajo coste de implementación, a costa de una baja tasa de transmisión de datos. En la actualidad, ZigBee puede alcanzar mayores rangos de distancia, puede cubrir hasta kilómetros con dispositivos de mayor potencia.

1.1.1.2 WLAN (*Wireless Local Area Network*).

Las Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN, *Wireless Local Area Network*) son muy utilizadas en la actualidad para reemplazar a las redes de área local cableadas o trabajar en conjunto con ellas. El estándar asociado a este tipo de redes es IEEE 802.11, también conocido como WiFi. Muchas reformas se han ido desarrollando desde la original IEEE 802.11; entre las principales están: 802.11b, 802.11a, 802.11g y 802.11n. Carballeiro (2012, p.34-36) explica los estándares WLAN como se expone a continuación.

- **802.11b.-** Opera en la banda de 2,4 GHz. Se mejora la tasa de transmisión hasta 11 Mbps. Soporta hasta 32 usuarios por punto de acceso (AP, Access Point).
- **802.11a.-** Opera en la banda de 5 GHz. Permite una tasa de transmisión de 54 Mbps. No es compatible con 802.11b, debido a que trabaja en diferente frecuencia.
- **802.11g.-** Opera en la banda de 2,4 GHz al igual que 802.11b, lo que permite compatibilidad entre ambos. Tiene una tasa de transmisión de 54Mbps.
- **802.11n.-** Trabaja en las frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz. A diferencia de estándares anteriores, este hace uso de varias antenas de transmisión y recepción. Aprovecha la multitrayectoria para aumentar la tasa de transferencia de datos.

1.1.1.3 WMAN (Wireless Metropolitan Area Network).

Una Red Inalámbrica de Área Metropolitana (WMAN, *Wireless Metropolitan Area Network*) cubre áreas extensas y es de alta velocidad; además abarcan un área física mayor a las redes WLAN, pero menor a las Redes Inalámbricas de Área Extensa (WWAN, *Wireless Wide Area Network*). La tecnología asociada es Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WIMAX, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) en el estándar IEEE 802.16.

Esta tecnología supera las limitaciones de 802.11 como es el alcance de la comunicación. Esta tecnología ofrece velocidades de hasta 154 Mbps similares a las de la Línea de Abonado Digital Asimétrica (ADSL, *Asymmetric Digital Subscriber Line*) y alcanza distancias de hasta 50 Km. Su forma de comunicación es muy similar a la de 802.11; la diferencia es que WiFi está orientado a reemplazar el cableado de un área como una oficina, en cambio WIMAX está orientada a trabajar como red acceso (IDEA, 2008, p. 21).

1.1.1.4 WWAN (Wireless Wide Area Network).

Las Redes Inalámbricas de Área Extensa (WWAN, *Wireless Wide Area Network*) son redes dedicadas a la telefonía celular y transmisión de datos. Las tecnologías más asociadas son: 2G (GSM), 3G (UMTS) y 4G (LTE).

La tecnología de tercera generación (3G) de la telefonía móvil, está basada en la convergencia de voz y datos. La tecnología 3G logra velocidades desde 384 Kbps en gran movimiento y 2 Mbps en estado estático. Los servicios que soporta esta tecnología permiten realizar llamadas de voz, video llamadas y transmisión de datos (correo electrónico, navegación web, mensajería instantánea, descarga de contenido multimedia, etc.) (IDEA, 2008, p. 20).

Actualmente, la tecnología 3G no cubre todas las necesidades y exigencias de los usuarios. Para correr las nuevas aplicaciones que demandan gran ancho de banda nace 4G LTE, con tasas mucho mayores y más eficiencia en la comunicación de datos. Teóricamente 4G alcanza velocidades de 100Mbps en movimiento y 1 Gbps en estado estático.

Esta tecnología se basa en la conmutación de paquetes a diferencia de tecnologías anteriores que usan conmutación de circuitos (Marcellini, Martínez y Quiroz, 2013, p. 5).

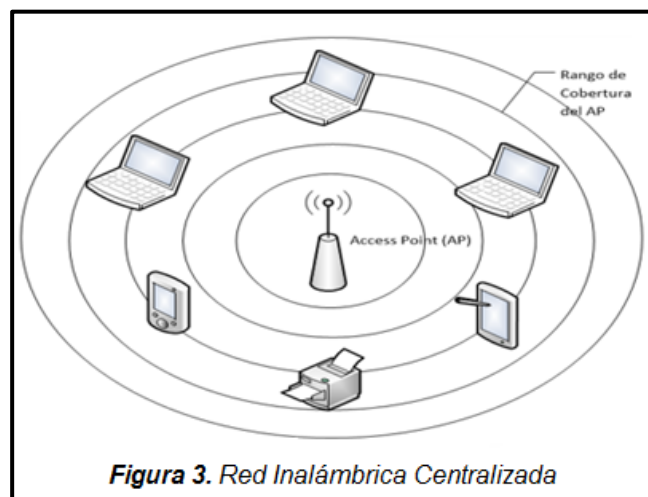
1.1.2 Arquitectura de las Redes Inalámbricas.

La arquitectura de las redes inalámbricas se puede clasificar en dos tipos: redes inalámbricas centralizadas y redes inalámbricas distribuidas (Kioskea, 2014).

1.1.2.1 Redes Inalámbricas Centralizadas

Las Redes Inalámbricas Centralizadas (*Centralized Wireless Networks*), utilizan un dispositivo central o Punto de Acceso (AP, *Access Point*) para la comunicación entre los diferentes dispositivos que forman parte de la red (Kioskea, 2014); de la misma forma, este nodo central o punto de acceso puede encaminar la información hacia la red cableada o hacia otras redes. Para establecer la comunicación es necesario que los dispositivos estén en el rango de cobertura del AP.

En la Figura 3 se observa una red inalámbrica centralizada, en la que todos los dispositivos están en el rango de cobertura del punto central de la red AP. Un host puede enviar la información hacia el punto central para que éste pueda transmitir dicha información a los otros miembros de la red o a otras redes.



1.1.2.2 Redes Inalámbricas Distribuidas

En las Redes Inalámbricas Distribuidas (*Distributed Wireless Networks*) los dispositivos que forman parte de la red deben estar dentro de su radio de cobertura como se observa en la Figura 4. La comunicación se realiza directamente entre los equipos, es decir, no necesitan de un dispositivo central para poder comunicarse. Este tipo de Redes son conocidas también como ad-hoc (Kioskea, 2014). Las redes inalámbricas de sensores (WSN) están asociadas a este tipo de redes.

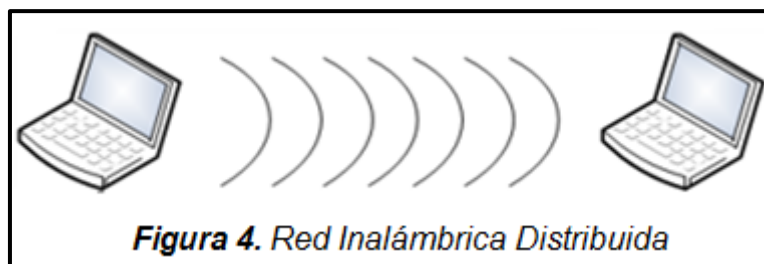


Figura 4. Red Inalámbrica Distribuida

1.1.3 Control de Acceso al Medio

El Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*), define las reglas para que los dispositivos sepan cómo y cuándo pueden utilizar el medio de transmisión inalámbrico. Si no existieran protocolos de control de acceso al medio, se presentarían conflictos todo el tiempo, ya que no habría un acuerdo entre los dispositivos que forman parte de la red.

Para comprender la forma en que trabajan los protocolos de control de acceso al medio, es necesario conocer las propiedades que los medios inalámbricos poseen, ya que, al tratarse de un medio no guiado, a diferencia de un medio guiado, se presentan varios inconvenientes que deben ser superados.

1.1.3.1 Propiedades de los Medios Inalámbricos

1.1.3.1.1 Canal Variante en el Tiempo

Las propiedades de la propagación de la señal como dispersión, reflexión y difracción provocan que la señal llegue con retardos y atenuaciones. Por estas propiedades, es posible que la señal pierda potencia produciendo un

desvanecimiento de la misma. De este modo, los dispositivos inalámbricos realizan una comunicación previa con mensajes cortos para evaluar la calidad del enlace entre los nodos y luego empiezan con el intercambio de información.

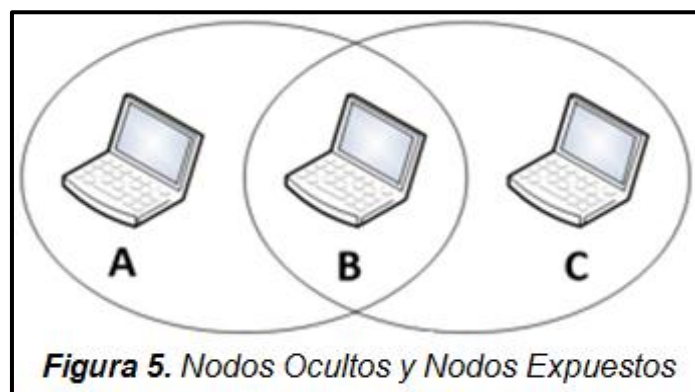
1.1.3.1.2 Errores de Ráfaga

Al momento de la comunicación, los sistemas inalámbricos presentan mayores errores que los sistemas que utilizan cables, debido a las pérdidas de potencia y factores antes analizados. En los medios de transmisión llamados “No guiados” o inalámbricos la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) es más alta que en los medios de transmisión considerados “guiados” o alámbricos.

Para resolver los problemas por la tasa de error de bit, los protocolos implementan mecanismos para solventar dichos errores; entre los que se puede mencionar: uso de paquetes más pequeños; Mecanismo de Corrección de Errores (FEC, *Forward Error Correction*) y retransmisión de paquetes; Acuse de Recibo (ACK, *Acknowledgement*).

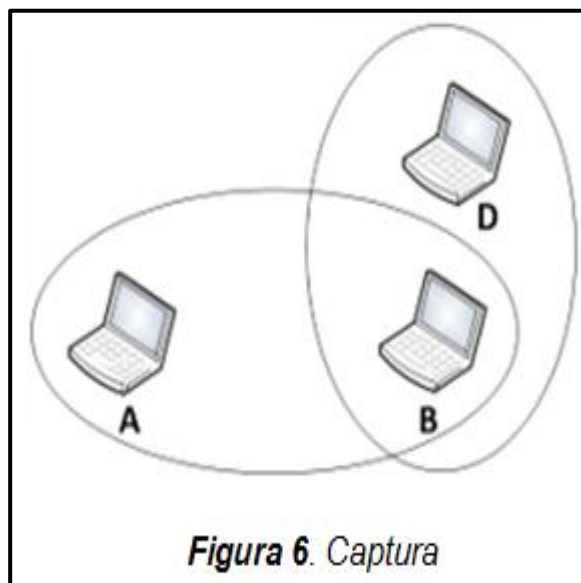
1.1.3.1.3 Detección de Portadora

En una Red Inalámbrica sólo los nodos que estén dentro del área de cobertura podrán comunicarse. La detección de la portadora por parte del nodo receptor depende de la posición de éste con respecto al nodo transmisor. En el medio no guiado, la potencia de la señal va decreciendo mientras va aumentando la distancia entre los nodos que establecen comunicación. En este ámbito, existen dos factores importantes que los protocolos MAC tienen en cuenta: nodos ocultos y nodos expuestos (Güimi, 2009).



En la Figura 5 los nodos A y C están dentro de áreas de cobertura distintas, y puede ser que ambos quieran transmitir información hacia el nodo B al mismo tiempo; si esto sucede, existirán colisiones que son muy difíciles de detectar ya que la comunicación generalmente es half-duplex, y el nodo B recibirá ruido. Este fenómeno se conoce como “nodos ocultos”.

En el caso que el nodo B transmita hacia el nodo A, el nodo C detectaría que el canal está ocupado por otra comunicación. El nodo C no transmite a ningún otro nodo porque piensa que el canal está ocupado, aunque no interfiera la comunicación; entonces el nodo C es un “nodo expuesto”.



En la Figura 6 se muestra el fenómeno de captura que ocurre cuando el nodo B recibe la señal proveniente de D aún en presencia de la señal emitida de A hacia B. Al estar más alejado el nodo A, su señal tiene menos potencia que la señal emitida por D, lo que ocasiona que el canal sea monopolizado por el nodo D, dejando aislado al nodo A.

1.1.3.2 Clasificación de Protocolos MAC

La clasificación de los protocolos MAC se realiza según la arquitectura de la red y el control que se realice en la misma, los protocolos MAC se clasifican en dos grupos: protocolos MAC centralizados y protocolos MAC distribuidos.

1.1.3.2.1 Protocolos MAC Centralizados

Los protocolos MAC Centralizados cuentan con la presencia de una Estación Base en la red (BS, *Base Station*) como el eje central para el control de acceso.

Los protocolos MAC centralizados se dividen en tres grupos:

- **Protocolos de Acceso Aleatorio.** - Los nodos compiten por obtener el canal. Si sólo un nodo intenta transmitir, la operación se realizará fácilmente. Si varios nodos intentan transmitir a la vez, el problema se resuelve mediante el uso del Algoritmo de Resolución de Colisiones (CRA, *Contention Resolution Algorithm*); que permite disminuir tiempos de contención, logrando que el retardo en promedio del envío de paquetes sea disminuido y poder garantizar una mayor eficiencia para el sistema.
- **Protocolos de Acceso Garantizado.** - Los nodos acceden de manera ordenada. Un servidor establece el orden de los nodos y determina cuál es el siguiente nodo a transmitir. También se puede hacer uso de un token, donde el nodo que posea el token será el destinado a transmitir.
- **Protocolos de Acceso Híbrido.** - Utilizan las características de los dos tipos de protocolos mencionados anteriormente.

1.1.3.2.2 Protocolos MAC Distribuidos

La mayoría de estos protocolos se basan en la detección de portadora y Prevención de Colisiones (CA, *Collision Avoidance*). Por lo tanto, están encargados de resolver los problemas de nodos ocultos y expuestos.

Los protocolos de Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Prevención de Colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), utilizan dos mecanismos para prevenir colisiones:

- **Señalización Fuera de Banda (*Out-of-Band Signaling*).** - Los nodos pertenecientes a la red escuchan que se está realizando la transmisión de una señal y envían una señal fuera de banda que indica que el canal está ocupado.

- **Control de Establecimiento (*Control Handshaking*).** - Se envían señales entre transmisor y receptor, RTS (*Request to Send*) y CTS (*Clear to Send*), para establecer conexión entre ellos, de forma que otro nodo que quisiera transmitir perciba estas señales y sepa que el canal está ocupado y evite hacer uso del canal hasta que la comunicación concluya.

1.2 Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)

1.2.1 Introducción a WSN

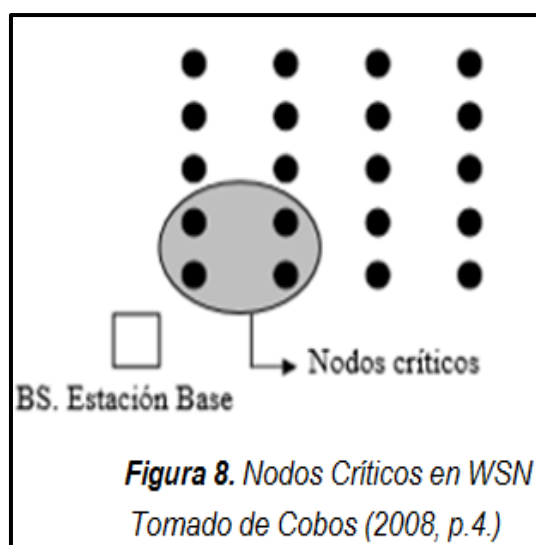
Las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN, *Wireless Sensor Networks*) están formadas por un conjunto de nodos capaces de obtener magnitudes físicas del medio como: temperatura, niveles de CO₂, movimiento, ruido, luz, etc. Las Redes WSN son redes distribuidas de tipo ad-hoc capaces de encaminar la información entre sus nodos hacia una estación base en donde se procesa dicha información. Los nodos sensores están limitados en recursos como memoria, capacidad de procesamiento y consumo de energía; sin embargo, la tecnología de las redes inalámbricas de sensores ha tenido una constante evolución que ha logrado que en la actualidad se pueda contar con dispositivos de alto rendimiento, bajo consumo de potencia, más económicos, más pequeños y redes capaces de agrupar un mayor número de nodos, llegando hasta millones de nodos capaces de procesar grandes cantidades de información. Entre otras características de las WSN están la capacidad de auto-organización, comunicación *broadcast* y encaminamiento *multihop*. En la Figura 7 se observa cómo se encamina la información hacia un punto de referencia en una red inalámbrica de sensores. Posteriormente dicha información pasará, mediante un nodo Gateway, a una estación base donde será procesada.

tiempo de vida de las baterías, además de un bajo coste para su implementación.

d) Auto-Configuración. - Los sensores tienen la capacidad de configurarse y reconfigurarse de forma automática frente a situaciones que se pueden presentar en su entorno. Por ejemplo, puede existir movimiento, eliminación y adición de sensores en la red. Los nodos sensores tienen la capacidad de responder ante estos eventos.

e) Medio de Transmisión Poco Fiable. – Como se mencionó en la sección 1.1.3.1 “Propiedades de los Medios Inalámbricos”, una red inalámbrica tiene una tasa de error mucho más alta que la de una red cableada y las WSN están dentro de este grupo de redes.

f) Rendimiento y Capacidad. - Todos los datos obtenidos por los sensores deben ser enviados a una estación base en donde se procesa la información. Debido a esta situación existe una región en donde los nodos más cercanos a la estación base deben transmitir la información de todos los nodos pertenecientes a la red, convirtiéndose en un área crítica o también llamada “nodos críticos de la red” donde la carga de tráfico en estos nodos es muy alta. En la Figura 8 se observan los nodos críticos de una red inalámbrica de sensores. Esta área juega un papel muy importante en la vida útil de la red, el retardo de paquetes y la escalabilidad (Cobos, 2008, p. 4).

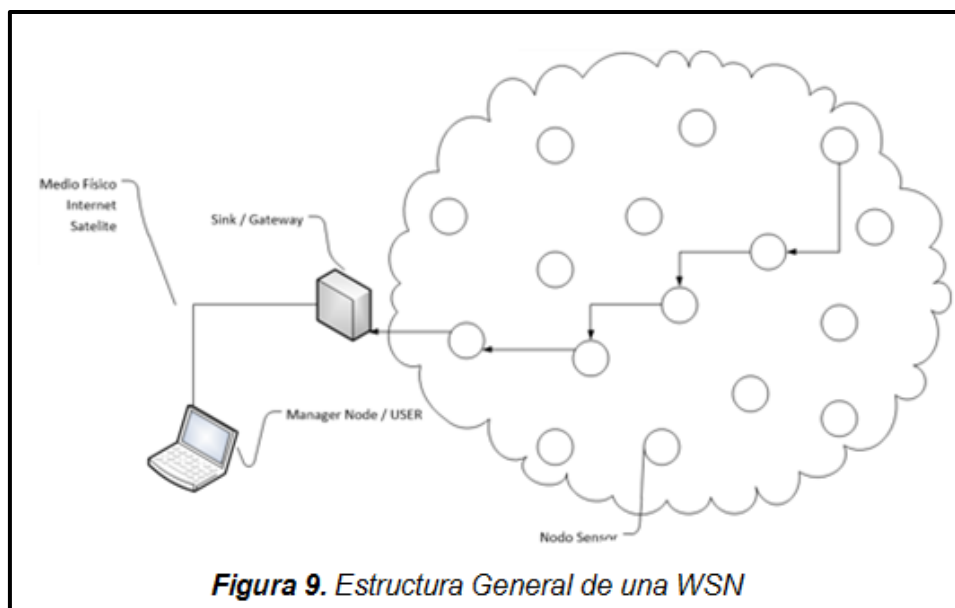


g) Enrutamiento. - El enrutamiento en las redes inalámbricas de sensores es de múltiple salto (*multihop*); es decir, la información viaja entre los nodos de la red hasta llegar a la estación base, dando lugar, como se mencionó antes, a un alto tráfico en los nodos sensores que se encuentra más cerca de la estación base. Esto se trata de un patrón de tráfico altamente no uniforme. Los algoritmos y protocolos de ruteo deben estar en la capacidad de organizar adecuadamente los retardos, de modo que los nodos más alejados tengan un mayor retardo. Por lo tanto los nodos más cercanos a la estación base no colapsan prematuramente por el alto procesamiento de información y alto tráfico provocado en esa área crítica (Cobos, 2008, p.5).

1.2.3 Arquitectura de una Red WSN

1.2.3.1 Elementos de una Red WSN

Como se observa en la Figura 9, la WSN está conformada por un conjunto de nodos sensores que forman una red distribuida ad-hoc, en donde cada uno de ellos está en la capacidad de tomar información del entorno y enrutarlo hacia otro nodo hasta llegar a un sumidero (*sink*) o Gateway. El Gateway será el encargado de enviar toda la información recolectada hasta el punto central de procesamiento Estación Base (*Manager Node*) a través de un medio físico, Internet o satélite.



Cabe resaltar que los Nodos Sensores son también conocidos como Nodos de Medida, que a su vez pueden actuar como Routers o Nodos Finales; estos nodos se comunican con un Gateway para formar una red típica de sensores inalámbricos (National Instruments, 2010).

1.2.3.1.1 Nodos Sensores o de Medida

Los nodos sensores están formados por una unidad de procesamiento pequeña y de bajo consumo de energía, una memoria pequeña con el fin de almacenar temporalmente los datos tomados, un módulo de comunicación encargado de la transmisión y recepción de datos y el sensor como tal (Blanco, 2012, p. 61). Los sensores son de distinta naturaleza y tienen la capacidad de obtener mediciones del entorno y convertirlos en señales eléctricas; es decir, detectan algún cambio físico y generan una señal eléctrica. En el mercado existe gran variedad de sensores capaces de medir muchos parámetros como: presión y humedad del aire, humedad de la tierra, temperatura, sonido, emisiones de CO₂, velocidad, etc.

Precisamente, en el presente proyecto se van a utilizar sensores de CO₂, los cuales se verán a detalle en la sección 1.2.7.6 “Sensores para Redes WSN”.

- **Nodo Final y Router**

Los nodos sensores pueden ser configurados como nodos finales o Routers. Los nodos finales están configurados para pasar la mayor parte del tiempo “dormidos” y sólo despiertan para tomar muestras y transmitir los datos hacia el siguiente nodo, todo esto con el objetivo de ahorrar la mayor cantidad de energía posible. Un nodo Router también tiene la capacidad de tomar muestras del entorno, pero a diferencia de un nodo final, está siempre despierto ya que todo el tiempo está recolectando datos de los nodos finales. Esto representa un mayor consumo de energía, por lo que los nodos Routers deben estar conectados a una fuente externa o hacer uso de paneles solares que les proporcione energía constantemente. La ventaja de esto es que permite ampliar la

distancia y fiabilidad de la red de sensores inalámbricos (National Instruments, 2010).

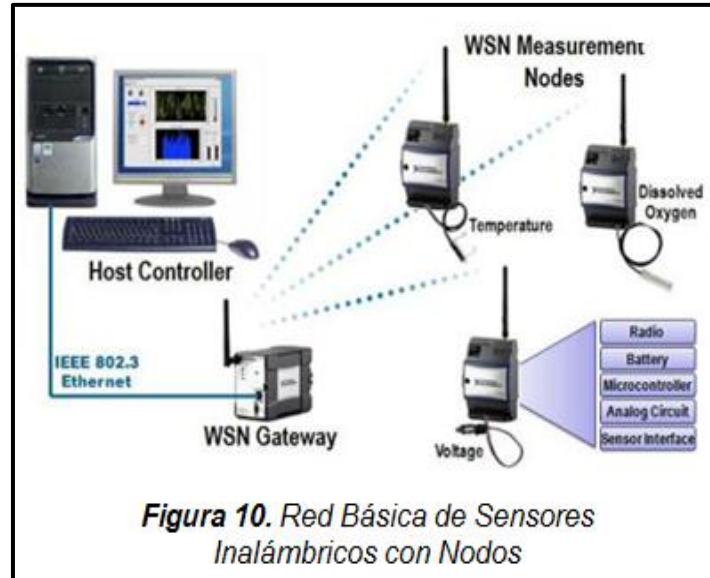
1.2.3.1.2 Puerta de Enlace

La Puerta de Enlace o Gateway es el puente entre la red de sensores inalámbricas y la red tradicional; en otras palabras, permite la interconexión entre la WSN y la red TCP/IP. La puerta de enlace es por donde pasaran todos los paquetes con la información tomada del medio en interés, y será la encargada de enviar esos datos a una estación central en donde dichos datos serán procesados como bien se desee.

1.2.3.1.3 Estación Base

La Estación Base es el recolector de los datos de todos los sensores utilizados en la red. La información no llega directamente a este punto; si no, es encaminada por los nodos de la red (enrutamiento *multihop*) con el fin de lograr un ahorro de energía en los nodos sensores. En la Figura 10 se observa cómo la estación base recoge los datos obtenidos por los nodos sensores mediante una puerta de enlace (Gateway).

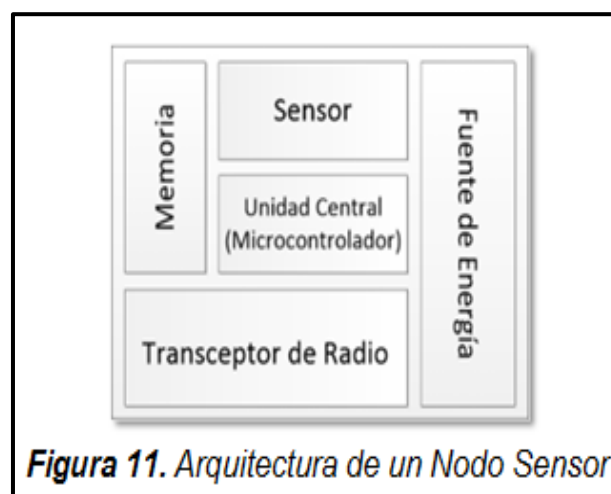
Dichos nodos son los encargados de recolectar la información del entorno al que pertenecen, cada uno de ellos recoge diferentes datos de acuerdo a su funcionalidad; una red de sensores inalámbricos puede tener: un nodo encargado de medir la temperatura en el ambiente, un nodo que verifique la cantidad de oxígeno disuelto en el aire y finalmente un nodo encargado de medir la cantidad de voltaje existente. Nodos encargados de obtener mediciones con características electrónicas internas similares para su funcionalidad y conectividad; poseen: un transceptor de radio encargado de transmisión y recepción de información, una batería que proporciona la energía necesaria, un microcontrolador encargado de procesar los datos recogidos y finalmente el sensor encargado de la toma de mediciones.



A continuación, se mencionará más a detalle las características de los componentes que conforman los nodos finales de la una red WSN.

1.2.3.2 Arquitectura de un Nodo Sensor

Como se explicó anteriormente, los nodos sensores están formados por un microcontrolador, una fuente de energía (batería, pilas, panel solar), un radio-transceptor y uno o varios sensores. Los nodos sensores se construyen teniendo en cuenta el consumo de energía; por ejemplo, tienen la capacidad de pasar mucho tiempo en modo dormido o *sleep* con el fin de proveer ahorro de energía. En la Figura 11 se observan los elementos que componen un nodo sensor de una red WSN, los cuales se describen a continuación.

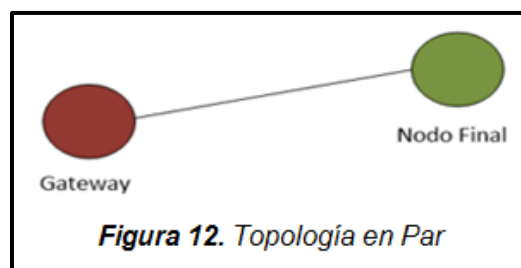


- **Microcontrolador.** - Este elemento es el encargado de procesar los datos recogidos por los sensores. El microcontrolador también es encargado de controlar el funcionamiento del nodo.
- **Memoria.** - La memoria es el elemento en donde se almacenan temporalmente los datos obtenidos. Es posible adaptar una memoria externa al nodo, dependiendo de la aplicación.
- **Sensor.** - Es el elemento capaz de generar una señal eléctrica ante algún cambio físico; por ejemplo, temperatura, humedad, emisiones de gases contaminantes, luz, etc.
- **Fuente de Energía.** - Es el elemento encargado de proporcionar energía al nodo para su funcionamiento, tanto cuando el nodo está “despierto” como cuando está “dormido”. Puede ser de distinta naturaleza como: baterías, pilas, fuente de alimentación directa y paneles solares.
- **Transceptor.** – Considerado el componente que más energía consume dentro del nodo. Es el encargado de las funciones de transmisión y recepción de datos del nodo de manera inalámbrica. Opera en las bandas libre de licencia (2.4 GHz) y cuenta con un ancho de banda de 250Kbps.

1.2.4 Topologías de las Redes WSN

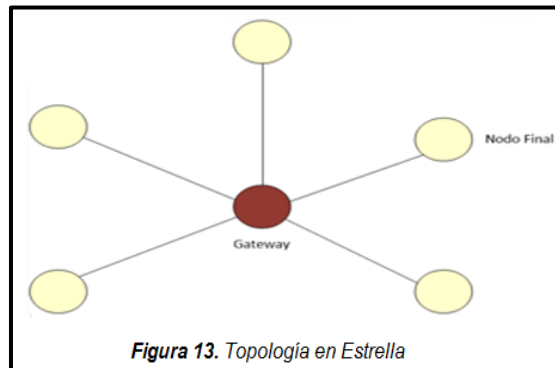
1.2.4.1 Punto a Punto

La topología punto a punto es la más sencilla de todas; está formada por dos nodos, como se observa en la Figura 12. Un nodo puede ser el Gateway y otro un nodo final.



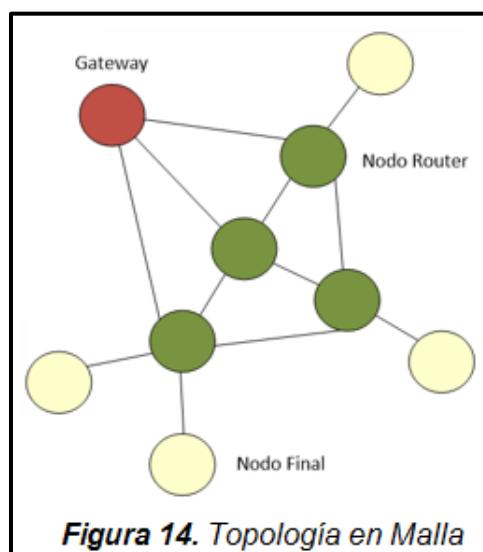
1.2.4.2 Estrella

En esta topología el Gateway es el nodo central y todos los nodos finales se comunican con el Gateway directamente, como se observa en la Figura 13. Los nodos finales no se pueden comunicar entre ellos; sino que todos los datos obtenidos por los sensores pasan al Gateway enseguida. A este tipo de configuración se la denomina “Sistema de un Solo Salto”.



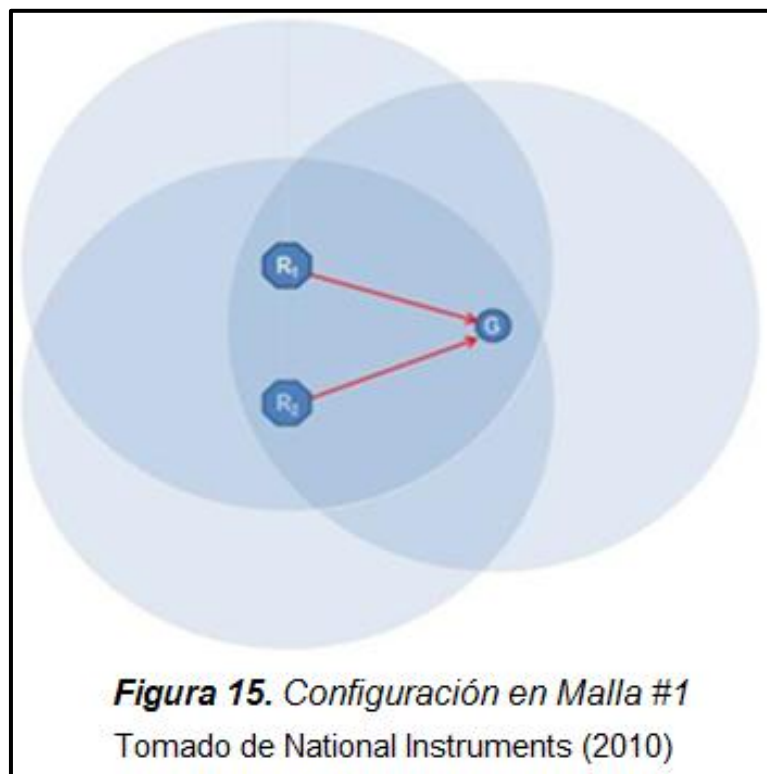
1.2.4.3 Malla

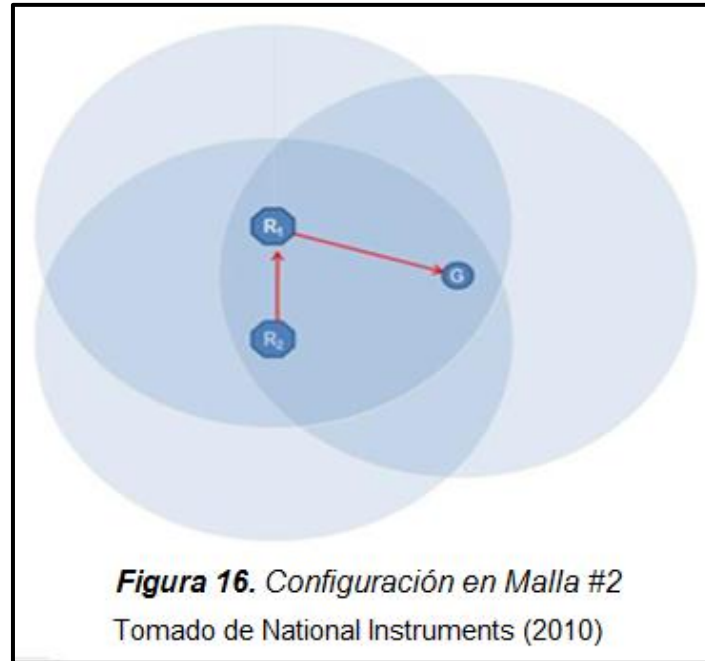
Esta topología no es jerárquica y proporciona redundancia a la red. Cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier otro otorgando varios caminos para la transmisión de los datos. El Core de esta red se conforma con nodos Routers. En la Figura 14 se observa como los nodos Routers proporcionan varios caminos, con el propósito de proporcionar redundancia a la red.



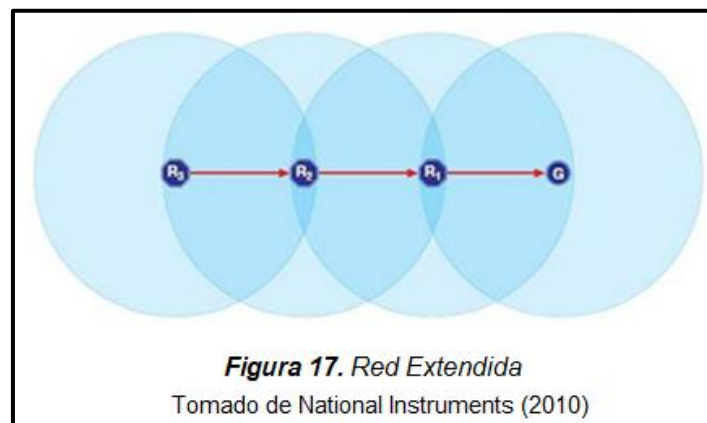
El Gateway y todos los nodos trabajan juntos para formar una red en malla. El Gateway contiene la lista de nodos (por el número de serie) que forman parte de la red inalámbrica de sensores. Cuando un nodo se enciende escanea las redes disponibles y localiza un Router o un Gateway. Si el Gateway contiene al nodo en su lista, éste se une a la red y comienza a tomar datos y a transmitirlos. Ya que los nodos se unen a una red y no a un Gateway en particular, se puede encontrar nuevos caminos hacia dicho Gateway; de esta forma, la red logra recuperarse ante algún fallo. Sin embargo, esto también logra una caída en el rendimiento de la red, ya que no hay manera de forzar a un nodo unirse a un dispositivo en particular. Cada vez que un nodo se une a través de un Router, el rendimiento del nodo se reduce a la mitad ya que debe realizar un salto para llegar al Gateway.

En las Figuras 15 y 16 se muestran las posibles configuraciones de una red en malla.



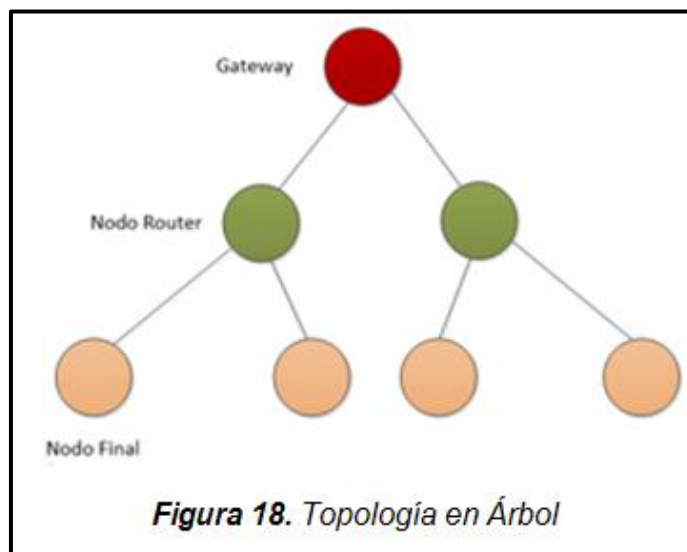


En la Figura 15, el nodo Router 1 (R1) y el nodo Router 2 (R2) se conectan directamente con el Gateway. Los datos tomados por ambos dispositivos pueden enviarse directamente al Gateway sin realizar un salto a través de otro nodo. Por otra parte, en la Figura 16, el nodo Router 1 (R1) se conecta directamente con el Gateway; mientras que el nodo Router 2 (R2) está conectado a través de R1. De este modo R1 es responsable de enviar sus datos y los de R2 al Gateway. Esta configuración no es tan eficiente; sin embargo, logra mayor alcance. Por ejemplo, en la Figura 17 se observa un arreglo con tres nodos Routers para lograr mayor alcance de la red.



1.2.4.4 Árbol

En esta topología los nodos se colocan en forma de árbol. Este arreglo posee un nodo de enlace troncal, desde el que se ramifican los demás nodos. En la Figura 18 se observa cómo se forma una topología en árbol en donde el nodo troncal es el Gateway, donde llegará toda la información recolectada por los otros nodos.



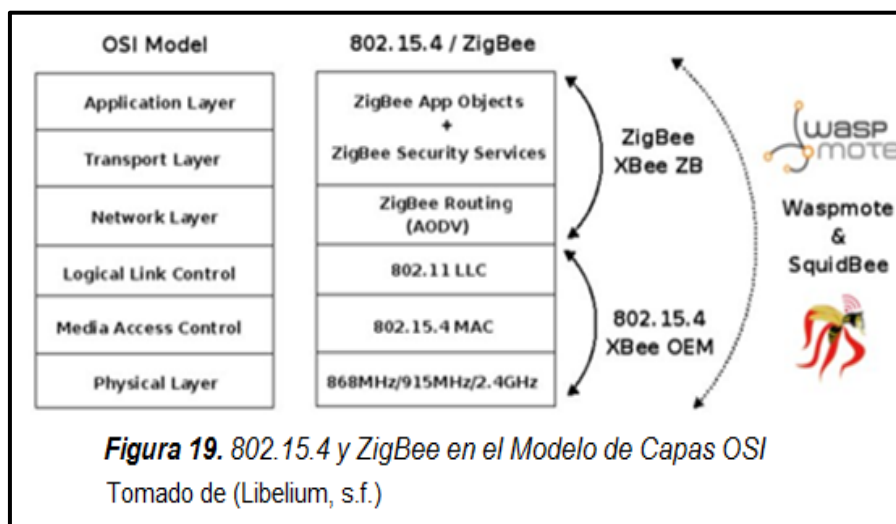
1.2.5 El Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 es el estándar inalámbrico de redes de área personal utilizado en redes inalámbricas de sensores y WSN. Un estándar diseñado para aplicaciones que incluyan requisitos como: baja tasa de datos, baja potencia, bajo alcance y bajo costo. Su propósito principal es permitir la comunicación entre los dispositivos de la red. Este estándar define el nivel físico y enlace de datos en la pila de capas del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) (Barro y Escudero, 2012, p. 2).

1.2.5.1 Características de IEEE 802.15.4

En la Figura 19 se observa cómo el estándar IEEE 802.15.4 trabaja en las capas 1 y 2 del modelo OSI (como se mencionó en el punto anterior); es decir, está encargado de las capas: física y enlace de datos (control de acceso al

medio, MAC y control de enlace lógico, LLC). En la capa de enlace de datos los bits se gestionan y se organizan para posteriormente convertirse en impulsos electromagnéticos en la capa física.



Las frecuencias definidas en el estándar se extienden en 27 canales diferentes y están divididas en tres grupos principales (Libelium, s.f.), como se observa en la Tabla 3, en la que también se definen las tasas de transmisión para cada uno de los grupos y la región geográfica donde se utilizan.

Tabla 3. Características de IEEE 802.15.4

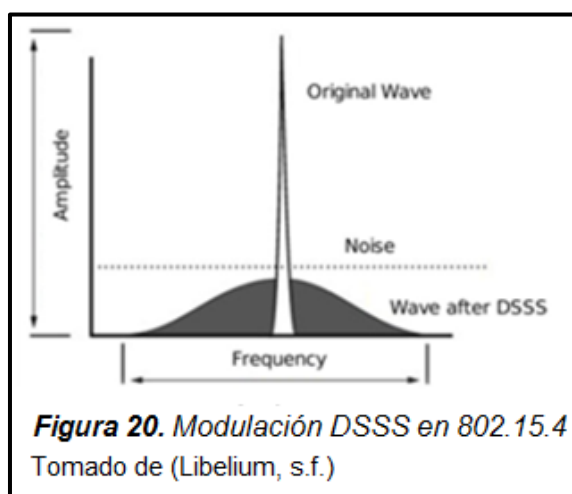
Frecuencia	Canales	Región	Tasas de transmisión
868.0 - 868.6 MHz	1 canal	Europa	20/100/250 Kbps
902.0 - 928.0 MHz	10 canales	EEUU	40/250 Kbps
2.40 - 2.48 GHz	16 canales	Todo el mundo	250 Kbps

Todo lo referente a ZigBee será explicado más adelante.

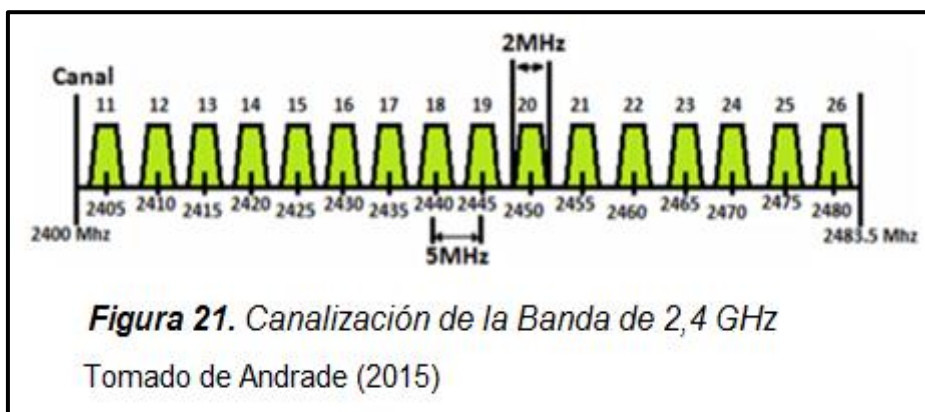
1.2.5.2 Modulación en IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 utiliza la técnica Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) para modular la información antes de ser enviada a la capa física. Este estándar hace uso de una secuencia de

código pseudo-aleatorio o también llamado secuencia de fragmentación, que causa que el total de la información a ser transmitida ocupe un ancho de banda más grande y la densidad de potencia espectral sea más baja, como se observa en la Figura 20. Esta secuencia se utiliza para modular directamente la señal de portadora (de ahí el nombre secuencia directa) y para codificar los datos que se transmiten. Esto provoca menos interferencias en las bandas de frecuencia utilizadas y mejora la relación señal a ruido (SNR) en el receptor. Atmel (2013).



La estándar IEEE 802.15.4 aumenta las posibilidades de coexistir sin problemas con otras tecnologías al dividir la banda de 2,4 GHz en 16 canales de 2 MHz en el rango de 2.4 y 2,483 GHz, con un espacio de 5 MHz entre cada canal, como se muestra en la Figura 21.



1.2.5.3 Acceso al Medio en IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 usa dos técnicas para evitar colisiones; es decir, que los nodos empiecen a emitir al mismo tiempo: CSMA/CA and GTS (Libelium, s.f.).

La más común es el Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Prevención de Colisiones (CSMA-CA, *Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance*). En esta técnica cada nodo escucha el medio antes de transmitir. Si la energía encontrada es más alta que la del nivel específico de referencia, el nodo transmisor espera durante un tiempo aleatorio (incluido en un intervalo) e intenta de nuevo.

La segunda técnica trabaja en Garantizar las Ranuras de Tiempo (GTS, *Guarantee Time Slots*). Este sistema utiliza un nodo centralizado (coordinador PAN) que da ranuras de tiempo para cada nodo, de modo que cualquiera de estas sabe cuándo tiene que transmitir. Existen 16 posibles ranuras de tiempo. En primer lugar, un nodo debe enviar un mensaje de solicitud al coordinador; como respuesta, el coordinador enviará un mensaje que contiene el espacio asignado y el número de ranuras asignadas.

1.2.5.4 Potencia de Transmisión y Sensibilidad de Recepción en IEEE

802.15.4

El estándar 802.15.4 establece la cantidad mínima de energía necesaria para transmitir en -3 dBm (0,5 mW) y la sensibilidad mínima en el receptor -92 dBm (6,3 e-10 mW); en efecto, los nodos que se pueden construir o encontrar en el mercado tienen una intensidad de potencia de transmisión variable, de 0 dBm (1 mW) con módulos transceptores XBee y 20 dBm (100 mW) con módulos transceptores XBee PRO; ambos valores son superiores al mínimo establecido en el estándar. Más adelante, en el punto 1.2.7.3, se explica a profundidad sobre los “Módulos Transceptores XBee”.

En cuanto a la sensibilidad de recepción, el XBee muestra -92 dBm (6,3 e-10 mW) y el XBee PRO muestra -100 dBm (1 e-10 mW). Esto significa que se puede detectar cualquier paquete que llegue con una energía muy baja.

1.2.6 ZigBee

ZigBee corresponde a la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.15.4. Como se vio anteriormente, IEEE 802.15.4 es el estándar de redes WPAN ampliamente usadas en redes WSN. ZigBee construye los niveles o capas superiores del modelo OSI que IEEE 802.15.4 no cubre (Barro y Escudero, 2012, p. 2), tal como se observa en el Gráfico 1.19.

1.2.6.1 Redes ZigBee

Existen tres tipos de nodos en una red ZigBee: coordinador, Router y dispositivo final (Libelium, s.f.).

- **Coordinador.** – Conocido también como Gateway es el dispositivo maestro, este que gobierna toda la red, recibiendo los datos por parte de los dispositivos finales para su posterior almacenamiento en la estación base.
- **Router.** - Es el nodo que encamina la información que envían los dispositivos finales al Gateway a través de la red WSN.
- **Dispositivo Final.** – Conocido también como nodos sensores, son los encargados de tomar la información del entorno y transmitirla a través de la red inalámbrica al nodo Router o directamente al Gateway.

ZigBee está diseñado para ofrecer orden y organización a una determinada red. En el ámbito de las redes WSN lo primero que un nodo (Router o dispositivo final) tiene que hacer es preguntar al coordinador por una dirección de red (16 bits), como parte del proceso de asociación. Toda la información que se envía por la red utiliza esta dirección y no la dirección MAC (64 bits). En este paso se llevan a cabo procesos de autenticación y cifrado.

Una vez que un nodo se ha unido a la red, puede enviar información a sus vecinos a través de los Routers que siempre están en modo despierto

esperando por los paquetes. Cuando el Router recibe el paquete y el vecino se encuentra en su radio de cobertura, el Router primero verifica si el vecino o dispositivo final de destino está despierto o dormido.

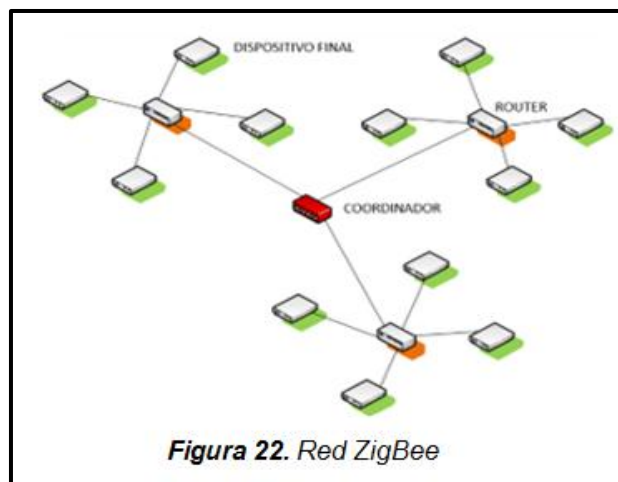
En el primer caso, el Router envía el paquete al dispositivo final; sin embargo, si está durmiendo, el Router almacena el paquete y espera a que el destinatario se despierte y pregunte al Router.

Los nodos coordinador y Router, no deberían usar baterías de duración limitada como los dispositivos finales, ya que estos deben estar constantemente en la espera de paquetes. Se recomienda usar una fuente de alimentación constante en estos nodos.

Existen algunas reglas básicas en una red ZigBee que se muestran a continuación.

- Los dispositivos finales se conectan a un Router o a un coordinador.
- Los Routers pueden conectarse entre ellos y con el coordinador.
- Los Router y coordinadores no pueden “dormir”. Ellos deben guardar en su memoria los paquetes que se entregan a los dispositivos finales.
- Los dispositivos finales pueden “dormir”.

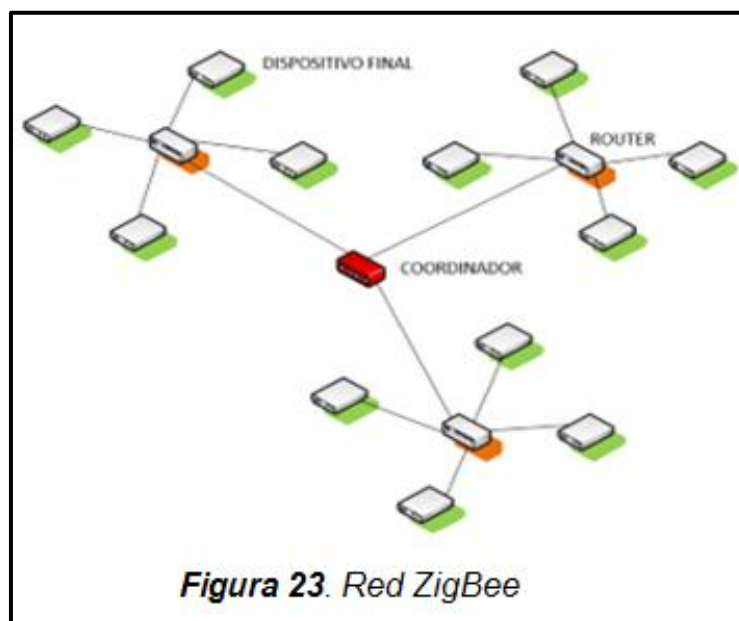
En la Figura 22 se muestran las conexiones entre nodos en una red ZigBee.



El concepto de red en malla “*Mesh Network*” recae en las comunicaciones ad hoc, también llamada *peer to peer* (P2P). Esto significa que todos los dispositivos de la red pueden comunicarse directamente entre sí. Deben ser

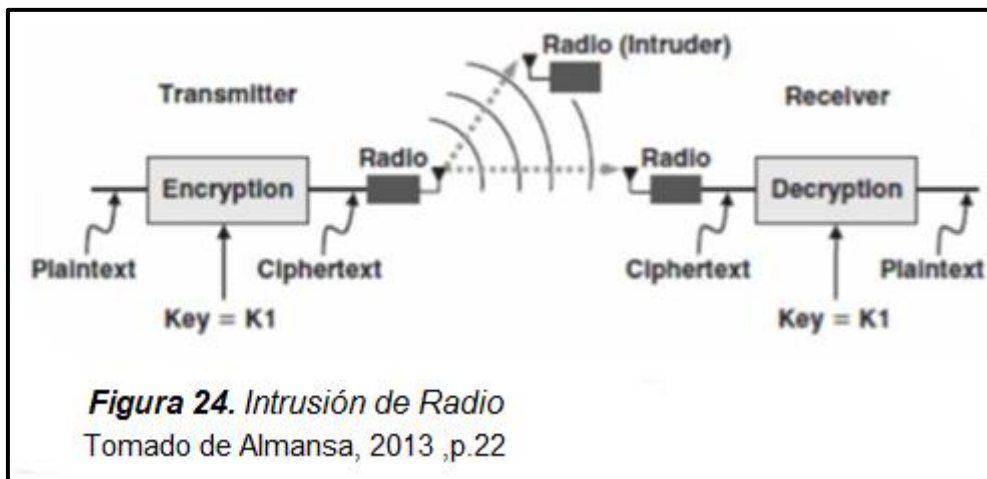
capaces de descubrirse entre sí y enviar mensajes de *broadcast* a todos los vecinos. Tienen que ser capaces de crear redes.

Para que ZigBee pueda crear una red de malla completa como la que se muestra en la Figura 23 todos los nodos deben tener el mismo rol, (dispositivos finales + Routers); por lo tanto, ellos podrán enrutar la información de sus vecinos y dormir cuando no haya una acción requerida (ahorro de energía). El protocolo DigiMesh (basado en 802.15.4) establece una red completamente distribuida en la que todos los nodos hablan entre ellos usando datagramas P2P.



1.2.6.2 Seguridad en ZigBee

La seguridad en las redes inalámbricas es un factor crítico ya que no requieren de un medio cableado para establecer comunicaciones. En la Figura 24 se observa cómo un intruso trata de substraer la información en un enlace microondas. Al transmitir dicha información por un medio no guiado, parecería que la comunicación es vulnerable; sin embargo, la seguridad provista proporciona métodos para que esto no sea posible. En la Figura 24 a demás se observa que únicamente el receptor tiene la llave para descifrar la información.



En este contexto de la seguridad ZigBee utiliza protocolos estándar de autenticación y encriptación. El proceso de seguridad de la red implica realizar una fusión entre el nivel de seguridad, la complejidad y el costo de los dispositivos. Aumentar la seguridad significa incremento de memoria, capacidad de procesamiento y aumento del gasto energético. ZigBee utiliza la técnica de Cifrado Avanzado Estándar (AES, *Advanced Encryption Standard*) para la encriptación; cuyo uso de claves se explica a continuación.

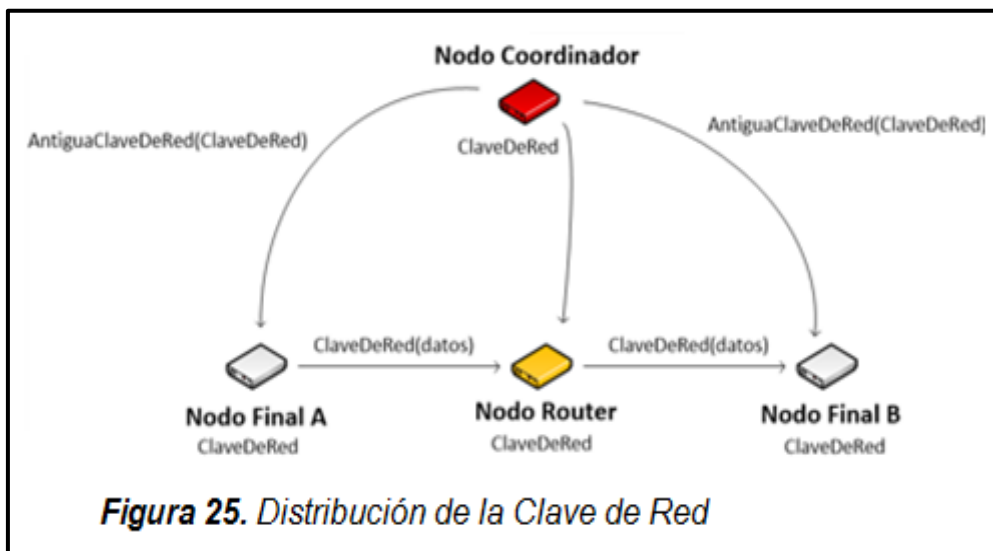
1.2.6.2.1 Claves de Red Y Claves de Enlace

ZigBee utiliza claves para la encriptación de datos que pasan por la red inalámbrica. Hay dos tipos de seguridad basados en claves que se pueden utilizar al mismo tiempo: claves de red y claves de enlace (Libelium, s.f.).

- **Las claves de red** protegen las tramas de datos a medida que pasan entre nodos. Cada uno de los paquetes se encripta y se envía al siguiente nodo en la red, donde la información se desencripta antes de ser nuevamente encriptada para pasar al siguiente nodo. La seguridad de la red implica una funcionalidad salto a salto y protege completamente las transmisiones en redes privadas donde todos los nodos están bajo el control de un coordinador. Encriptar y desencriptar un paquete en cada salto de la ruta agrega un retraso en la transmisión o latencia. Esta clave es generada por el nodo coordinador y compartida a todos los nodos que conforman la red inalámbrica de sensores; la

clave se regenera constantemente a un cierto intervalo de tiempo. Cada nodo debe obtener la clave de red para unirse a la misma. Una vez que el nodo coordinado decide regenerar la clave, ésta nueva clave es enviada por toda la red hacia los dispositivos que la conforman utilizando la antigua clave de red, tal como se observa en la Figura 25.

- **Las claves de enlace** proporcionan protección de extremo a extremo. Los datos se encriptan por el nodo emisor-origen y permanecen seguros mientras van saltando a lo largo de la red. Los paquetes se descriptan, únicamente al llegar al nodo receptor-destino. La clave de enlace se utiliza para prevenir que nodos intermediarios examinen los datos útiles en la red; tomando en cuenta que el resto de nodos conectados a la red podrían o no ser confiables.



1.2.6.3 Enrutamiento en ZigBee

Para encaminar la información de un lugar en la red a otro, ZigBee emplea varios métodos de enrutamiento: Red Mallada (AODV), Varios a Uno (Many-to-One) y de Origen (Source Routing). Estos métodos se describen a continuación.

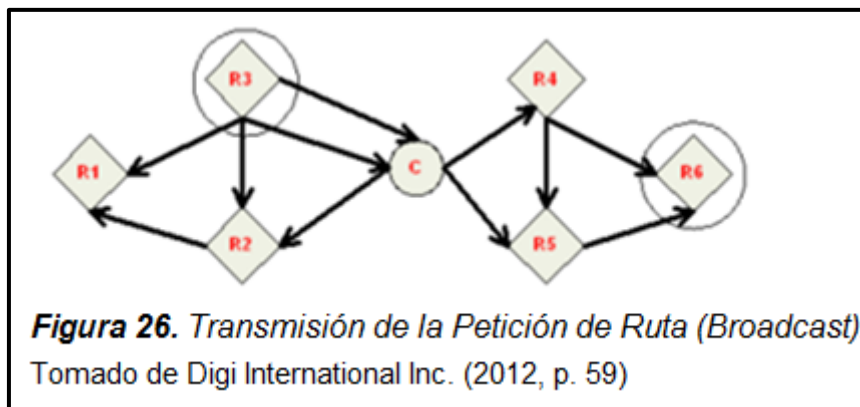
1.2.6.3.1 Red Mallada Ad hoc On- Demand Distance Vector (AODV)

ZigBee emplea el enrutamiento de malla para establecer una ruta entre el dispositivo origen y el dispositivo destino. El enrutamiento de malla permite que los paquetes de datos atraviesen múltiples nodos (saltos) en una red para enrutar los datos de un nodo origen a un nodo destino. Los nodos Router y coordinadores pueden participar en el establecimiento de rutas entre los dispositivos de origen y destino utilizando el procedimiento llamado “descubrimiento de ruta”. El proceso de descubrimiento de ruta se basa en el protocolo AODV.

El enrutamiento mediante el protocolo AODV se logra utilizando tablas en cada nodo que almacenan el siguiente salto (nodos intermediarios entre el nodo fuente y nodo destino) para llegar a un nodo de destino. Si un siguiente salto no es conocido, el descubrimiento de ruta se lleva a cabo para encontrar un camino. Debido a que sólo se puede almacenar un número limitado de rutas en un Router, el descubrimiento de ruta se utiliza con mayor frecuencia en una gran red que contenga muchos nodos.

Cuando un nodo de origen debe descubrir una ruta para llegar un nodo de destino, éste envía un comando de petición de ruta de difusión (*Broadcast*). El comando de petición de ruta contiene la dirección origen, la dirección de destino y un campo del costo de la ruta (métrica para medir la calidad de la ruta). A medida que el comando de petición de ruta es propagado por la red, cada nodo que retransmite el mensaje actualiza el campo del costo de la ruta.

En la Figura 26 se observa una transmisión del comando de petición de ruta en modo *Broadcast*, en donde el nodo R3 está tratando de encontrar una ruta hacia el nodo R6 (Digi International Inc., 2012, pp. 58-59).



Cuando el nodo de destino recibe la solicitud de ruta, analiza con las demás peticiones que recibió previamente; es decir, evalúa la mejor métrica con las demás solicitudes. Si la solicitud de ruta es mejor que las recibidas anteriormente, define la ruta y envía una respuesta de ruta al nodo que originó la mejor solicitud. Los nodos intermedios reciben y reenvían el paquete de respuesta de ruta.

1.2.6.3.2 Enrutamiento de Varios a Uno (Many-to-One)

En una red donde existe un dispositivo colector central de datos o un dispositivo Gateway, un enrutamiento AODV no es conveniente ya que ocasionaría una sobrecarga significativa. Al tener que definir una ruta antes de transmitir la información al Gateway, produciría que la red sea inundada con mensajes *broadcast* de solicitud de ruta.

El enrutamiento de “varios a uno” es una optimización de las redes AOVD malladas. En lugar de que cada dispositivo tenga que descubrir la ruta más óptima, una sola transmisión broadcast de muchos a uno es enviada desde el colector de datos para establecer rutas inversas en todos los dispositivos. La emisión de muchos a uno es un mensaje de solicitud de ruta con la dirección de detección del destino establecido en la dirección del colector de datos. Los dispositivos que reciben esta solicitud de ruta crean una tabla de enrutamiento de reversa para crear el camino de regreso al colector de datos, donde se utiliza la calidad del enlace para definir un vecino confiable para la ruta inversa. La solicitud de “varios a uno” es enviada periódicamente para actualizar las

rutas inversas en la red. Dado a que no se generan mensajes de respuestas, la congestión de tráfico en la red se reduce al mínimo.

Aplicaciones que requieren más de un colector de datos también pueden usar esta configuración de enrutamiento. Si más de un dispositivo colector de datos envía un Broadcast de varios a uno, los dispositivos crearán tablas de enrutamiento inversos para cada colector (Digi International Inc., 2012, p. 60).

1.2.6.3.3 Enrutamiento de Origen (Source Routing)

En aplicaciones en las que un dispositivo debe transmitir a muchos remotos, el enrutamiento AODV requeriría realizar un descubrimiento de ruta para cada dispositivo de destino, con el fin de establecer su camino. Si hay más dispositivos de destino que los que hay en las entradas de las tablas de enrutamiento, las rutas AODV establecidas se sobrescriben con nuevas rutas, causando que los descubrimientos de ruta ocurran con más frecuencia. Esto podría dar lugar a retrasos de paquetes y bajo rendimiento de la red.

El enrutamiento de origen de ZigBee ayuda a solventar estos problemas. A diferencia del enrutamiento de “varios a uno” que establece las rutas de encaminamiento de muchos dispositivos a un colector de datos, el enrutamiento de origen permite que el colector almacene y especifique rutas de muchos dispositivos remotos.

Para utilizar el enrutamiento de origen, un dispositivo debe utilizar el modo de configuración, Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) y debe enviar periódicamente peticiones Broadcast de ruta de varios a uno para crear una ruta hacia dicho dispositivo en el resto de ellos. Cuando los dispositivos remotos envían información usando la ruta de varios a uno, primero envían un registro de ruta. La transmisión de registro de ruta es *unicast* a lo largo de la ruta de varios a uno; cuando el registro de ruta llega al colector de datos, es allí donde se almacena la dirección del remitente y la dirección de 16 bits de cada salto en la ruta. El recolector de datos puede almacenar la información de enrutamiento y recuperarlo más tarde para enviar

un paquete enrutado de origen hacia un dispositivo remoto (Digi International Inc., 2012, p. 60).

En la Tabla 4 se muestra una comparación entre los diferentes métodos de enrutamiento; además, se muestran las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Tabla 4. Comparación entre Métodos de Enrutamiento

Método de Enrutamiento	Ventajas	Desventajas
AODV routing	Método por defecto, crea rutas automáticamente, trabaja en cualquier topología de red	Bajo rendimiento en redes de gran tamaño (más de 40 nodos) debido a la sobrecarga de peticiones repetidas de enrutamiento
Many-to-One routing	Excelente rendimiento para varias rutas unidas a una única estación central	No es apropiado para mensajes salientes de una ubicación central o redes con mensajería remota a distancia. Requiere configuración personalizada.
Source routing	Excelente rendimiento para mensajes salientes de una estación central, especialmente de dispositivos de gran capacidad como computadores. Buena opción para redes con más de 40 nodos.	Requiere pre-configuración, incluyendo la programación del dispositivo especial y de almacenaje. Las rutas deben ser adquiridas mediante programación.

1.2.6.4 Direccionamiento en ZigBee

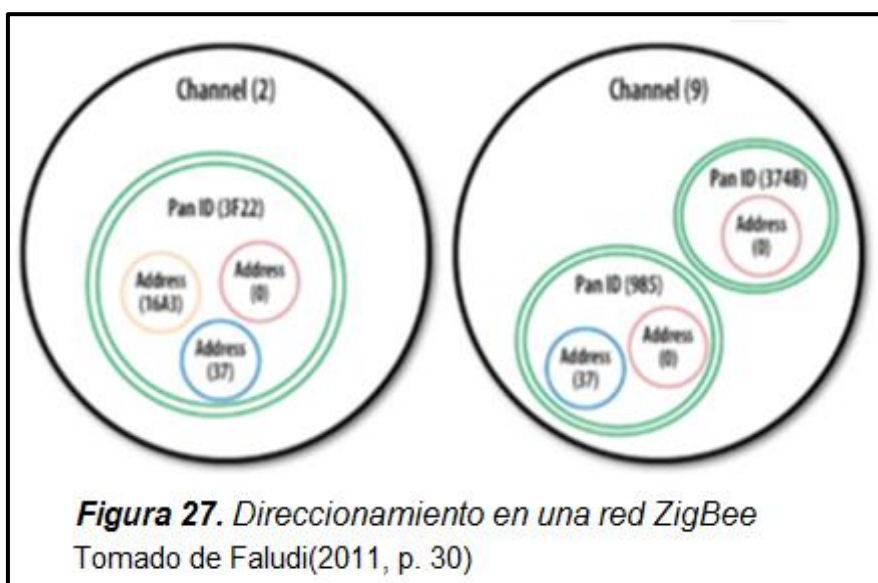
Si se desea enviar un mensaje de un nodo a otro, se necesita conocer la dirección de destino. Un nodo es conocido por varias direcciones diferentes, cada una de ellas tiene un propósito específico:

- Un número de serie único de 64 bits que ningún otro dispositivo en el mundo puede tener. Por ejemplo, 0013A200403B0CEE.
- Una dirección más corta de 16 bits que es asignada dinámicamente a cada nodo por el coordinador de la red. Esta dirección es única solamente dentro de la red. Por ejemplo, 23F7.

- Un identificador que se le asigna a cada nodo mediante una cadena corta de texto. Esto hace que el nodo sea direccionado con un nombre más amigable para el usuario. Por ejemplo, Nodo CO₂.

Cada red ZigBee es etiquetada con una dirección PAN de 16 bits. Existen 65536 direcciones PAN disponibles; cada una tiene la capacidad de generar otras 65536 direcciones de 16 bits. Por lo tanto, el espacio de direccionamiento abarca a más de 4 mil millones de nodos (Faludi, 2011, p. 29).

Cuando un coordinador ZigBee define una dirección de red PAN, comprueba los canales disponibles (12 canales) y elige sólo uno para la comunicación en toda la red. Todos los nodos en la red deben utilizar el mismo canal. El nodo coordinador es el encargado de definir el canal de comunicación automáticamente, por lo que no es necesario preocuparse de esta configuración, a menos que se presente algún problema en la comunicación. Por lo tanto, para lograr que un mensaje se envíe a través de un nodo a otro, estos nodos necesitan estar en el mismo canal y tener la misma información PAN. Además, el nodo que transmite debe conocer al menos una de las direcciones del radio receptor. Algunas redes tienen protocolos de seguridad que requieren un intercambio de claves como se mencionó en la sección 1.2.6.2.1. “Claves de Red y Claves de Enlace”. En la Figura 27 se muestra el direccionamiento de los radios en una red ZigBee.



1.2.6.5 Aplicaciones de WSN con ZigBee

Existe una gran variedad de aplicaciones con ZigBee orientadas a las redes inalámbricas de sensores. Entre las aplicaciones que tienen mayor relevancia están: monitoreo del medio ambiente, monitoreo de agua, seguridad y parqueaderos inteligentes. Estas aplicaciones se describen a continuación.

- **Monitoreo del Medio Ambiente.** - El monitoreo ambiental se enfoca en examinar los gases contaminantes presentes en el ambiente, temperatura, humedad, entre otras. Para esto utiliza sensores de: CO, CO₂, NO₂, O₃, entre otros.
- **Monitoreo de Agua.** - Se basa en monitorear la calidad del agua con sensores como: pH, temperatura, DO (Oxígeno Disuelto), conductividad, etc.
- **Seguridad.** - Se enfoca en la seguridad del hogar o un edificio. Utiliza sensores de: presencia, luminosidad, temperatura, flujo de líquido, etc.
- **Parqueaderos inteligentes.** - Se enfoca en determinar si hay parqueaderos disponibles, colocando el nodo sobre el pavimento. Puede utilizar sensores de ultrasonido, luminosidad, temperatura, entre otros.

En la Figura 28 se observa algunos nodos que utiliza la empresa Libelium para este tipo de aplicaciones, los cuales disponen de diferentes sensores dependiendo del tipo de aplicación; así mismo, utiliza transceptores basados en ZigBee para la comunicación entre nodos.



1.2.7 Equipamiento para una Red WSN

El equipamiento para el diseño y construcción de una red WSN está conformada físicamente por varias partes funcionales como: nodos finales, nodos Router, un Gateway y una estación base; de igual forma, implica el diseño de un software o interfaz amigable para el usuario; que permita manejar la información recibida por parte de los nodos finales o sensores; finalmente almacenarla en una base de datos configurada previamente en la estación base.

1.2.7.1 Microcontrolador (Arduino)

Para este proyecto se ha elegido trabajar con la plataforma de microcontroladores Arduino por su alta disponibilidad en el mercado; además, trabaja con tecnología *open source* lo que permite obtener gran cantidad de información en línea. Es así ya que existen muchos usuarios alrededor del mundo que trabajan en proyectos con Arduino por su facilidad de configuración y software libre. Resulta mucho más económico construir un nodo Arduino para una WSN, que comprar un nodo de algún fabricante como Libelium (empresa especialista en productos WSN). En la Tabla 5 se muestra una comparación de precios entre los principales fabricantes de WSN.

Tabla 5. Comparación Precios de Elementos de WSN

Fabricante	Elemento	Modelo	Precio Aprox.
National Instruments	Gateway Ethernet WSN	NI WSN-9791	\$1,290
National Instruments	Nodo de Medida	NI WSN-3202	\$935
National Instruments	Software	LabVIEW	\$3,300
National Instruments	Cubierta	NI WSN-3294	\$200
Libelium	Waspote ZB-PRO	SMA 5dBi	\$177
Libelium	Placa de Sensores	Gases PRO	\$137
Libelium	Waspote Gateway	ZB-PRO	\$177
Libelium	Sensor	CO ₂	\$56
Arduino, XBee	Gateway (Placa Arduino + XBee Shield + Módulo XBee S2 + Protector Arduino)		\$ 85
Arduino, XBee	Router (Placa Arduino + XBee Shield + Módulo XBee S2 + Protector Arduino + Panel Solar + Batería Recargable)		\$140
Arduino, XBee	Nodo Sensor (Placa Arduino + XBee Shield + Módulo XBee S2 + Protector Arduino + Panel Solar + Batería Recargable + Sensor + Protector Sensor)		\$ 230

- a. Precios tomados de las páginas oficiales de los fabricantes Libelium, National Instruments, Arduino, XBee, etc. b. Por ejemplo, con el

fabricante Libelium, para formar un nodo se une un waspmote, placa de sensores y sensor a utilizar lo que tendría como resultado un costo total aproximado de 370 dólares sin incluir las baterías.

Otra ventaja que ofrece trabajar con Arduino es su operación multiplataforma. El software de Arduino permite trabajar en Macintosh OS, Windows y Linux a diferencia de otros microcontroladores que sólo permiten configuraciones con Windows.

El entorno de programación de microcontroladores Arduino no es complejo como los de otros fabricantes. Usuarios con nivel básico en programación pueden desarrollar fácilmente sus configuraciones; es decir, que para usuarios con conocimiento en programación pueden lograr desarrollos de gran alcance.

El software de Arduino es asequible con una licencia libre y con opción de ser ampliada por programadores experimentados.

Las placas de Arduino se construyen con los microcontroladores ATmega168, ATmega328, ATmega1280 y ATmega2560 y sus planos están publicados libremente bajo licencia *Creative Commons*. En este sentido los expertos en electrónica desarrollan sus propias versiones de los módulos, crean versiones más avanzadas de acuerdo a su necesidad o simplemente construyen su propio módulo para ahorrar dinero.

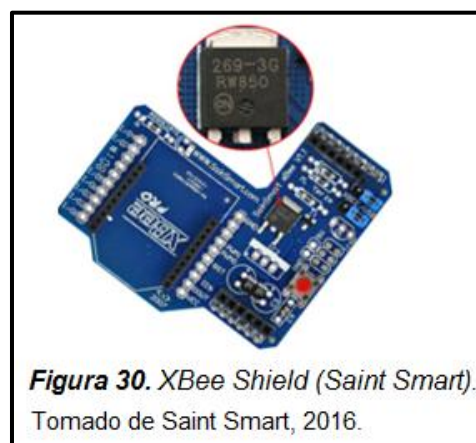
En el Anexo 1 se puede consultar los distintos tipos de placas Arduino y sus principales características.

La placa Arduino UNO es la más utilizada en toda la familia de Arduino; por esta razón, existe gran cantidad de información en todo el mundo sobre el uso y proyectos desarrollados con esta poderosa herramienta. Conociendo esta información y la información previa sobre asequibilidad y precios, se decide trabajar en este proyecto con Arduino UNO; En la Figura 29 se observa la placa Arduino UNO, la cual es ideal para la implementación de este proyecto ya que no se necesita un gran número de entradas, ni gran procesamiento.



1.2.7.2 Escudos (Shields)

Los escudos son placas que se colocan encima de las placas Arduino; sirven para dotar de nuevas funcionalidades que se gestionan desde las microcontroladoras. Son sencillas de montar y son económicas. Entre algunas de las funcionalidades que ofrecen están: acceso a Internet, comunicación con módulos transceptores, acceso a memorias SD, control de varios tipos de motores, permiten soldar componentes, entre otros. El escudo que se utiliza en este proyecto es llamado “XBee Shield” que permite adaptar a la microcontroladora los módulos transceptores “Xbee” los cuales harán la función de la comunicación inalámbrica entre nodos usando protocolos ZigBee. Los XBee Shields fueron creados específicamente para crear redes inalámbricas de sensores. Tienen un bajo consumo de potencia. En la Figura 30 se observa un XBee Shield que irá montado sobre una placa Arduino con el propósito como ya se mencionó, de adaptar los módulos transceptores XBee.



1.2.7.3 Módulos Transceptores XBee

Los módulos transceptores XBee son pequeños chips capaces de comunicarse con otros de manera inalámbrica. Estos módulos son ideales para reemplazar los cables en una comunicación serial. Según su fabricante “Digi”, los módulos XBee son soluciones integradas que proporcionan un medio inalámbrico para la comunicación entre dispositivos. Los módulos XBee están basados en protocolos ZigBee y utilizan el estándar 802.15.4 para crear redes punto a multipunto y redes punto a punto; diseñadas para aplicaciones que requieran alto tráfico de datos, baja latencia y sincronización de comunicación. Existen dos tipos de módulos XBee: XBee Series 1 y XBee Series 2. En el Anexo 2 se puede consultar los diferentes tipos de antenas con las que pueden operar los módulos XBee; así como sus características.

1.2.7.3.1 Tipos de Módulos Transceptores XBee

- **XBee Series 1**

Estos módulos usan un microchip del fabricante *Freescale* que proporcionan comunicaciones simples basadas en estándares punto a punto, los cuales no necesitan una configuración previa. El hardware de los Series 1 no es compatible con los Series 2.

- **XBee Series 2**

Estos módulos usan un microchip del fabricante *Ember Networks*. Están basados en el protocolo ZigBee de redes de malla. Las redes de malla son fundamentales para crear redes de sensores robustas. Los módulos Series 2 deben ser configurados antes de entrar en operación; además, funcionan en modo transparente o por comando API (modos de operación del XBee). En este proyecto se utiliza este tipo de XBee ya que son ideales por sus características para usar en redes inalámbricas de sensores. Cuentan con una antena denominada Antena látigo (Whip Antenna), es una antena conformada con un cable flexible lineal, conectado al receptor de radio o transmisor, diseñada para ser lo más

flexible posible para evitar que se rompa fácilmente. Es una antena sencilla, ofrece radiación omnidireccional; es decir, la distancia máxima de transmisión es prácticamente la misma en todas las direcciones, cuando la antena se encuentra perpendicular al módulo. En la Figura 31 se observan los módulos XBee Series 2 que se utilizan en este proyecto. En la Tabla 6 se observa la descripción de los pines del módulo XBee series 2.



Tabla 6. Descripción de los Pines del XBee Series 2

Table 1-2. XBee pin descriptions

Pin #	Name(s)	Description
1	VCC	3.3 V power supply
2	DOUT	Data Out (TX)
3	DIN	Data In (RX)
4	DIO12	Digital I/O 12
5	RESET	Module reset (asserted low by bringing pin to ground)
6	PWM0/RSSI/DIO10	Pulse-width modulation analog output 0, Received Signal Strength Indicator, Digital I/O 10
7	DIO11	Digital I/O 11
8	Reserved	Do not connect
9	DTR/SLEEP_RQ/ DIO8	Data Terminal Ready (hardware handshaking signal), Pin Sleep Control (asserted low), Digital I/O 8
10	GND	Ground
11	DIO4	Digital I/O 4
12	CTS/DIO7	Clear to Send (hardware handshaking), Digital I/O 7
13	ON/SLEEP	Sleep indicator (off when module is sleeping)
14	VREF	Not used in Series 2
15	ASSOC/DIO5	Association indicator: blinks if module is associated with a network, steady if not; Digital I/O 5
16	RTS/DIO6	Request to Send (hardware handshaking), Digital I/O 6
17	AD3/DIO3	Analog Input 3, Digital I/O 3
18	AD2/DIO2	Analog Input 2, Digital I/O 2
19	AD1/DIO1	Analog Input 1, Digital I/O 1
20	AD0/DIO0/COMMIS	Analog Input 0, Digital I/O 0, Commissioning Button

Tomado de Faludi, R. 2011, p.15.

- **Regular y PRO**

Ambos módulos Series 1 y Series 2 están disponibles en dos diferentes potencias de transmisión: Regular y PRO. La versión “Regular” es considerada como una versión de XBee simple. La versión PRO provee más potencia, más alcance y es más costosa.

En el Figura 32 se observa los módulos XBee Series 2 en su modelo Regular y PRO



Entre las principales diferencias presentadas por XBee Regulares Serie 1 y Serie 2 tenemos:

XBee Serie 2 tiene una línea de vista superior en alcance a la que posee XBee Serie 1. XBee Serie 2 necesita ser configurado previamente antes de ser utilizado. XBee Serie 2 utiliza el protocolo ZigBee de redes de malla en tanto que XBee Serie 1 utiliza comunicaciones simples basadas en estándares punto a punto. El hardware del Serie 1 y Serie 2 no es compatible por lo que se recomienda la elección de uno de ellos para trabajar eficazmente.

En la Tabla 7 se realiza una comparación de características entre estos dos modelos de XBee.

Tabla 7. Comparación de XBee Regulares Series 1 y Series 2

	Series 1	Series 2
Typical (indoor/urban) range	30 meters	40 meters
Best (line of sight) range	100 meters	120 meters
Transmit/Receive current	45/50 mA	40/40 mA
Firmware (typical)	802.15.4 point-to-point	ZB ZigBee mesh
Digital input/output pins	8 (plus 1 input-only)	11
Analog input pins	7	4
Analog (PWM) output pins	2	None
Low power, low bandwidth, low cost, addressable, standardized, small, popular	Yes	Yes
Interoperable mesh routing, ad hoc network creation, self-healing networks	No	Yes
Point-to-point, star topologies	Yes	Yes
Mesh, cluster tree topologies	No	Yes
Single firmware for all modes	Yes	No
Requires coordinator node	No	Yes
Point-to-point configuration	Simple	More involved
Standards-based networking	Yes	Yes
Standards-based applications	No	Yes
Underlying chipset	Freescale	Ember
Firmware available	802.15.4 (IEEE standard), DigiMesh (proprietary)	ZB (ZigBee 2007), ZNet 2.5 (obsolete)
Up-to-date and actively supported	Yes	Yes

Tomado de Faludi, R. 2011, p.3.

1.2.7.3.2 Modos de Operación de Módulos Transceptores XBee

Las radios se pueden configurar de dos formas distintas: en modo API y modo AT. El primero utiliza un formato de datos envolvente que es adecuado para que los ordenadores puedan hablar con otros, pero no es muy amigable para los usuarios. El segundo, el modo de comandos AT, está diseñado para una mayor interacción con el usuario. Adicionalmente, la configuración AT trabaja en dos modos:

- **Modo Transparente.** - Es el estado por defecto de las radios que usan el firmware AT. Este modo es llamado transparente porque las radios simplemente pasan la información a lo largo de la red tal como la

reciben. El modo transparente se utiliza para enviar datos a través del XBee a una radio remota de destino. Cuando se reciben datos, se envían a través del puerto serie tal como se recibió.

- **Modo de Comandos.** - A veces no se quiere enviar ningún dato en absoluto, sino se quiere hablar directamente con la radio local, para preguntar sobre su configuración o alterar la forma en la que se comporta. En este caso se quiere hablar con la radio y no a través de ella. En lugar de pasar a lo largo lo que se escribe, la radio debe detenerse, escuchar y reaccionar. Esto se conoce como modo de comandos.

Los módulos transceptores XBee configurados en modo AT están normalmente en el modo transparente. Para lograr que una radio cambie al modo de comandos, se debe emitir una cadena única de texto “(+++)” de una manera especial. Cuando la radio mira todo un segundo de silencio en el flujo de datos, seguido por “+++” y otro segundo de silencio, sabe que debe dejar de enviar datos a través de ella y empieza a aceptar comandos localmente. Si pasan 10 segundos sin ninguna entrada del usuario, el módulo XBee cae del modo de comandos al modo transparente automáticamente.

Cada comando AT empieza con las letras “AT”, que significa “atención”. La idea es conseguir la atención del dispositivo; en este caso, la radio XBee. El AT es seguido por dos caracteres que indican que comando está siendo emitido.

1.2.7.3.3 Modo XBee API

- **Interfaz de Programación de Aplicaciones (API)**

Es un conjunto de interfaces estándar creado para permitir que un programa de software interactúe con otro. Las APIs permiten que una aplicación de computadora solicite servicios de otra aplicación de manera estándar. En este caso lo más importante es destacar que API está diseñado específicamente para permitir a los ordenadores hablar eficazmente a otros. Las computadoras se preocupan por la corrección

de errores, y la transferencia de datos eficiente para realizar su trabajo de forma rápida, predecible y confiable.

Las computadoras prefieren tratar con números, y se desarrollan mejor cuando la organización de estos números proporciona un método inequívoco y altamente estructurado para la transferencia. Aquí es donde entra el modo API.

El objetivo de las comunicaciones XBee en modo API es transmitir datos altamente estructurados de forma rápida, predecible y confiable. Para esto se utilizan tramas API que consisten en una serie de bytes. Las tramas API están estructuradas, como se muestra en la Tabla 8, de un delimitador de inicio, longitud, trama de datos y checksum (Faludi, 2011, p. 117). En este proyecto se ha elegido trabajar en este modo ya que ofrece grandes funcionalidades, entre ellas se encuentran: trama de datos con información completa, configuración remota de radios en toda la red, información confiable e integridad de los datos, entre otras.

Tabla 8. Estructura de una Trama API

Start delimiter	Length		Frame data			Checksum
Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	...	Byte n	Byte n+1
0x7E	MSB	LSB	API-specific structure			Single byte

Tomado de Faludi, R. 2011, p.117.

Los mencionados elementos de la trama API se explican a continuación.

- a) Delimitador de Inicio.** - Cada trama API empieza con un byte de inicio. Este número es único e indica donde comienza la trama de datos. La API XBee emplea el número decimal 126 para esta finalidad. En toda la documentación API se utiliza el formato hexadecimal; por lo tanto, el número 126 es equivalente a 0x7E en hexadecimal. Cuando empieza la lectura de bytes que llegan al puerto serie del XBee, no se puede saber lo que representan hasta que se conozca su orden. Por esto, lo primero que se debe hacer es

buscar un byte de inicio (0x7E). Una vez identificado esto se puede distinguir el resto de una trama. Este procedimiento será muy útil al momento de desarrollar el software que permitirá la visualización de los datos provenientes de los sensores.

- b) Bytes de Longitud.** - Estos aparecen después del byte de inicio e indican la longitud total de la trama de datos. Esto permite saber hasta dónde llega la lectura de datos. El segundo Byte Más Significativo (MSB, *Most Significant Byte*), es por lo general cero y el tercer Byte Menos Significativo (LSB, *Lest Significant Byte*), por lo general contiene toda la longitud.
- c) Bytes de Trama de Datos.** - La trama de datos es específica para cada tipo de mensaje que se recibe en una radio XBee. Algunas tramas tendrán una gran cantidad de datos mientras que las tramas más pequeñas tendrán solamente 2 bytes. Se puede conocer el tamaño de la trama de datos con los bytes de longitud explicados anteriormente.
- d) Checksum.** - El último byte de la trama API es siempre un checksum. El checksum se calcula en base a todos los bytes antes de él. Es una simple suma de todos los bytes que componen la trama, que se utiliza en el receptor para comprobar si existe un error en la transmisión. El cálculo es aritmético y está perfectamente diseñado para que los computadores lo procesen.

Dentro de la estructura general de la trama, existen subestructuras que cubren todos los diferentes tipos de datos que se desea enviar y recibir de una radio XBee. Las diferentes tipos de tramas contienen diferentes tipos de estructuras de datos. Existe una gran variedad de tipos de tramas API. El byte de tipo de trama indica qué tipo de trama API se está usando. Conocer el tipo de trama es muy importante para saber qué tipo de información viene a continuación. Por ejemplo, si el tipo de trama es 0x08, indica que es una trama de comando AT.

En la Tabla 9 se observa los diferentes tipos de trama que se puede utilizar.

Tabla 9. Tipos de Tramas API

Tipo de Trama	Descripción
0x08	Comando AT (inmediato)
0x09	Comando AT (en cola)
0x17	Solicitud de comando remoto
0x88	Respuesta de comando AT
0x8A	Estado del módem
0x10	Solicitud TX
0x8B	Respuesta TX
0x90	RX recibido
0x92	RX I/O recibido
0x95	Indicador de identificación de nodo
0x97	Respuesta de comando remoto

(Un ejemplo de trama API pag. 130 Building Wireless Sensor Network)

1.2.7.4 Adaptador USB de XBee (XBee Explorer)

El adaptador USB permite realizar las configuraciones de parámetros en los módulos XBee y actualizar el software del firmware de cada uno de los módulos. Existen diferentes fabricantes de adaptadores USB para XBee, como se observa en la Figura 33. En este proyecto se utilizará el adaptador *XBee Explorer* de *SparkFun*; éste es un adaptador muy popular y usa un cable USB a mini USB para conectar al computador. Además de poder configurar los módulos XBee, el adaptador se lo usa como puerta de enlace de la red del proyecto. Con el XBee montado sobre un adaptador y conectado al computador, se puede recibir los datos de los nodos de la red en la PC por el puerto serial; es decir, el Gateway estará formado por un módulo XBee y un adaptador para conectarlo a la PC.

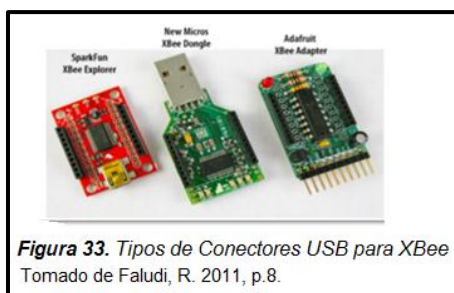


Figura 33. Tipos de Conectores USB para XBee
Tomado de Faludi, R. 2011, p.8.

1.2.7.5 Software X-CTU

X-CTU es el programa de configuración oficial para los módulos de radio XBee y está disponible únicamente para el sistema operativo Microsoft Windows.

Este software es posible utilizarlo en diferentes sistemas operativos montando máquinas virtuales con Microsoft Windows. X-CTU contiene algunas características útiles que incluye: comandos de configuración comentados, pruebas de rango, fácil acceso a las funciones de la API.

Para proceder con la configuración se conecta el XBee en el adaptador USB y mediante el cable USB se conecta a uno de los puertos del computador.

A continuación, a modo de ejemplo, se pone en marcha el programa X-CTU y se selecciona el puerto apropiado y se procede a configurar el módulo tal como se muestra en las Figuras 34 y 35.

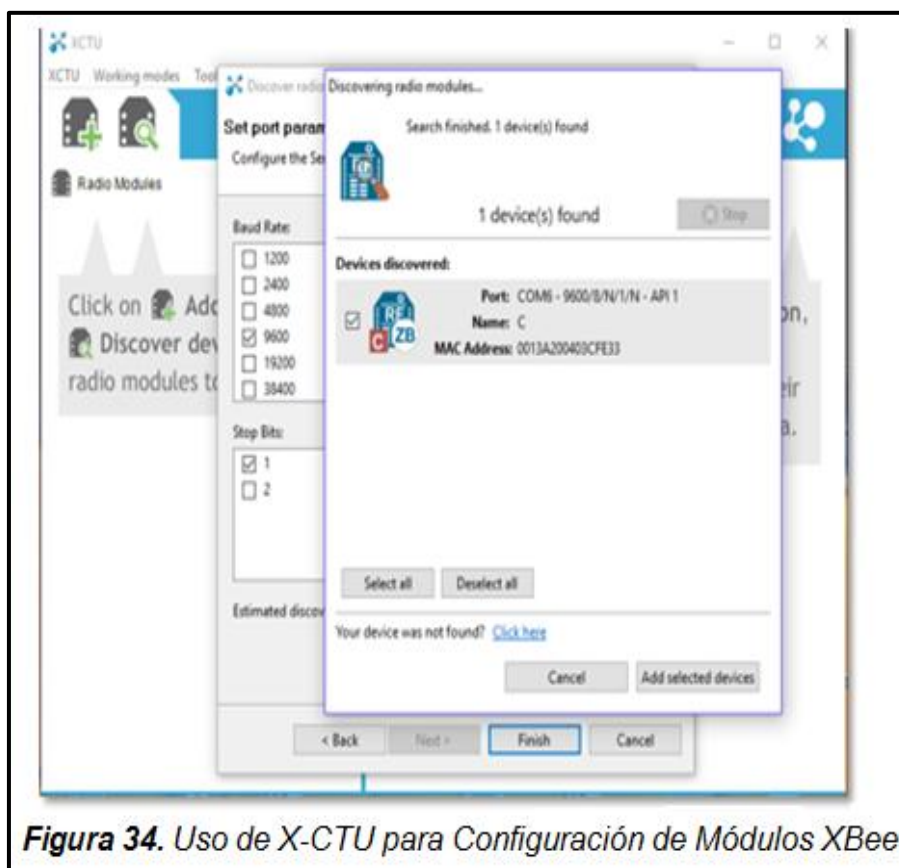


Figura 34. Uso de X-CTU para Configuración de Módulos XBee



Figura 35. Ventana de Configuración del Xbee

1.2.7.6 Sensores para Redes WSN

Conocidos como la pieza clave en cualquier sistema que proporcione información del entorno, convirtiendo fenómenos físicos tales como la temperatura a una señal eléctrica producida por el sensor al obtener mediciones.

Los sensores para redes WSN permiten medir diferentes fenómenos entre ellos tenemos: temperatura, vibración, ruido, contaminación, fuerza, humedad, movimiento, radiación entre otras. Los sensores pueden ser aplicados a diferentes áreas, por ejemplo: robótica, medicina, industria de manufactura, medio ambiente, etc.

Los sensores están diseñados para ser colocados a cierta distancia con el fin de proporcionar la mayor cantidad de información a la red y permitir el monitoreo periódico del entorno al que pertenece.

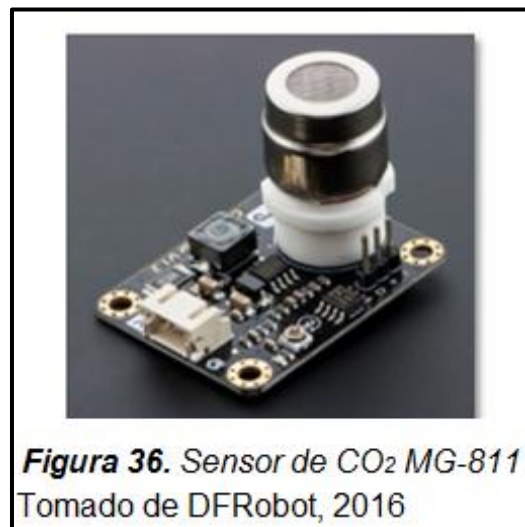
Características de alta precisión y estabilidad permite que los sensores sean ideales para generar aplicaciones de pruebas y medidas.

Al conocer la concentración exacta de CO₂, se puede hacer algo para reducir sus niveles y proteger el planeta.

A continuación, se presenta más a detalle el sensor de medición CO₂ como principal dispositivo de recolección de información para este proyecto.

1.2.7.6.1 Sensor de CO₂

DFRobot diseñó un sensor de CO₂ de alta calidad. La tensión de salida del módulo cae a medida que la concentración de CO₂ aumenta. Posee un potenciómetro para establecer el umbral de voltaje. Mientras la concentración de CO₂ es lo suficientemente alta (tensión es menor que el umbral), una señal digital (ON/OFF) se dará a conocer. En la Figura 36 se observa el sensor de CO₂ del fabricante DFRobot.



1.2.7.6.2 Características del Sensor de CO₂ MG- 811

El sensor MG-811 es altamente sensible a CO₂ y menos sensible al alcohol, CO, humedad y temperatura. También posee un circuito de calefacción que brinda la mejor temperatura para el funcionamiento del sensor. La entrada de alimentación de 5V es aumentada a 6V para dar calefacción. Además, el sensor contiene un circuito de acondicionamiento para amplificación de la señal de salida. El rango de medición del sensor es de 100 a 10000 ppm. En el

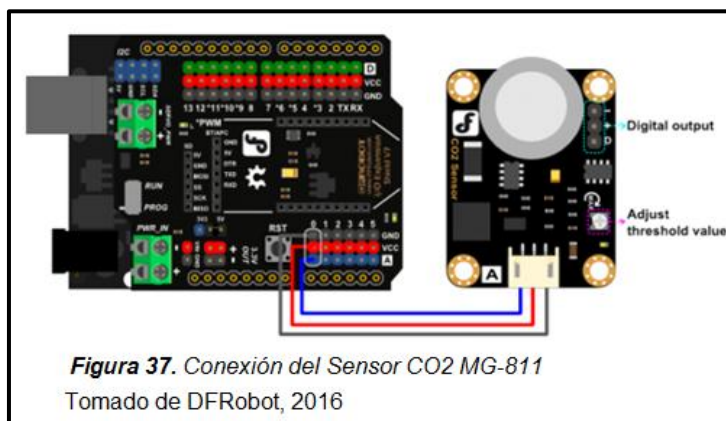
Capítulo 2. “Los Espacios Públicos y la Contaminación Ambiental”, se explica más a detalle sobre los límites de contaminación en la ciudad de Quito que rigen las normas actuales; también, se muestran detalles sobre los perjuicios en la salud humana cuando existen grandes exposiciones de contaminantes en este caso el CO₂. En el Anexo 3 se puede consultar la hoja de especificaciones del sensor MG-811, en la cual se muestran a detalle sus características y curvas de operación.

1.2.7.6.2 Especificaciones del Sensor de CO₂ MG- 811

El sensor de CO₂ MG- 811 contiene especificaciones ideales para armar el nodo final que nos permitirá obtener las mediciones necesarias para nuestro proyecto, a continuación, se mencionan dichas especificaciones:

- Voltaje de operación: 5V
- Interface: Análoga
- Una salida digital (Una vez que la concentración de CO₂ es superior al valor del umbral establecido, la salida se establecerá en HIGH, 5V)
- Circuito de calefacción: Corriente de calefacción (200mA) y potencia de calefacción (1200mW)
- Tamaño: 32x42mm

En la Figura 37 se muestra el diagrama de conexión del módulo sensor MG-811 a la placa de microcontrolador.



1.2.8 Consumo de Energía en las Redes WSN

La optimización del consumo de energía por parte de los nodos es de vital importancia para lograr el máximo tiempo de vida de una red WSN.

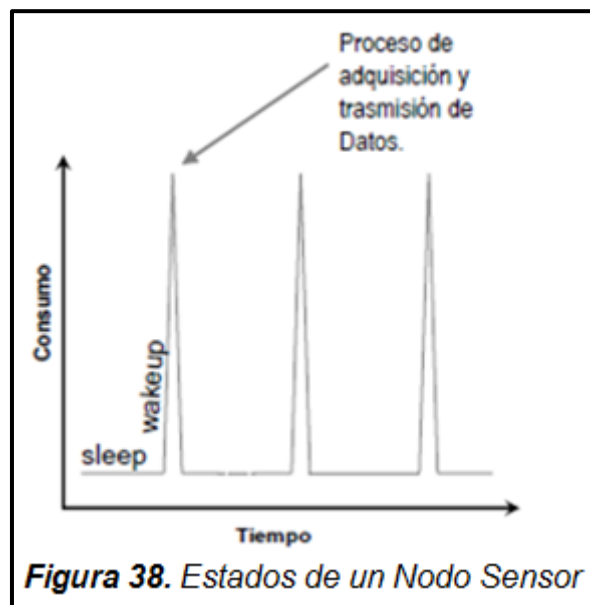
Existen diferentes factores dentro del diseño de la red que produce un consumo de energía notable. La transmisión de datos, el procesamiento de la señal y la operación del hardware son los principales consumidores de energía en una red inalámbrica de sensores.

Cada nodo posee tres estados que influyen en el consumo de energía como podemos observar en la Figura 38. Entre estos estados se tiene:

Estado Sleep. - Los nodos están dormidos la mayor parte del tiempo.

Estado Wakeup. - Los nodos funcionan en un bajo consumo de energía a una frecuencia establecida.

Estado Active. - Los nodos recogen información; se encuentran activos lo necesario antes de volver al estado sleep.



El consumo de energía está considerado como una métrica principal en la mayoría de las redes WSN. En algunos casos se debe aplicar la utilización máxima de la energía para la entrega inmediata de la información.

Una WSN tiene un emisor de energía también llamada batería que en su mayoría debería ser recargable, al igual que consumidores de energía

(transmisor, receptor, módulo de cómputo y los dispositivos sensores). Depende de la funcionalidad que se le dé a la red para optimizar los recursos y alargar la vida útil de la red WSN.

1.2.8.1 Suministro de Energía

Para optimizar el funcionamiento de nuestra red WSN se pueden utilizar dos maneras de suministro de energía:

Como primera alternativa tenemos dotar a cada uno de los nodos una fuente de energía considerada recargable con un periodo de duración establecido. Baterías recargables que proporcionan un voltaje suficiente para el funcionamiento de cada nodo dentro de la red.

Como segunda alternativa tenemos utilizar la energía proporcionada por el ambiente en este caso la utilización de paneles solares que permitan obtener la energía de los rayos del sol como fuente de energía que permita cargar a las baterías adaptadas a los nodos sensores.

Para obtener el consumo de energía de los nodos, se calcula mediante la división entre la capacidad de la batería a utilizarse y la carga total del nodo. Por ejemplo, en nuestro proyecto utilizaremos unas baterías Lipo de 700mAh y la carga total de un nodo final es de 286mAh; por lo tanto, la duración de la batería sería de 2,44 horas. Por esta razón, los nodos tienen la capacidad de entrar en modo “*sleep*” y funcionar a solo ciertos períodos de tiempo; con esto se lograría un eficiente consumo de energía y alargar la vida de la batería por mucho tiempo; aún más si se utiliza un panel solar que alimente a la batería.

1.2.8.2 Turnigy (Batería Lipo)

Estas baterías son conocidas por su rendimiento, su fiabilidad y un precio por decirlo accesible al público. Utilizadas para muchas actividades electrónicas como un suministro de energía confiable y de gran duración. Proporcionan una capacidad nominal máxima.

Se encuentran equipadas con descarga de alta resistencia y mantiene altas cargas de corriente. Cada Batería está equipada con conectores trabajados en oro y conectores de balance estilo JST – XH; conectores eléctricos que son

fabricados por J.S.T. (Japan Solderless Terminal), son terminales sin soldadura utilizados comúnmente por los electrónicos y productos como baterías recargables, balanceadores de baterías entre otros. El conector XH fue desarrollado en base a la alta fiabilidad y versatilidad de los conectores de la serie NH. El conector es muy pequeño, con una altura de montaje de 9,8 mm; como se puede observar en la Figura 39.



Figura 39. Turnigy 700mAh 3S 30C Lipo Pack (XT30)

Especificaciones:

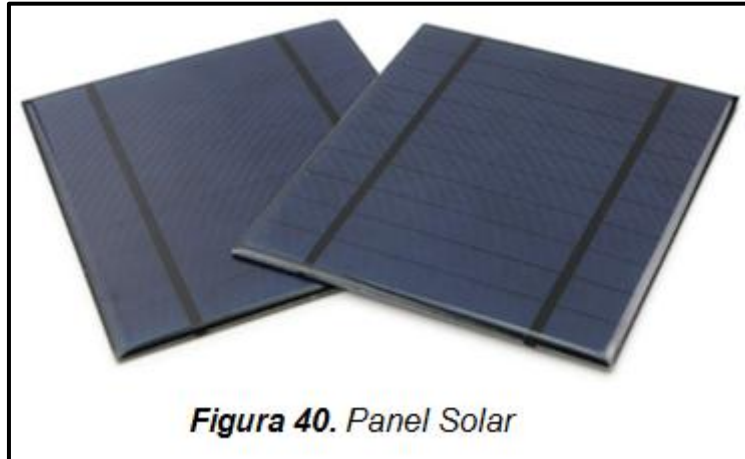
Las baterías Turnigy poseen especificaciones que les permiten ser utilizadas como alimentación de energía a los dispositivos electrónicos, a continuación, algunas de ellas:

- ✓ **Capacidad:** 700mAh
- ✓ **Configuración:** 3S/11.1v/3CELL
- ✓ **Descarga Constante:** 30 C
- ✓ **Descarga Máxima:** 60 C
- ✓ **Peso de la Batería:** 77g
- ✓ **Tamaño de la Batería:** 73 x 35 x 17mm
- ✓ **Carga del Enchufe:** JST – XH
- ✓ **Enchufe de descarga:** XT – 30

1.2.8.3 Panel Solar

El panel solar es una fuente de energía utilizada actualmente para abastecer diferentes dispositivos que dependen de una fuente de alimentación que les permita su continuo funcionamiento. Utilizando la energía proporcionada por los

rayos del sol durante la mañana es capaz de obtener energía que permita ser utilizada como alimentación para una batería recargable en funcionamiento como se puede observar en la Figura 40, el panel solar presenta las siguientes características:



Características:

- ✓ **Tamaño:** 136 x 110mm
- ✓ **Máxima potencia:** 2 – 2.5w
- ✓ **Máxima Corriente:** 330mA
- ✓ **Máximo Voltaje:** 6V

Como se puede observar en la Tabla 10 existe una relación para poder configurar un panel solar como fuente de alimentación para una Batería recargable.

Tabla 10. Relación de Configuración entre el Panel Solar y la Batería de Almacenamiento

Batería	Panel Solar
1.2 v	2 v ~ 2.5 v
2.4 v	3.5 v ~ 4 v
3.6 v	5 v ~ 6 v
6 v	7.5 v ~ 9 v
12 v	15 v ~ 18 v

Este panel solar permite la recarga de pequeñas baterías de corriente continua (CC), Cuando la tensión existente en el panel solar no satisface a la batería conectada para su recarga, se puede tomar otro panel solar y conectarlo en serie al primero para cumplir con la especificación de recarga necesaria de la batería.

Existirá un incremento en la tensión proporcionada a la batería luego de haber conectado los paneles solares en serie. Obteniendo 11 voltios en total, 5.5 voltios por cada panel solar. Con el fin de incrementar la velocidad de carga, se puede tomar más de un panel solar y realizar una conexión en paralelo que permita la carga de forma acelerada.

(ALLPOWER 2.5W 5V/500mAh Mini Encapsulated Solar Cell Epoxy Solar Panel DIY Battery Charger Kit for Battery Power LED 130x150mm), es un panel con características suficientes para poder alimentar una Batería Turnigy.

El cargador de corriente allpower permite cargar la batería externa en cualquier lugar y en cualquier momento. Puede ser utilizado para alimentar la batería de nuestros nodos sensores y optimizar el funcionamiento de nuestra red WSN.

Datos Técnicos:

- ✓ **Tamaño:** 130 x 150 mm
- ✓ **Voltaje:** 5v
- ✓ **Corriente:** 500mAh
- ✓ **Potencia:** 2.5w
- ✓ **Tasa de conversión:** 17%
- ✓ **Peso:** 92g

Contiene,

- ✓ 1 Pieza de paneles solares PCB2
- ✓ 1 Película protectora PE

2. Capítulo II. Los Espacios Públicos y la Contaminación Ambiental

El presente proyecto está enfocado en realizar un monitoreo de emisiones de CO₂, que permita obtener valores de contaminación en lugares donde exista grandes concentraciones de personas. Por este motivo, es necesario identificar como casos de estudio, determinados lugares de concentración pública, el número de transeúntes, sus actividades y como se verían afectados por la contaminación ambiental.

El presente proyecto presenta una idea clara y con proyección a utilizarse en diferentes lugares de la ciudad, establecer una red inalámbrica con sensores que permitan obtener valores de emisiones de CO₂, lo que contribuye al manejo y control diario por parte de las entidades reguladoras. El Monitoreo del estado del ambiente es de suma importancia, ya que el crecimiento del parque automotor, de la industria en general y los avances tecnológicos han sido generadores importantes de contaminación a nivel mundial.

Existen diferentes Parques Metropolitanos destinados particularmente a que las personas puedan ir, respirar aire puro y realizar actividades físicas que contribuyan a tener un estado de salud aceptable.

Por otro lado, muchos usuarios acuden diariamente a diferentes horas a distintos lugares de esparcimiento y entretenimiento en exteriores en la ciudad de Quito, por ejemplo: parques, bulevares, patios de comidas, lugares para degustar y en muchos casos realizar actividades físicas al aire libre. A través de nuestra red WSN podremos obtener un índice de contaminación, que permita determinar la influencia de las emisiones producidas por los vehículos que transitan a sus alrededores.

Determinar el impacto que llegan a producir las emisiones de CO₂ en una ciudad a nivel ambiental, los lugares y tiempos de mayor exposición principalmente a los usuarios que acuden a estos lugares de entretenimiento en exteriores en la ciudad de Quito.

Actualmente en la ciudad de Quito la mayor parte de emisiones de CO₂ son producidas por el parque automotor. Esto hace que la ciudad tenga un índice de contaminación preocupante en ciertos sectores. La Secretaría del Ambiente ha conformado una red metropolitana que permite monitorear el estado del ambiente en diferentes sectores localizados estratégicamente en la ciudad de Quito, enfocado en determinar el grado de acumulación de emisiones de diferentes contaminantes en un periodo de tiempo.

En las secciones siguientes se mencionará más a detalle los lugares de mayor afluencia por parte de las personas; de igual forma, se mencionará los diferentes contaminantes que existen en el aire, particularmente el CO₂, en el cual nos enfocamos como contaminante principal para el estudio del presente proyecto.

2.1 Lugares de Concentración Masiva de Personas en la Ciudad de Quito y Exposición a Contaminación

En el Distrito Metropolitano de la ciudad de Quito, existen varios lugares de entretenimiento, paseo y deleite de una gran variedad de comidas típicas de nuestro país. La gran mayoría de estos lugares se encuentran a la intemperie; es decir, de forma externa.

Existen muchos lugares conocidos por la mayoría de quiteños y muy concurridos de forma diaria; en el presente capítulo mencionaremos brevemente tres lugares; entre los más populares tenemos: La Plaza Foch, La Floresta y el Bulevar Naciones Unidas. Quito cuenta con una gran cantidad de población; específicamente con 2 millones 239 mil 191 habitantes, y con una proyección para el año 2020 de cerca de 2 millones 781 mil 641 personas (Diario La Hora, 2013).

A continuación, se mencionará algunas características de los lugares de estudio para el presente proyecto.

- **La Plaza Foch**

La Plaza Foch es un lugar de entretenimiento ubicado en el cruce de las calles Mariscal Foch y Reina Victoria como se puede ver en la Figura 41.



Ubicación de la Plaza Foch

En la Plaza Foch se puede encontrar bares, restaurantes, cafeterías, un ambiente de fiesta que saca a flote el lado cosmopolita de Quito como se ve en la Figura 42.



Una gran cantidad de personas acuden a este lugar a todas horas del día durante los 365 días del año. La Plaza Foch es un lugar que no solo atrae a muchas personas sino también a una gran afluencia de vehículos que contaminan el ambiente e influyen en la salud de los usuarios que asisten a este conocido lugar.

- **Bulevar Naciones Unidas**

El bulevar Naciones Unidas es un lugar que acoge al arte al aire libre, enlaza las principales avenidas comerciales del Quito moderno; el cual se presenta como un espacio seguro para la movilidad de las personas y de entretenimiento. Aquí se puede observar exposiciones culturales, exhibiciones fotográficas y esculturas de gran calidad.

El Bulevar Naciones Unidas acoge a gran cantidad de quiteños y turistas y que forma parte del parque de la carolina como se puede observar en la Figura 43.



El Bulevar Naciones Unidas se encuentra ubicado entre la Av. Naciones Unidas y Av. De los Shyris como se puede observar en la Figura 44. Cerca de dos avenidas bastante concurridas por los vehículos, está expuesto a la contaminación producida por el parque automotor del sector, un lugar ideal para realizar un monitoreo de CO₂ que pueda afectar a las personas que circulan por este bulevar.



Figura 44. Ubicación Bulevar Naciones Unidas

- **Parque de La Floresta**

Gran cantidad de personas entre vecinos, transeúntes, oficinistas y niños acuden a este conocido parque, donde pueden degustar de múltiples comidas en compañía de sus seres queridos, es un lugar de gran concurrencia de personas.

Ubicado en las cercanías del Coliseo General Rumiñahui como se puede observar en la Figura 45, es un lugar expuesto a factores de contaminación producidos tanto por el parque vehicular existente en el sector como de los comerciantes para la preparación de las comidas.

El monitoreo de estos factores en este sector es importante para verificar el estado del aire que permita a los ciudadanos seguir acudiendo a este lugar sin esperar tener algún tipo de riesgos en su salud.



Figura 45. Ubicación Parque de la Floresta

Todos estos lugares muy concurridos por los quiteños se encuentran ubicados dentro de la ciudad como se puede observar en la Figura 46 y expuestos a diferentes contaminantes en el aire particularmente la existencia de CO₂ producido por los vehículos. Quito al ser una ciudad en crecimiento, el incremento de la población conlleva al incremento de medios de transporte que contaminan el ambiente y producen afecciones en la salud de quienes se encuentran expuestos.

Esto hace que se busque diferentes formas de controlar y monitorear las emisiones de CO₂ en la ciudad, como se mencionará en la sección 2.2.2.4.5 “*Monitoreo de los Niveles de CO₂*” de monitoreo de CO₂. El Municipio de Quito ha implementado ya hace algunos años el sistema de pico y placa reduciendo diariamente en un 20% el tráfico vehicular y por ende la cantidad de emisiones producidas directamente al aire.

Actualmente Quito cuenta con un parque automotor aproximado de 468 mil 776 vehículos que circulan en la ciudad (Agencia Metropolitana de Tránsito, 2012). Los chequeos realizados por la ANT (Agencia Nacional de Tránsito), contribuyen con la reducción de contaminantes producidos por los vehículos automotores.

Al no existir un control de contaminación en estos lugares de gran concentración de personas, se propone una forma de monitoreo de existencia de CO₂ en el ambiente en dichos lugares de concentración masiva de personas.

En particular, estos lugares de concentración pública llevan gran cantidad de usuarios a diferentes horas, periodos que pueden ser monitoreadas a través de una red WSN por medio de sensores interconectados; dichos sensores se encuentran localizados a la distancia adecuada permitiendo obtener las emisiones existentes de CO₂ producidas en el lugar en este periodo de tiempo de horas y días de la semana.



En la siguiente sección detallaremos más a profundidad los temas de contaminación y las razones por las que este proyecto contribuye al monitoreo y control de las emisiones producidas en estos sectores de la ciudad de Quito.

2.2 Contaminación Ambiental

La presencia de cualquier tipo de agente físico, químico o biológico en un lugar determinado que pueda ser nocivo, perjudicial o que afecte el bienestar de la población y la vida en general es considerada contaminación ambiental.

A diferencia del resto de seres vivos (animales y plantas), que a través de los años de evolución se han ido adaptando al medio que los rodea, viviendo con lo que la naturaleza les ofrece, el hombre ha ido modificando y adaptando este mismo medio acorde a sus necesidades.

El crecimiento acelerado de la población y el avance progresivo que ha tenido la tecnología han producido la alteración constante del medio ambiente y en muchos casos atentando el equilibrio biológico normal de la Tierra.

La contaminación ambiental es en principio el problema más importante que afecta al mundo en general; esto sucede al existir un desequilibrio o incompatibilidad con el desarrollo tecnológico, el avance de la civilización y el mantenimiento del equilibrio ecológico.

Se considera fuente de emisión al origen físico o geográfico en el cual se produce liberaciones contaminantes para el ambiente a través del aire, agua o suelo. Se puede nombrar distintas fuentes generadoras de contaminación que por su grado de influencia son consideradas importantes; entre ellas tenemos: las industriales, comerciales, domiciliarias y fuentes móviles (Aguilar, 2012).

Es de suma importancia que la humanidad tenga presente la disponibilidad de los recursos renovables y no renovables, sabiendo que los no renovables al agotarse no serán capaces de regenerarse. Un ejemplo claro de este tipo de recurso no renovable es el agua, fuente de toda vida y de diferentes actividades diarias.

2.2.1 Tipos de Contaminación Ambiental

A continuación, se presenta los principales tipos de contaminación ambiental existentes como Loaiza (2012) menciona.

Contaminación Acústica:

Se considera contaminación acústica a la producida por una excesiva cantidad de ruidos o vibraciones consideradas desagradables, generando un desequilibrio temporal en las funciones normales del ser humano. Aplica directamente a ruidos o sonidos que no son producidos naturalmente.

Contaminación Lumínica:

Se considera contaminación lumínica al uso excesivo y prolongado de luz producida de forma artificial, alterando actividades y ciclos naturales de la vida silvestre. En términos más prácticos se considera también contaminación lumínica a la producida en los hogares que puedan afectar al entorno que lo rodea.

Contaminación del Aire

La contaminación del aire es producida por la presencia de agentes externos como humo, polvo y gases nocivos que ingresan a la atmosfera alterando el sistema y perjudicando a plantas, animales y seres humanos.

2.2.2 Contaminación del Aire

Existe una gran variedad de contaminantes en el aire que perjudican directamente a la vida en el planeta. El crecimiento y desarrollo de grandes industrias, tecnológicas y comerciales han generado grandes niveles de contaminación con grandes afectaciones en la salud y la calidad de vida de los seres vivos expuestos.

En las grandes ciudades, la emisión de CO₂ en particular producida por el parque automotor, contamina el ambiente y perjudica la salud de las personas que se encuentran expuestas a este tipo de emisiones. Es de gran importancia la armonía que debe existir entre el desarrollo que tiene el ser humano con el ambiente que lo rodea, teniendo en cuenta que los recursos utilizados para las diferentes actividades son en muchos casos no renovables y en algún punto en el tiempo dejarán de existir.

2.2.2.1 Contaminantes Comunes en el Aire

El presente estudio se encuentra enfocado en el monitoreo de la contaminación producida en el aire actualmente, particularmente la existencia de CO₂ (Dióxido de Carbono); de igual manera se mencionará brevemente la existencia de otros contaminantes comunes presentes en el aire.

Tabla 11. Contaminantes más Comunes Presentes en el Aire

Ozono (O ₃)	Gas inodoro e incoloro compuesto netamente de tres átomos de oxígeno. Al nivel del suelo el ozono es un contaminante peligroso. Formado al unirse con contaminantes emitidos por vehículos automotores entre otros
Material Particulado (PM)	Está conformado en su mayoría por partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. Las diferentes actividades realizadas por el ser humano son factores directos de la emisión de PM.
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Gas incoloro y reactivo que es producido durante la quema de combustibles que contienen azufre, ciertos derivados del petróleo, metales fundidos y durante otro tipo de procesos industriales.
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Gas altamente reactivo, es formado al combinarse el óxido nítrico (NO) junto al Oxígeno del aire.
Monóxido de Carbono (CO)	Conocido como un gas incoloro e inodoro. Es Formado por los combustibles al no quemarse completamente, preferentemente en los motores de los vehículos.
Dióxido de Carbono (CO ₂)	El dióxido de Carbono es un gas denso e incoloro y poco reactivo. Este contaminante forma parte de la capa de la atmosfera que se encuentra más próxima a la Tierra.

Tomado de Secretaría del Ambiente (s.f.)

Como se puede observar en la Tabla 11, existen varios contaminantes considerados los más comunes en el aire y que tienen efectos importantes sobre la salud humana, afectando principalmente a personas que son más sensibles; por ejemplo, niños pequeños, ancianos y finalmente aquellos que sufren de afecciones respiratorias o cardiovasculares crónicas.

Desde algunos años se ha ido incrementando el volumen existente en el aire, debido a la elevada producción e incremento de vehículos y demás tecnologías que producen CO₂.

2.2.2.2 Efectos de la Contaminación del Aire Sobre la Salud Humana

Los diferentes contaminantes mencionados en la sección anterior, producen reacciones y afecciones directas en la salud de las personas, por ejemplo; irritación en el sistema respiratorio, causando efectos como tos, irritaciones fuertes en la garganta e incomodidad en la zona del pecho.

Pueden llegar a reducir el funcionamiento pulmonar provocando la difícil respiración de la persona y limitando su capacidad de realizar ejercicios o actividades que requieran un buen funcionamiento de los pulmones.

En casos especiales como asma, la contaminación del aire puede agravar sus síntomas produciendo ataques que requieren atención médica urgente y medicamentos. Grandes emisiones producen alergias reduciendo las defensas y en casos especiales produce ataques en gran magnitud.

Se consideran individuos sensibles a niños que se encuentran expuestos gran tiempo en exteriores, adultos que tiene como rutina realizar actividades físicas en exteriores e individuos con enfermedades respiratorias.

Al existir una gran concentración de CO (Monóxido de Carbono) y CO₂ (Dióxido de Carbono), puede haber afecciones como dolor de cabeza, mareos, hasta posibles pérdidas de conocimiento y muerte en algunos casos.

Personas con enfermedades cardiovasculares (sistema circulatorio) son en su mayoría sensibles a efectos producidos por el CO y el CO₂. Mujeres embarazadas, bebés en gestación y recién nacidos, pueden llegar a

experimentar riesgos sumamente altos debido a la concentración de emisiones tóxicas.

Exposiciones prolongadas incrementa la sensibilidad a infecciones a nivel pulmonar cambiando de forma permanente la funcionalidad de los pulmones. Se incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias a corto y mediano plazo.

De acuerdo a lo antes mencionado la exposición prolongada a grandes cantidades de emisiones de CO₂, principalmente a las personas expuestas en lugares cercanos a las fuentes generadoras de contaminación, llegan a tener efectos en su salud a corto y largo plazo.

La exposición diaria a emisiones puede afectar a más de un individuo en los lugares de concentración masiva de personas.

El dióxido de carbono se revisará de forma más completa en la siguiente sección permitiendo conocer la composición química, las fuentes que generan las emisiones de CO₂ y las afecciones que se producen a la salud de las personas.

2.2.2.3 Norma Vigente Sobre la Contaminación del Aire

- **Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 017:2008 (Control de Emisiones Contaminantes de Fuentes Móviles Terrestres)**

Los siguientes límites de emisiones permitidos son para aquellos vehículos de transporte con motor a gasolina. Durante su funcionamiento en condiciones de marcha mínima y a una temperatura de operación normal, no debe emitir CO e hidrocarburos (HC) al aire en cantidades superiores a las mostradas en la Tabla 12.

Tabla 12. Límites de Emisiones Máximos Permitidos para Fuentes Móviles con Motor a Gasolina.

Año modelo	% CO*		ppm HC*	
	0 - 1 500 **	1 500 - 3 000 **	0 - 1 500 **	1 500 - 3 000 **
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1 000	1 200

* Volumen
 **Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).

Tomado de Agencia Nacional de Tránsito (2012)

La ANT realiza un control de emisiones producidas por el parque automotor, este procedimiento se lo realiza durante los procesos de revisión vehicular anualmente para la obtención de su debida aprobación. El control que se realiza se lo hace directamente en el tubo de escape del vehículo, con el fin de obtener una medición de gas contaminante del automotor.

Este procedimiento no es específicamente para medición de CO₂, pero es una forma de determinar el grado de contaminación producido por el vehículo en cuanto a los gases más comunes producidos por el automotor.

La idea de crear una red inalámbrica de sensores (WSN) con una configuración en árbol como se detallará en el Capítulo 3 “Diseño e Implementación de Red WSN para Monitoreo de CO₂”, es monitorear inalámbricamente las emisiones producidas de CO₂ en periodos de tiempo estimados a nivel de tierra, es decir que influyan directamente a las personas que transitan o permanecen situadas en el lugar donde la emisión de CO₂ se ha producido.

Con el fin de obtener un índice de emisión de CO₂ a través de múltiples mediciones recolectadas en los nodos finales. Este prototipo diseñado con fines demostrativos permitirá monitorear grados de contaminación existentes en diferentes lugares de la ciudad, generando un valor promedio de emisiones y controlar la contaminación existente. Una red diseñada para generar índices de contaminación producidos en el lugar en el que se sitúe la red, que puede ser reproducida a mayor escala en caso de ser necesario.

En la siguiente sección se mencionará más a detalle el diseño del prototipo de red WSN para el monitoreo de CO₂.

A continuación, se mencionará el Dióxido de Carbono (CO₂) como el contaminante principal de estudio del presente proyecto.

2.2.2.4 El Dióxido de Carbono (CO₂)

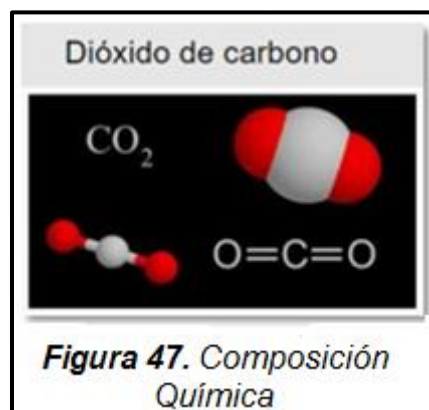
El CO₂ siendo uno de los gases menores más importantes, se genera de diferentes formas: fenómenos tectónicos, procesos de suelos, combustión de compuestos a base de carbono y evaporación oceánica.

Actualmente la concentración de emisiones de CO₂ ha superado las 400 ppm (partes por millón); cada año este valor ha ido incrementándose como consecuencia de la acción antropogénica; es decir, quema de combustibles, procesos industriales entre otros (Abelló Linde SA, s.f.).

El aumento de producción de CO₂ en el ambiente es causado principalmente por factores como el uso de combustibles llamados fósiles (gas, carbón, petróleo y sus derivados). El incremento del nivel de dióxido de carbono ocasiona cambios climáticos bastante considerables.

2.2.2.4.1 Definición de CO₂

Dióxido de carbono, considerado un gas incoloro, inodoro, poco reactivo y denso, ligeramente ácido y no inflamable. El CO₂ es una composición química perteneciente a la troposfera (la capa de la atmósfera más cercana a la Tierra). El CO₂ es soluble en agua al ser sometido a una presión constante, está formado por una molécula lineal, un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno de la forma O = C = O, como se puede observar en la Figura 47.



En condiciones y temperaturas normales se encuentra al CO₂ en forma gaseosa, llega a solidificarse a temperaturas inferiores a -79° C, y disolverse en agua.

- **Propiedades Físicas del Dióxido de Carbono:**
 - **Formula Química:** CO₂
 - **Masa Molecular:** 44.0 g/mol
 - **Densidad relativa del gas (aire = 1g/ml):** 1.5 g/ml

2.2.2.4.2 Fuentes Generadoras de CO₂

- **Fuentes Naturales:** Son la respiración producida por el ser humano y animales, la descomposición de material orgánico en diferentes lugares, los incendios forestales producidos intencionalmente por el ser humano y los residuos olvidados en los bosques o a su vez incendios forestales naturales generados por las altas temperaturas ambientales.

Una fuente importante de emisión son los denominados procesos fotosintéticos, procesos de respiración, componentes alimentarios y de plantas que se empiezan a oxidar para obtener energía.

- **Fuentes Antrópicas:** Son producidas principalmente por la quema de combustibles fósiles, fuentes de energía provenientes de restos de plantas y animales. Según la Agencia de protección Ambiental (EPA, *Environmental Protection Agency*) existen tres combustibles fósiles: el carbón, el gas natural y el petróleo. La quema de todos ellos a mediano y largo plazo tienen efectos que son considerados perjudiciales para la salud humana y efectos permanentes en el medio ambiente.

2.2.2.4.3 Efectos Ambientales de las emisiones de CO₂

Aparentemente gran cantidad de CO₂ atmosférico permaneció estable por mucho tiempo en aproximadamente 260 ppm (partes por millón). Durante los últimos años el CO₂ existente en la atmosfera ha incrementado a 400 ppm, la utilización sin control de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y derivados ha generado el incremento bastante considerable de emisiones de CO₂ hacia la atmosfera (Robinson, Robinson y Soon, 2013, p. 5).

Lo más crítico de las emisiones de CO₂, es el aumento de temperatura en la tierra a través de un proceso llamado (efecto) invernadero. La acumulación de CO₂ atmosférico llega a detener el enfriamiento normal que tiene el planeta tierra. El CO₂ absorbe las radiaciones que la tierra emite y escapan hacia el espacio exterior.

El calentamiento global de nuestra atmósfera llegaría a tener efectos graves para el medio ambiente, acelerando la fusión de los casquetes polares,

incrementando el nivel de los mares existentes, existiría un cambio climático considerable, alteraría la vegetación y las cosechas.

2.2.2.4.4 Efectos del CO₂ Sobre la Salud Humana

El dióxido de carbono se evapora con rapidez al estar en su estado líquido, produciendo una saturación casi total en el aire, generando grave riesgo sobre la salud humana, como se describe a continuación (Secretaría del Ambiente, 2013).

Una liberación excesiva de CO₂ en un área con poca o casi nada de ventilación, podría producir asfixia al disminuirse la concentración existente de oxígeno.

El CO₂ al estar en contacto directamente con la piel y los ojos puede llegar a provocar efectos de congelación criogénico sumamente graves, produciendo en muchos casos la muerte.

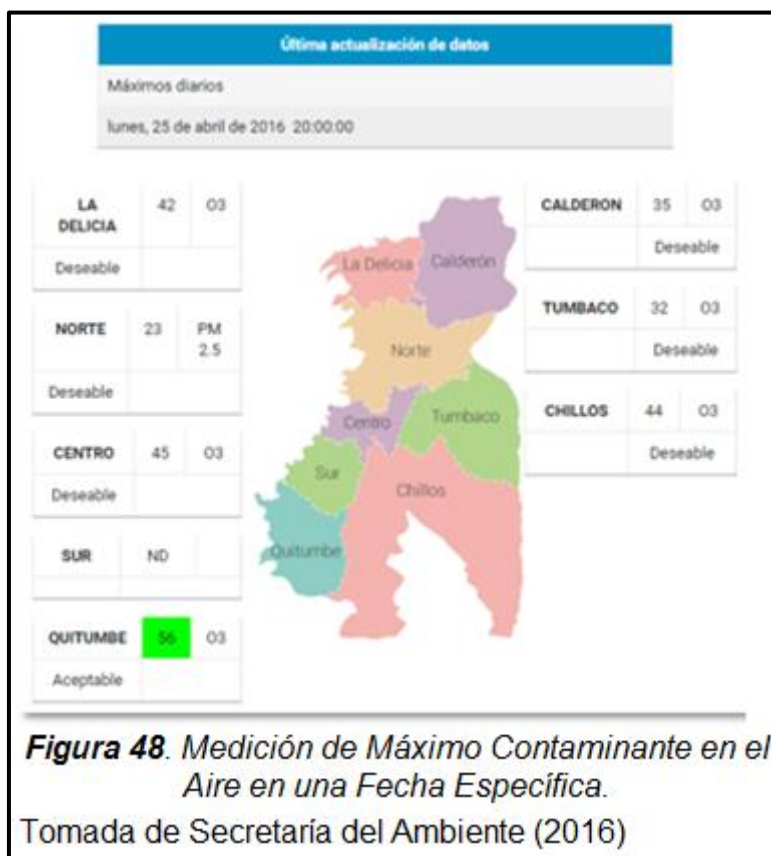
Tabla 13. Efectos Sobre la Salud a Diferentes Escalas de Emisiones de CO₂

EFECTO DE LOS DISTINTOS NIVELES DE CO ₂	
CONCENTRACIÓN	EFECTO
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

Como se puede observar en la Tabla 13, el ser humano al inhalar grandes concentraciones de dióxido de carbono puede provocar diferentes síntomas de afecciones en la salud. Una persona expuesta a prolongada o repetitiva exposición a emisiones de CO₂ puede provocar variaciones en el metabolismo normal de la persona.

2.2.2.4.5 Monitoreo de los Niveles de CO₂ en Quito

Actualmente en el Distrito Metropolitano de Quito no se realiza una medición específica dedicada a las emisiones de CO₂ producidas en el aire, debido a la existencia de varios contaminantes comunes en el aire como se mencionó en la sección anterior 2.2.2.1 “Contaminantes Comunes en el Aire”. La Secretaria del Ambiente ha formado una Red Metropolitana Ambiental localizada en diferentes lugares de la ciudad de Quito en distintos sectores de la ciudad (Carapungo, Cotocollao, Jipijapa, Belisario, El Camal, Centro, Guamaní, Tumbaco, Los Chillos), lugares considerados estratégicos por su posición geográfica, por la afluencia vehicular y existencia de contaminantes ambientales en su gran mayoría.



Cada estación toma mediciones por tiempos; específicamente cada 10 minutos se realiza una medición del área en donde existe la acumulación de contaminantes en el aire.

Como se puede observar en la Figura 48, cada estación ha generado un valor, en este caso el mayor contaminante producido en el ambiente fue el O₃ (Ozono), donde el grado de contaminación producida se encuentra en niveles deseables o aceptables, y no existe un riesgo en la salud de las personas que se encuentran en estos sectores.



La Secretaría del Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito ha establecido rangos de medición como se puede observar en la Figura 49. Estos rangos permiten determinar el nivel de contaminación y definir el riesgo existente en las estaciones definidas para las mediciones.

En un rango de 0 – 100 el nivel de contaminación está definido entre deseable-aceptable. Para niveles superiores se genera una alerta de precaución de gases o sustancias contaminantes y perjudiciales para la salud en un rango entre 101 – 300.

Los dos últimos niveles son considerados de riesgo y emergencia ambiental, niveles superiores a 301 hasta 500, están considerados como eventos críticos de contaminación del aire.

En la Tabla 14, se puede visualizar el IQCA (Índice Quiteño de Calidad del Aire) para cada contaminante, los valores máximos y mínimos para determinar el nivel de contaminación aceptable – emergente.

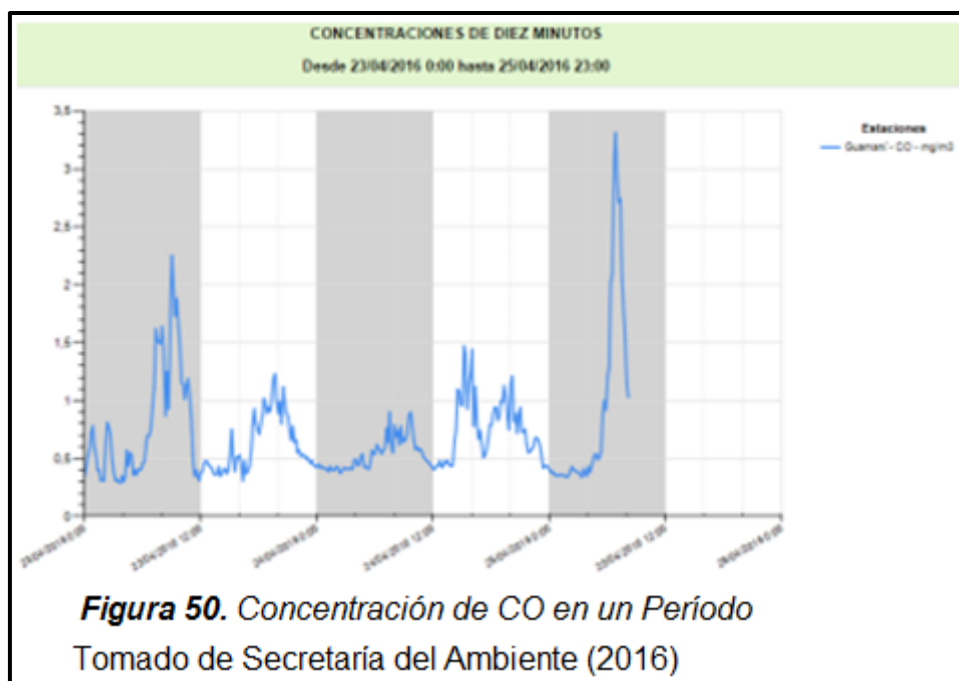
Tabla 14. Límites Numéricos, Niveles de Contaminación del Aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Rango	Categoría	CO ^a	O ₃ ^b	NO ₂ ^c	SO ₂ ^d	PM _{2.5} ^e	PM ₁₀ ^f
0-50	Nivel deseable u óptimo	0-5000	0-50	0-100	0-62.5	0-25	0-50
51-100	Nivel aceptable o bueno	5001-10000	51-100	101-200	63.5-125	26-50	51-100
101-200	Nivel de precaución	10001-15000	101-200	201-1000	126-200	51-150	101-250
201-300	Nivel de alerta	15001-30000	201-400	1001-2000	201-1000	151-250	251-400
301-400	Nivel de alarma	30001-40000	401-600	2001-3000	1001-1800	251-350	401-500
401-500	Nivel de emergencia	>40000	>600	>3000	>1800	>350	>500

Tomado de Secretaría del Ambiente (2016)

- **Reporte de calidad del aire**

Una vez establecido el periodo en el que se desea obtener las mediciones de contaminación producidas se elabora un reporte de calidad del aire. El siguiente reporte muestra una gráfica que permite visualizar los datos tomados en un periodo de tiempo establecido y así saber la cantidad de emisiones obtenidas por las diferentes estaciones de algunos de los principales contaminantes del aire.



El la Figura 50 muestra la concentración de monóxido de carbono existente en la Estación localizada en el sector de Guamaní en un periodo conformado por tres días. Se puede definir valores pico para cada día.

Entre los dos primeros días aparece un pico máximo de contaminación con un valor de 2.3 mg/m³ a una hora específica del día, 8:00am. El valor mínimo como se puede ver es 0.3 mg/m³ en varias horas del día; por ejemplo, 04:00am, 12:00pm, 16:00pm. Esto equivale a valores que se presentan en un fin de semana normal.

El último día corresponde al inicio de semana, con un pico de 3.3 mg/m³ entre las 6:00am – 6:45am. Siendo un valor de concentración de monóxido de carbono elevado a comparación de otros días.

- **IQCA (Índice Quiteño de Calidad del Aire)**

El MDMQ (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito), por medio de la secretaria del ambiente permite dar a conocer información verídica relacionada a la calidad del aire en la ciudad de Quito y la variabilidad de procedimientos que se están realizando para el mejoramiento de la calidad de vida en la ciudad.

El IQCA ha logrado proporcionar la información sobre la contaminación con términos técnicos fáciles de entender para la ciudadanía; esto es datos generalizados como la definición de la unidad de medida de los contaminantes, definiéndola en microgramos por metro cúbico (ug/m³) en lugar de partes por millón (ppm). Se utiliza una nomenclatura de numeración capaz de definir rangos que permitirán mostrar el estado del aire en un periodo de tiempo, proporcionando niveles de contaminación. Así se determina los efectos que estos contaminantes llegarían a tener sobre la salud humana.

3. Capítulo III. Diseño e Implementación de una Red WSN para Monitoreo de Niveles de CO2

3.1 Diseño de la Red WSN

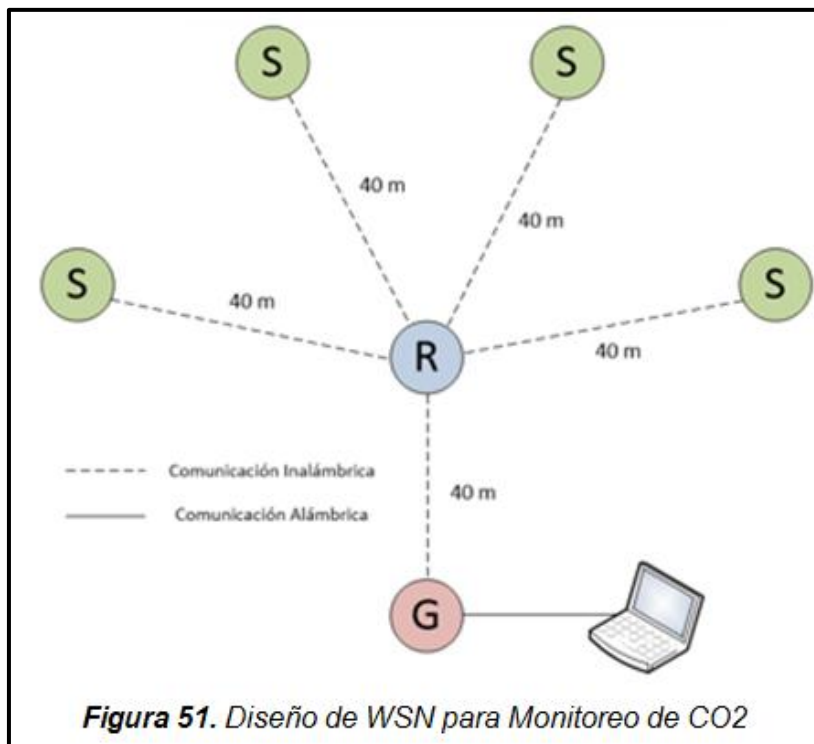
Para el diseño de la red inalámbrica de sensores se ha optado por una red tipo árbol, con la finalidad de lograr mayor alcance en el entorno seleccionado.

Se consideran tres partes bien diferenciadas que cumplen con las características del protocolo ZigBee y son:

- **Un Nodo Coordinador.** - Pasa la información a una estación base, en este caso un ordenador.
- **Un Nodos Router.** - Encaminan la información hacia el nodo coordinador o Gateway.
- **Cuatro Nodos Finales.** - Contienen los sensores para la toma de información.

Los elementos mencionados forman la red inalámbrica de sensores que se observa en la Figura 51. En este diseño se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los nodos finales están en modo dormido (*sleep*) la mayor parte del tiempo a fin de conservar lo más posible sus baterías.
- Todos los nodos se adapta un panel solar para cargar su batería. Debido a que los nodos deben estar enviando información todo el tiempo, necesitan gran capacidad de energía.
- El nodo Coordinador o Gateway está alimentado directamente por la PC.
- La distancia máxima entre dos nodos es 40m debido a la limitación de los transceptores XBee Series 2.



3.2 Diseño de la Aplicación para Gestión y Monitoreo de CO₂

El lenguaje utilizado para la elaboración de la aplicación es C#, debido a la disponibilidad de licencias de Visual Studio 2012 en la universidad, que permite el libre desarrollo con esta herramienta; además, es una poderosa herramienta, con la cual se puede desarrollar aplicaciones de gran alcance. La base de datos se construye con SQL Server 2012, ya que se puede integrar fácilmente con aplicaciones desarrolladas con Visual Studio.

La aplicación se divide en 3 partes importantes: La primera parte es una interfaz para gestión del sistema, en donde se configuran los parámetros iniciales para el posterior monitoreo. La segunda parte, es una interfaz de monitoreo, en la cual se selecciona el puerto serie al que está conectado el Gateway para iniciar la visualización de los datos que llegan de los nodos finales. Esta interfaz permite observar los valores obtenidos por los sensores en cada punto de la red, en tiempo real y almacenarlos en la base de datos. La tercera parte, es una interfaz de visualización de datos almacenados. Permite observar el historial de todos los datos obtenidos con su respectivo registro de fecha y hora; con estos registros, se podrá obtener diagramas que muestren el

grado de contaminación existente en el sector, así como tomar las decisiones pertinentes para mejorar el control sobre dichas emisiones. En el anexo 4 se adjunta el código fuente de la aplicación utilizada en este proyecto.

3.2.1 Diseño de la Base de Datos

La base de datos está conformada por 4 tablas, 3 de ellas están relacionadas y una de ellas es independiente. La primera tabla se denomina Nodo, en la que se almacenan los datos sobre el nodo en específico, como la dirección de su XBee, la ubicación del nodo en el mapa en términos de latitud y longitud, además de un nombre. La segunda tabla se denomina Sensor, en la que se almacena datos sobre el sensor que se utiliza en este caso el sensor de CO₂. La tercera tabla se denomina Medida, en la cual se almacena los valores obtenidos por los sensores, el registro de fecha y hora de la medición y el estado del valor; es decir, si el valor se encuentra dentro del límite permitido o si éste supero dicho límite. La cuarta tabla se denomina Limites, esta tabla es independiente de las demás; en esta, se define el valor límite que decidirá el estado de la medición.

La base de datos está diseñada para adaptarse, en caso que se requiera añadir nuevos nodos y nuevos sensores; por ejemplo, añadir sensores que permitan obtener mediciones de diferentes gases contaminantes como: CO, CH₄, material particulado, etc. En la Figura 52 se observa el diagrama de la base de datos utilizada en este proyecto.

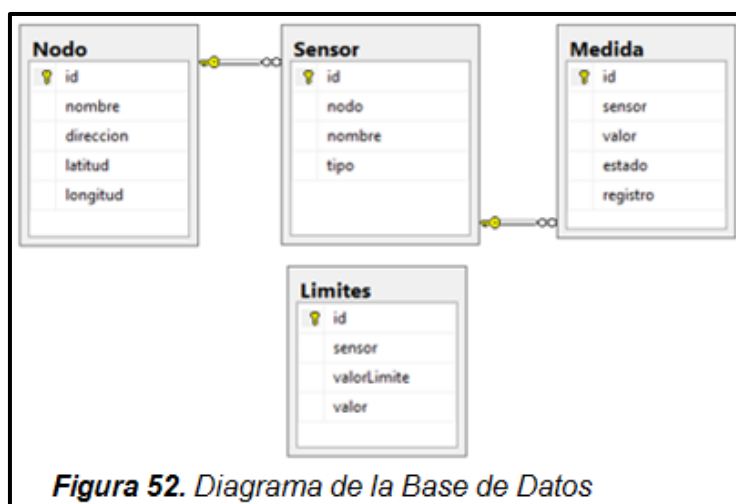


Figura 52. Diagrama de la Base de Datos

3.2.2 Interfaz Principal de la Aplicación

En la interfaz principal se observan las 3 partes en la que se divide la aplicación, como se mencionó anteriormente en la sección 3.2 “Diseño de la Aplicación para Gestión y Monitoreo de CO₂”. Esta será la interfaz principal de la aplicación. Consta de 3 botones que darán acceso a las interfaces encargadas de las tareas de monitoreo, base de datos y gestión.

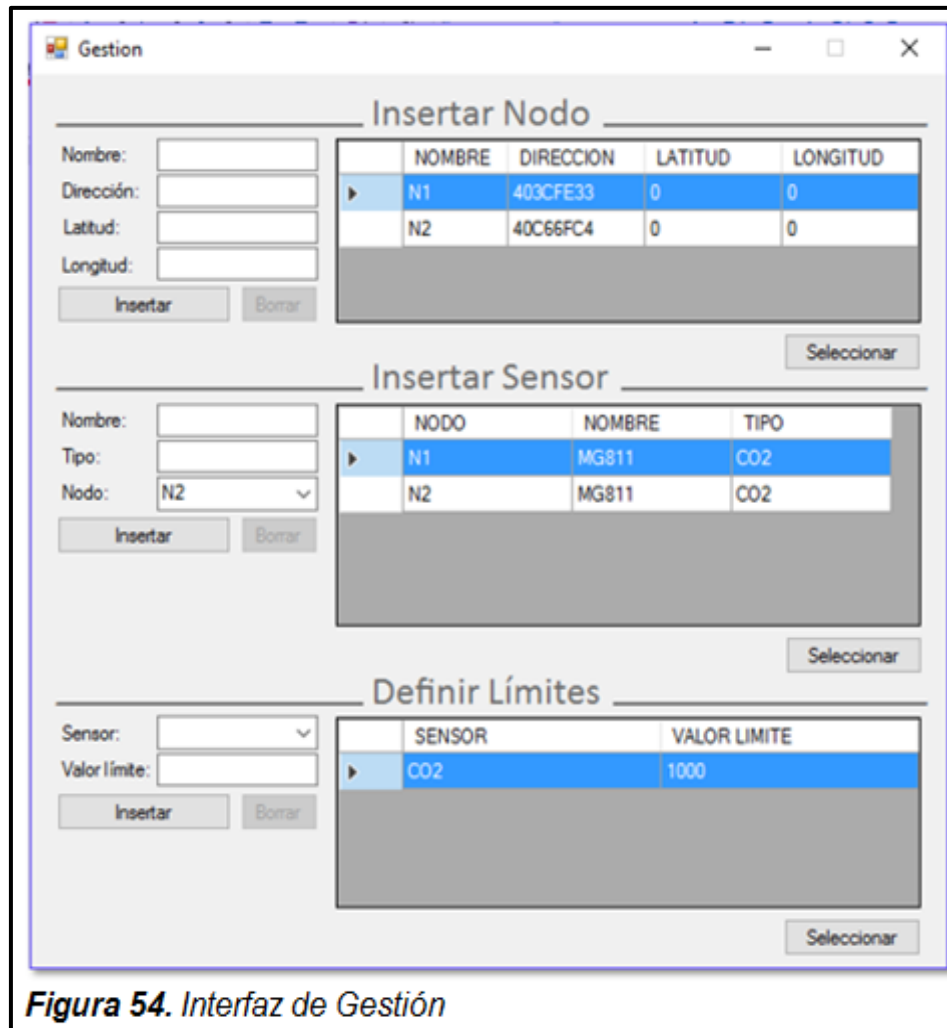
En la Figura 53 se observa el diseño de la interfaz principal de la aplicación.



Figura 53. Interfaz Principal

3.2.3 Interfaz de Gestión

La interfaz de gestión permite administrar la aplicación. En ella se ingresan los datos de nodos, sensores y los valores límites de las mediciones que se llevarán a cabo. Es necesario ingresar absolutamente todos los datos necesarios para poner en funcionamiento la aplicación. En el caso de este prototipo, se debe ingresar los dos nodos finales con sus respectivos sensores de CO₂; así mismo, se debe ingresar el valor límite de CO₂ permitido como se puede observar en la Figura 54.



3.2.4 Interfaz de Monitoreo

En la interfaz de monitoreo, se puede observar los datos recogidos por los sensores en tiempo real y saber a qué nodo pertenece dicha información. Para iniciar el monitoreo es necesario conectar el Gateway a un puerto serial de la estación base (PC). Los datos obtenidos son almacenados inmediatamente en una base de datos. Los niveles de CO₂ se pueden observar en un gráfico interactivo que incrementará si el nivel de CO₂ sube. Así mismo, se muestra toda la información de la trama de datos separada como se puede observar en la Figura 55.

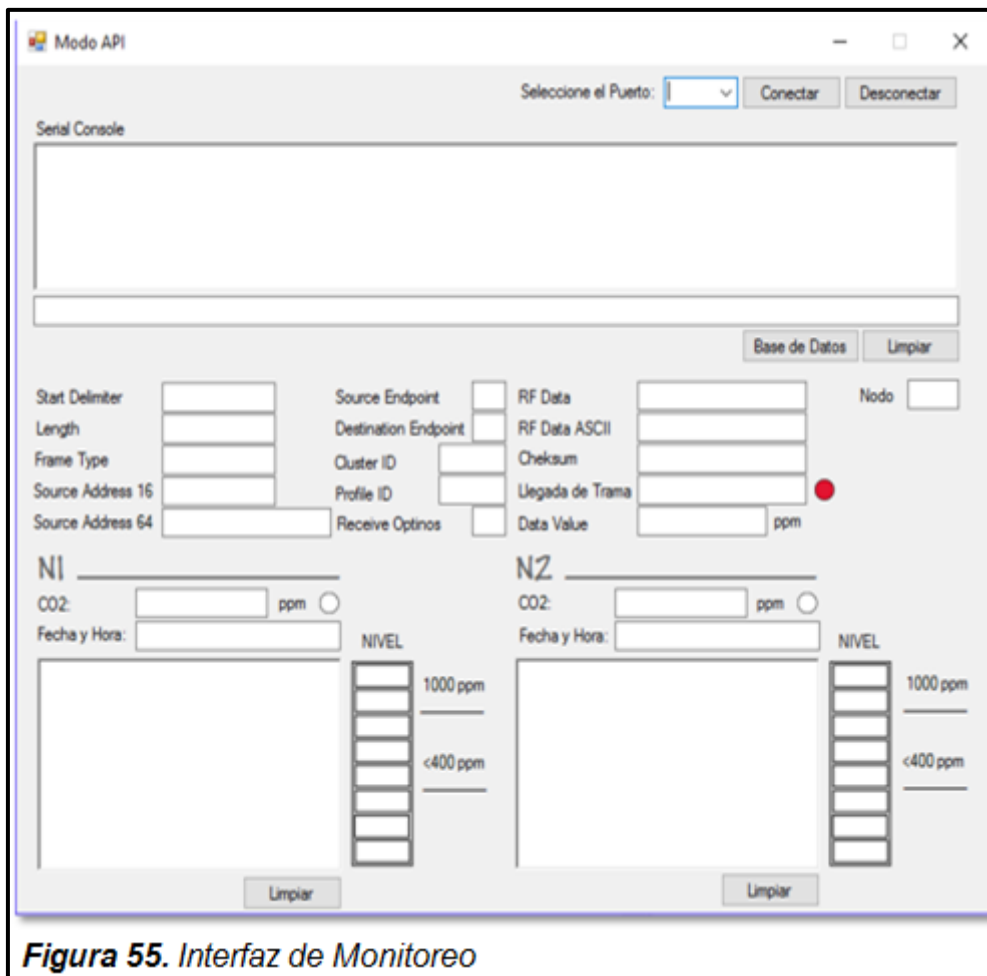


Figura 55. Interfaz de Monitoreo

3.2.5 Interfaz de Visualización de Datos

En la interfaz de visualización de datos, se puede observar todos los registros que fueron almacenados, cada uno de ellos con su respectiva fecha y hora del momento que se tomó la medición.

La interfaz posee filtros para la mejor interpretación de los datos. Con estos registros será posible interpretar toda la información en un resultado final, que se muestra en un diagrama en un periodo de tiempo versus niveles de CO₂, como se puede observar en la Figura 56.

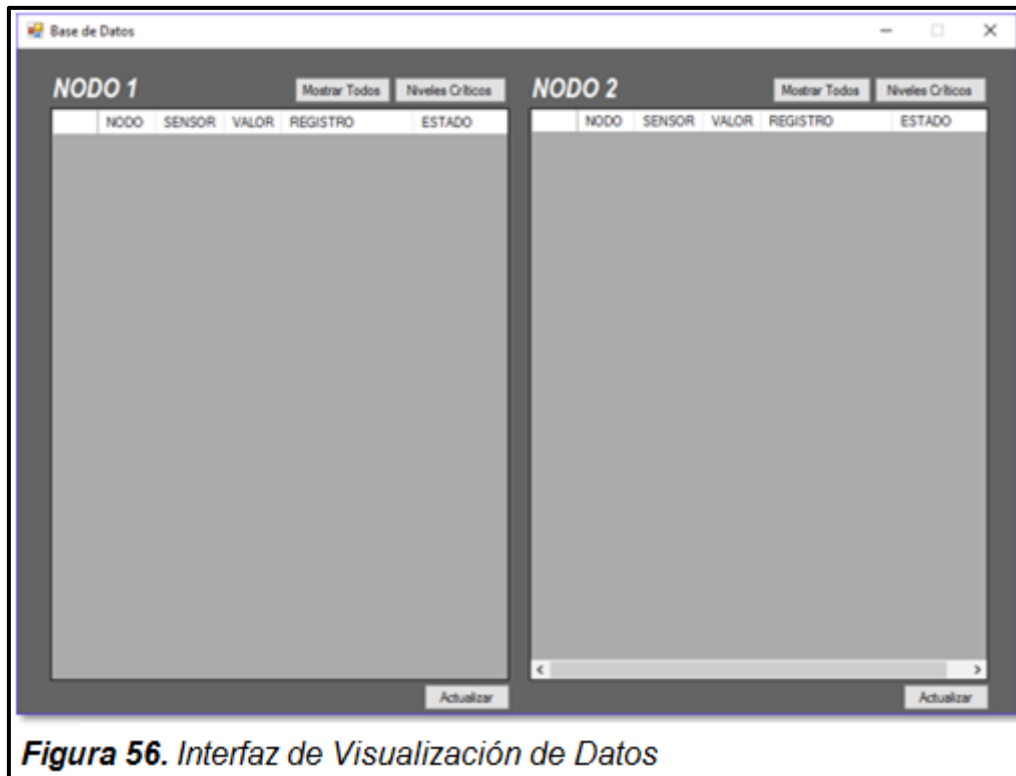
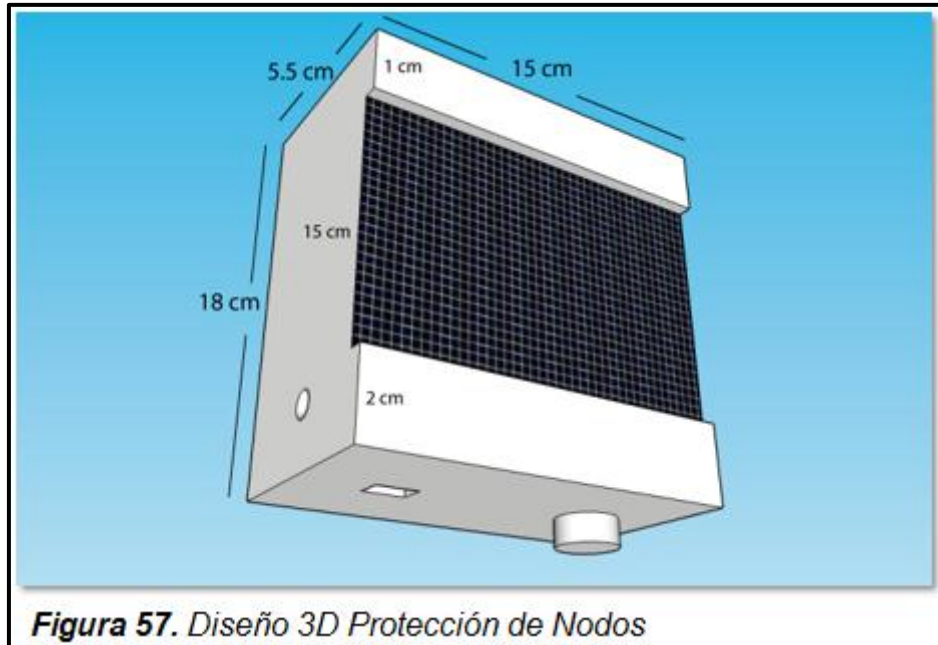


Figura 56. *Interfaz de Visualización de Datos*

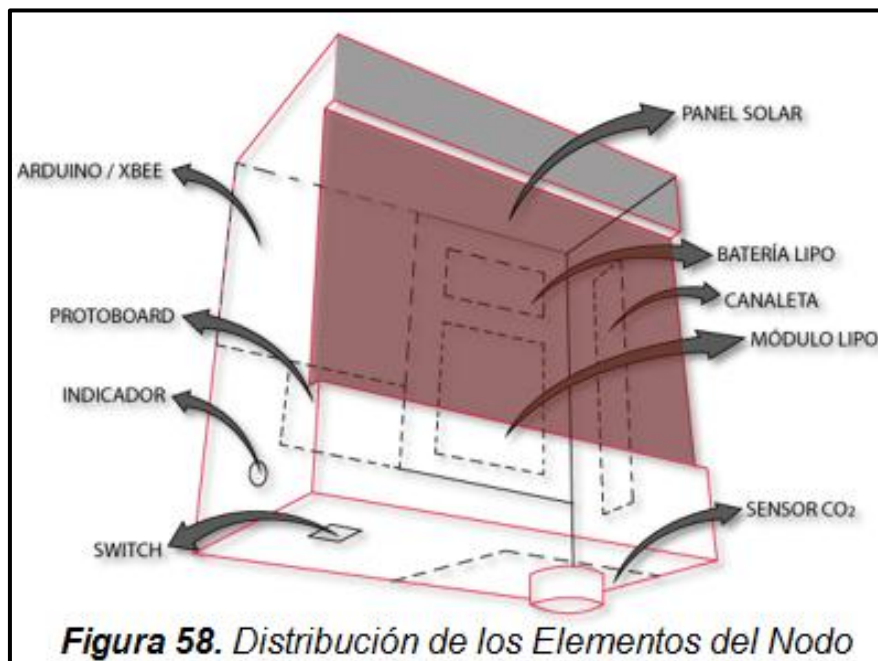
3.3 Implementación de Red WSN y del Prototipo de Nodo Sensor

3.3.1 Construcción de los Nodos Sensores

Los nodos se construyen tomando en cuenta las condiciones que se pueden presentar en el campo de implementación. Se toma en cuenta que los nodos están expuestos en todo momento a condiciones climáticas por ejemplo humedad, lluvia, calor y temperatura; por lo que, se ha decidido construir protecciones para los nodos, que constan de una caja de material ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) en donde se alojan todos los elementos que electrónicos que forman parte del nodo. A continuación, en la Figura 57, se muestra el diseño 3D de la protección para los nodos.



Los nodos tienen adaptado un switch, el cual permite accionar el envío de datos, a fin de sincronizar el dispositivo con la aplicación; además incorpora un led indicador que muestra que el nodo se encuentra enviando información. En la Figura 58 se muestra la distribución de los elementos que se serán parte de los nodos finales.



En la Figura 59 se observa un nodo construido. El resto de nodos serán iguales; a diferencia del nodo Gateway que no necesita mayor protección, ya que éste operará en el interior de una localidad.

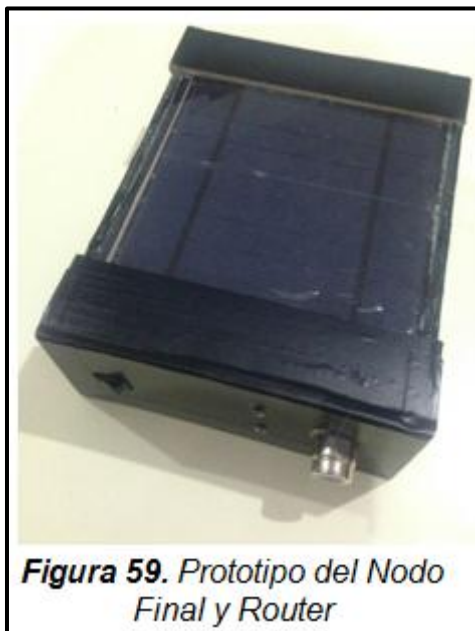


Figura 59. Prototipo del Nodo Final y Router

3.3.2 Configuración de los Nodos Sensores

Por tratarse de un prototipo se utilizan únicamente 2 nodos finales. Los XBee se configuran mediante el software XCTU. En la Tabla 15 se observan las direcciones únicas de cada módulo XBee. Todos los nodos pertenecientes a la red deben tener un mismo ID de red PAN, en este caso se configura el parámetro ID con el valor de 10. Se puede utilizar cualquier número en el rango de 0 - 0xFFFF.

Tabla 15. Características de los Módulos XBee

	Nodo Coordinador	Nodo Router	Nodo Final 1	Nodo Final 2
SH	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200
SL	403B0CEE	40C66FD6	403CFE33	40C66FC4

3.3.2.1 Nodos Finales

Los nodos finales deben enviar hacia el Router la información que obtengan del entorno; por lo que, los parámetros DH y DL se configuran con la dirección del Router que será su destino; además se debe configurar un mismo PAN ID para todos los elementos de la red. En las Figuras 60 y 61 se observa la configuración de un nodo final. Estos nodos se configuran en modo AT ya que solo pasarán información. El firmware utilizado en este módulo es XB24-ZB ZigBee Router AT 22A7.

Networking	
Change networking settings	
ID PAN ID	10
SC Scan Channels	1FFE Bitfield
SD Scan Duration	3 exponent
ZS ZigBee Stack Profile	0
NJ Node Join Time	FF x 1 sec
NW Network Watchdog Timeout	0 x 1 minute
JV Channel Verification	Enabled [1]
JN Join Notification	Disabled [0]
OP Operating PAN ID	0
OI Operating 16-bit PAN ID	FFFF
CH Operating Channel	0
NC Number of Remaining Children	C

Figura 60. Configuración del Nodo Final (Networking)

Addressing	
Change addressing settings	
SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	403CFE33
MY 16-bit Network Address	FFFE
DH Destination Address High	13A200
DL Destination Address Low	40C66FD6
NI Node Identifier	ED2
NH Maximum Hops	1E
BH Broadcast Radius	0
AR Many-to-One Route Broadcast Time	FF x 10 sec
DD Device Type Identifier	30000
NT Node Discovery Backoff	3C x 100 ms
NO Node Discovery Options	0
NP Maximum Number of Transmission Bytes	54
CR PAN Conflict Threshold	3

Figura 61. Configuración del Nodo Final (Addressing)

3.3.2.2 Nodo Router

El nodo Router debe enviar la información hacia el nodo coordinador; por lo que, los parámetros DH y DL se configuran con la dirección del coordinador o Gateway. En las Figuras 62 y 63 se observa la configuración del nodo Router. Estos nodos se configuran en modo AT ya que solo pasaran la información proveniente de los nodos finales hacia el coordinador. El firmware utilizado en este módulo es XB24-ZB ZigBee Router AT 22A7.

Networking	
Change networking settings	
ID PAN ID	10
SC Scan Channels	1FFE Bitfield
SD Scan Duration	3 exponent
ZS ZigBee Stack Profile	0
NJ Node Join Time	FF x 1 sec
NW Network Watchdog Timeout	0 x 1 minute
JV Channel Verification	Enabled [1]
JN Join Notification	Disabled [0]
OP Operating PAN ID	0
OI Operating 16-bit PAN ID	FFFF
CH Operating Channel	0
NC Number of Remaining Children	C

Figura 62. Configuración del Nodo Router (Networking)

Addressing	
Change addressing settings	
SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	40C6FD6
MY 16-bit Network Address	FFFE
DH Destination Address High	13A200
DL Destination Address Low	403B0CEE
NI Node Identifier	Router
NH Maximum Hops	1E
BH Broadcast Radius	0
AR Many-to-One Route Broadcast Time	FF x 10 sec
DD Device Type Identifier	0
NT Node Discovery Backoff	3C x 100 ms
NO Node Discovery Options	0
NP Maximum Number of Transmission Bytes	54
CR PAN Conflict Threshold	3

Figura 63. Configuración del Nodo Router (Addressing).

3.3.2.3 Nodo Coordinador (Gateway)

El nodo coordinador se debe configurar con el valor de 0 en los parámetros DH y DL por ser el nodo central de la red. Este nodo se configura en modo API, ya que ofrece mayor control de los datos al tratar la información con una trama; además, permite configurar los demás nodos de la red de forma remota, permitiendo mayor flexibilidad de la red. En la Figura 64 se observa la configuración del nodo coordinador o Gateway. El firmware utilizado en este módulo es XB24-ZB ZigBee Coordinador API 21A7.

ID PAN ID	10
SC Scan Channels	1FFE Bitfield
SD Scan Duration	3 exponent
ZS ZigBee Stack Profile	0
NJ Node Join Time	FF x 1 sec
OP Operating PAN ID	10
OI Operating 16-bit PAN ID	14CF
CH Operating Channel	F
NC Number of Remaining Children	A
Addressing	
Change addressing settings	
SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	403B0CEE
MY 16-bit Network Address	0
DH Destination Address High	0
DL Destination Address Low	0

Figura 64. Configuración del Nodo Coordinador

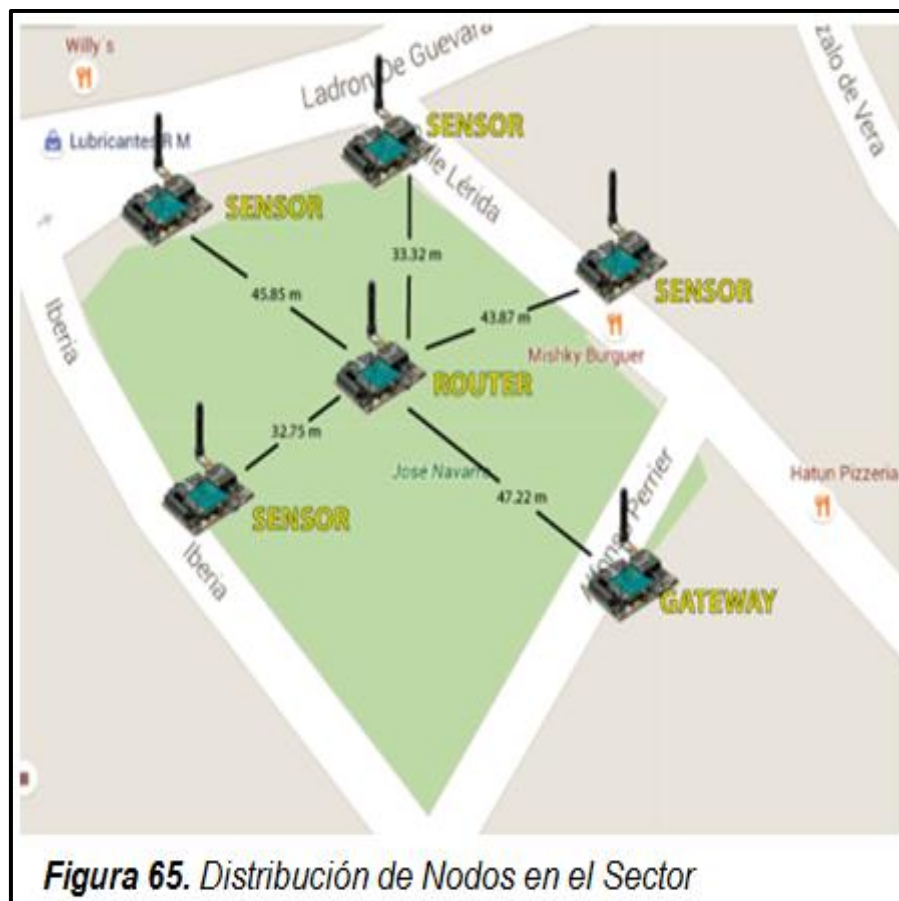
En el software XCTU se puede evaluar la calidad de los enlaces punto a punto entre los nodos; así mismo, al estar configurado en modo API el nodo coordinador, permite una visualización de toda la red. En la Figura se observa, mediante el software XCTU, la conformación de la red inalámbrica de sensores.

3.3.3 Ubicación de Nodos y Establecimiento de la Red WSN

Este diseño se plasma en el parque de la Floresta ubicado en la ciudad de Quito, debido a que en los últimos años este sector se ha transformado en una zona bastante comercial; sus vías son de mucho tráfico vehicular que

contaminan el ambiente; inclusive, existen lugares de expendio de comida que están expuestos a las emisiones de CO₂ producidos por los automóviles y buses que circulan por esas vías, lo que reduce la calidad del aire en perjuicio de las personas que transitan por este sector, especialmente las personas que suelen salir a trotar o hacer ejercicio.

En la ciudad de Quito existen muchos sectores con la misma problemática. Este modelo es capaz de adaptarse a cualquier sector de la ciudad, debido a sus características como son: la comunicación inalámbrica y la portabilidad. En la Figura 65 se observa la distribución de los nodos en el sector seleccionado.



3.3.4 Toma de Mediciones y Datos Finales

Las mediciones se realizaron en el parque de las comidas, ubicado en el sector de la Floresta. La Tabla 16 muestra las mediciones obtenidas por los nodos sensores con un registro de fecha y hora. Las mediciones se realizaron en días

laborables y fines de semana. A continuación, se presenta en la Tabla 16 una parte del registro de los datos en la base de datos.

Tabla 16. Registros en la Base de Datos

Valor	Estado	Fecha y Hora
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:36
400	normal	6/11/2016 19:37
400	normal	6/11/2016 19:37
400	normal	6/11/2016 19:37
400	normal	6/11/2016 19:37
400	normal	6/11/2016 19:37
400	normal	6/11/2016 19:37
400	normal	6/11/2016 19:37
400	normal	6/11/2016 19:37
400	normal	6/11/2016 19:37
400	normal	6/11/2016 19:37

Las siguientes imágenes muestran la ubicación de los nodos en el parque de las comidas de la floresta.



Figura 66. Ubicación del Nodo Gateway



Figura 67. Ubicación del Nodo Router



Figura 68. Ubicación del Nodo Final

Se ha obtenido aproximadamente 35000 registros en la base de datos, tomados en un período de dos días. Los datos serán analizados en el capítulo 4 e interpretados mediante un gráfico.

Los usuarios tienen la posibilidad de acceder a la información por medio de una aplicación web, la cual realiza consultas a la base de datos de SQL Server, en donde se almacenan todos los registros obtenidos por los nodos sensores de la red. La aplicación web está desarrollada en código ASP.NET; por lo cual, podrá ser accedida mediante cualquier navegador web desde cualquier parte y para cualquier usuario. En la Figura 69 se observa la interfaz de la aplicación, la cual consta de una sola página. En la misma, se puede observar los últimos registros tomados que superan el nivel normal de emisiones de CO₂. Además, existe una segunda funcionalidad, en la que los usuarios pueden consultar registros según un periodo de tiempo establecido; por lo que, se han habilitado dos áreas de texto en donde el usuario debe ingresar una fecha de inicio y una fecha de fin. El aplicativo está en la capacidad de entregar todos los registros encontrados entre los periodos de tiempo establecidos por el usuario.

Sistema de Monitoreo de CO₂

El Sistema de Monitoreo de CO₂ permite visualizar registros de emisiones de calidad del aire presente en el lugar de implementación.

1 Últimos registros fuera del rango normal de emisiones CO₂

id	sensor	valor	estado	registro
5386	1	409	normal	7/11/2016 12:00:00 AM
5385	1	409	normal	7/11/2016 4:19:49 PM
5384	1	405	normal	7/7/2016 4:16:20 PM
5069	2	556	normal	7/2/2016 1:54:03 PM
5068	1	2556	superior	7/2/2016 1:51:37 PM
5021	1	1623	superior	7/2/2016 1:40:43 PM
5020	1	2371	superior	7/2/2016 1:40:38 PM
5019	1	1556	superior	7/2/2016 1:40:33 PM
5018	1	670	normal	7/2/2016 1:40:28 PM
4686	1	402	normal	6/23/2016 5:54:57 PM
4685	1	1087	superior	6/23/2016 5:54:52 PM
4684	1	569	normal	6/23/2016 5:54:47 PM
4327	1	1165	superior	6/23/2016 5:23:30 PM
4326	1	1335	superior	6/23/2016 5:23:25 PM
4284	1	1430	superior	6/23/2016 5:19:44 PM

2 Consulta de Registros
En esta sección usted podrá consultar las emisiones de CO₂ producidas.

Seleccione la fecha de desea consultar (YYYYMMDD Ej. 20160611):

Fecha Inicio:

Fecha Fin:

id	sensor	valor	estado	registro
1	1	400	normal	6/5/2016 7:34:14 PM
2	1	400	normal	6/5/2016 7:34:16 PM
3	1	400	normal	6/5/2016 7:34:17 PM
4	1	400	normal	6/5/2016 7:34:18 PM
5	1	400	normal	6/5/2016 7:34:19 PM
6	1	400	normal	6/5/2016 7:37:16 PM
7	1	400	normal	6/5/2016 7:37:18 PM
8	1	400	normal	6/5/2016 7:37:19 PM
9	1	400	normal	6/5/2016 7:37:20 PM
10	1	400	normal	6/5/2016 7:37:21 PM
11	1	400	normal	6/5/2016 7:38:39 PM
12	1	400	normal	6/5/2016 7:38:40 PM
13	1	400	normal	6/5/2016 7:38:41 PM

Para montar la aplicación en la web se usó los servicios de información de internet (IIS, *Internet Information Services*), proporcionando un servidor web capaz de alojar la aplicación creada.

Al encontrarse, la estación base de la red, en un lugar cerrado; por ejemplo, una casa o un edificio, tendrá la posibilidad de tener acceso a una IP pública, la cual permite publicar el sitio web en Internet.

Todos los dispositivos con acceso a Internet tendrán la capacidad de poder usar el aplicativo; por ejemplo, en la Figura 70 se muestra un *Smartphone* corriendo la aplicación creada. De esta manera la información estará disponible para todo el mundo sin restricciones.

Se podrá adquirir un nombre de dominio con cualquier proveedor de nombres de dominio, con el objetivo de facilitar el acceso a los usuarios con un nombre más no con una dirección IP.



A continuación, se mencionará el presupuesto utilizado para la construcción del prototipo para este proyecto.

3.4 Presupuesto del prototipo

El prototipo para esta red WSN planteada, como se mencionó en el punto 3.1, consta únicamente de dos nodos finales, por cuestión de presupuesto. A continuación, se muestra en la Tabla 17 una cotización de todos los elementos que se utilizan en este prototipo, costo de diseño, implementación, mano de obra y costo del software que permite llevar a cabo el monitoreo. El valor total para la implementación del prototipo es 2029.15 dólares tomando en cuenta un 5% por costos de imprevistos. Cabe mencionar, que la red planteada en el capítulo de diseño consta de 5 nodos finales; por lo que el costo de implementación subiría considerablemente.

Tabla 17. Presupuesto para el Prototipo de WSN

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
1	Arduino UNO	4	25	100
2	XBee Shield	4	15	60
3	Sensores MG-811	2	60	120
4	Módulos XBee S2	4	40	160
5	Protectores Arduino	4	5	20
6	Panel Solar	4	30	120
7	Batería Li-Po 1000	4	22	88
8	Cajas Nodos	3	30	90
9	XBee Xplorer	1	10	10
10	Módulo Li-Po Rider Pro	4	15	60
11	Material electrónico	1	5	5
12	Diseño	1	800	800
13	Mano de obra	1	300	300
14	Software de monitoreo	1	600	600
			SUBTOTAL	2533
			IMPREVISTOS (5%)	126.65
			TOTAL (\$)	2659.65

4. Capítulo IV.- Análisis de Resultados

4.1 Recolección de Datos a través de Nodos Sensores (Prueba 1)

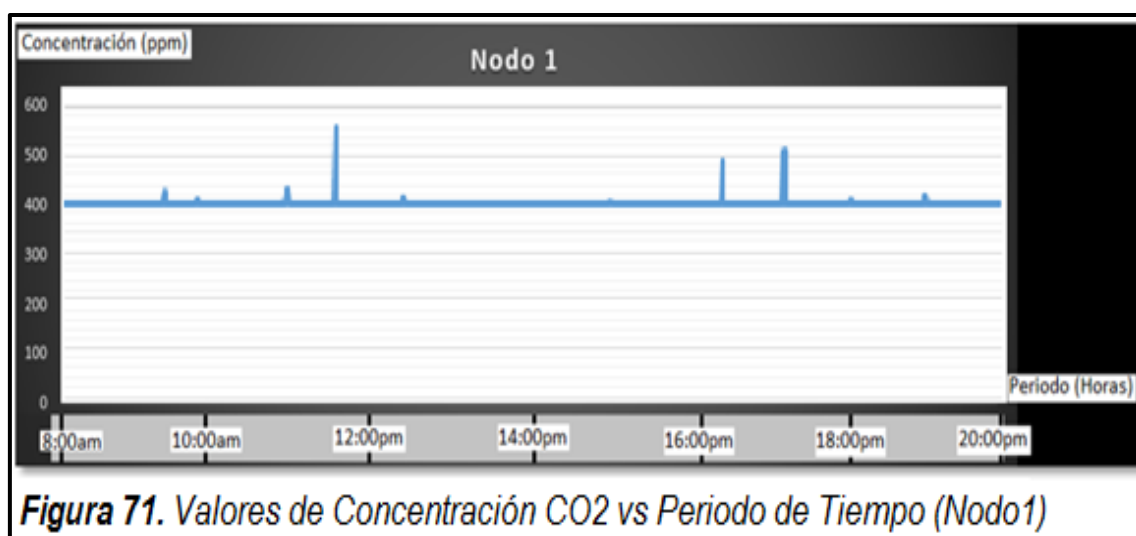
Cada uno de los nodos ubicados a una distancia de aproximadamente 30 metros entre ellos, recolectaron ciertos valores existentes de emisiones de CO₂ en el aire del lugar. Cada nodo recolectó un valor aproximado de 8640 registros con un porcentaje equivalente al 0.38% de valores superiores a 400ppm.

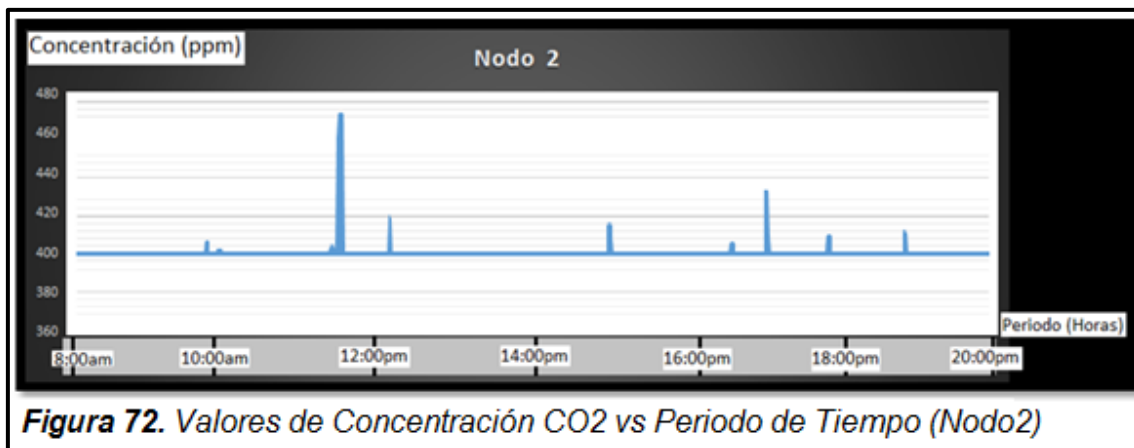
Las mediciones realizadas comprenden un periodo aproximado de 12 horas en las cuales se obtuvieron los registros antes mencionados.

El primer periodo de medición se realizó un día normal laborable de la semana con el fin de recolectar valores regulares de emisiones de CO₂.

Los valores superiores a los 400ppm considerados valores normales de emisiones de CO₂ existentes en el aire, varían entre los 401ppm y 563ppm, siendo este último valor es el valor máximo obtenido dentro de los registros de los nodos sensores.

Como se puede observar en las Figuras 71 y 72, los valores obtenidos son valores considerados normales de emisiones de CO₂ permitidos en el ambiente, estos gráficos permiten visualizar los valores de concentración medidos en ppm (partes por millón), vs Periodo de Tiempo medido en Horas.





La Tabla 18 muestra los valores que cada uno de los nodos registró en la base de datos durante su funcionamiento dentro de la red WSN en el día de prueba.

Tabla 18. Valores Mayores a los 400ppm Registrados por los (Nodos 1y 2)

id	Sensor	Valor	Registro
996	1	412	2016-06-08 09:23:27.000
998	1	429	2016-06-08 09:23:33.000
1000	1	403	2016-06-08 09:23:38.000
1356	1	411	2016-06-08 09:53:03.000
1368	2	406	2016-06-08 09:54:03.000
1464	2	402	2016-06-08 10:02:03.000
2004	1	417	2016-06-08 10:47:58.000
2016	1	433	2016-06-08 10:48:03.000
2018	1	401	2016-06-08 10:48:08.000
2532	2	403	2016-06-08 11:31:13.000
2628	2	461	2016-06-08 11:39:43.000
2630	2	473	2016-06-08 11:39:48.000
2628	1	563	2016-06-08 11:39:43.000
2632	2	402	2016-06-08 11:39:53.000
3036	2	401	2016-06-08 12:13:18.000
3038	2	419	2016-06-08 12:13:23.000
3204	1	413	2016-06-08 12:27:29.000
4152	1	406	2016-06-08 14:46:49.000
3576	2	415	2016-06-08 14:58:54.000
3578	2	408	2016-06-08 14:58:59.000
5616	1	487	2016-06-08 16:12:53.000
6084	2	405	2016-06-08 16:27:24.000
6372	2	402	2016-06-08 16:51:49.000
6374	2	433	2016-06-08 16:51:54.000
6376	2	409	2016-06-08 16:51:59.000
6468	1	512	2016-06-08 16:59:29.000
7056	2	409	2016-06-08 17:48:04.000
7176	1	412	2016-06-08 17:58:18.000
8004	2	411	2016-06-08 19:07:38.000
8016	1	418	2016-06-08 19:08:03.000

Como se puede observar los valores no superan un valor preocupante dentro del lugar, pero si registra incrementos mínimos durante ciertos tiempos.

Cada nodo tiene predeterminado registrar valores de emisiones de CO₂ menores a los 400ppm con la nomenclatura siguiente: (<400) al registrar un valor mayor en el aire empieza a generar valores precisos, de esta manera se puede determinar el incremento en el tiempo preciso.

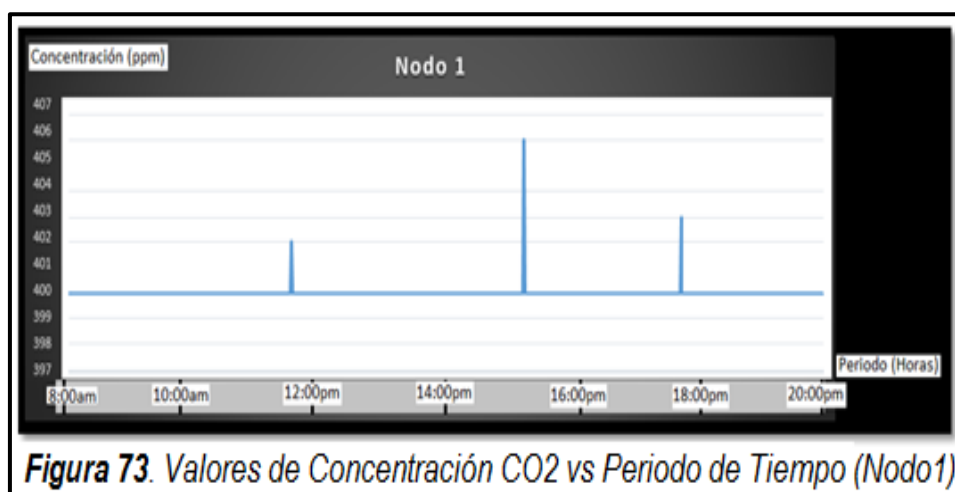
4.2 Recolección de Datos a través de Nodos Sensores (Prueba 2)

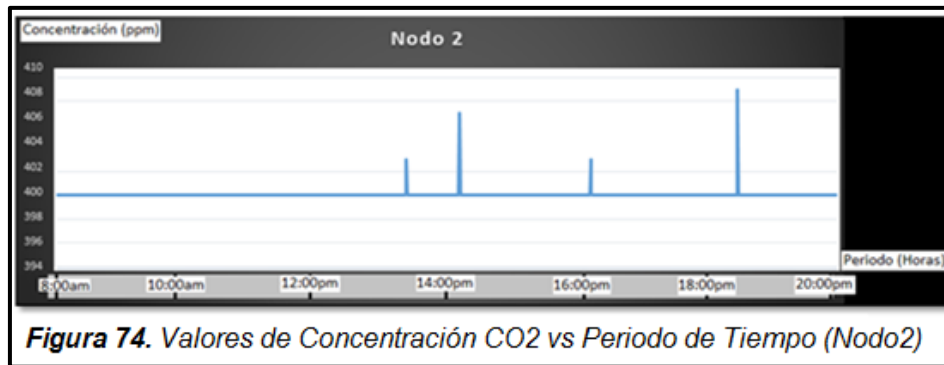
El prototipo fue utilizado para realizar una segunda prueba; dicha prueba fue realizada un día del fin de semana, para verificar la posible diferencia que habría con la primera prueba.

Los nodos fueron colocados en el mismo lugar y con las características similares a las realizadas en la prueba número uno.

Los nodos registraron de igual manera un valor aproximado de 8640 registros totales de los cuales el 0.081% equivale a los valores superiores a los 400ppm. A diferencia de la primera prueba se registraron apenas 7 incrementos superiores a los 400ppm durante el periodo de prueba equivalente a las 12horas.

Como se puede observar las Figuras 73 y 74 los valores superiores a los 400ppm varían apenas entre los 402ppm y los 409ppm, siendo este último el valor máximo registrado durante esta prueba.





La Tabla 19 muestra los valores registrados por los nodos sensores en la BDD del sistema registrados por la red WSN. Como se puede observar son valores aun considerados normales en el aire.

Tabla 19. Valores Mayores a los 400ppm Registrados por los (Nodos 1y 2)

id	Sensor	Valor	Registro
2676	1	402	2016-06-25 11:43:21.000
3804	2	403	2016-06-25 13:17:50.000
4428	2	407	2016-06-25 14:09:47.000
5076	1	406	2016-06-25 15:03:13.000
5664	2	403	2016-06-25 15:52:09.000
6876	1	403	2016-06-25 17:33:47.000
7524	2	409	2016-06-25 18:27:55.000

La red WSN diseñada permitió la obtención adecuada de los datos por parte de los nodos sensores, la estación base y el aplicativo diseñado para la recolección de la información. El manejo adecuado de los sensores permitió obtener lo que se esperaba datos de existencia de CO₂. Nodos sensores de mayor precisión y a mayor escala serían capaces de obtener datos aún más precisos.

4.3 Recolección de Datos a través de Nodos Sensores (Prueba 3) en lugar libre de emisiones de CO2

A comparación de los lugares que se encuentran expuestos directamente a las emisiones producidas por los vehículos, la Universidad de las Américas sede Query presenta niveles de contaminación casi inexistentes.

Las mediciones realizadas como prueba de un lugar libre de contaminación en este proyecto, se realizaron en el interior de la Universidad de las Américas

como se mencionó anteriormente con el fin de obtener una comparación en términos de exposición.

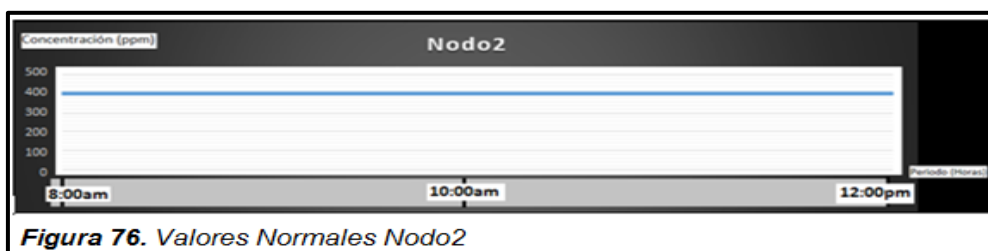
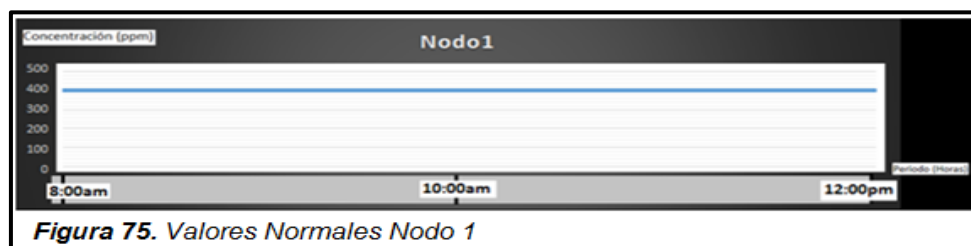
A través de la red WSN se obtuvo datos que nunca superaron el valor de 400ppm en un periodo de 4 horas seguidas.

Como se puede observar en la Tabla 20, dentro de los parámetros de sensibilidad del nodo final o nodo sensor de la red WSN, el aplicativo diseñado para visualizar los datos nunca generó valores >400 ppm y a su vez se pudo determinar que la calidad del aire se encuentra en un rango normal de contaminación existente.

Tabla 20. Valores Obtenidos sin Contaminación en (ppm)

id	Sensor	Valor	Registro
1	1	400	2016-06-18 08:43:21.000
2	2	400	2016-06-18 08:43:26.000
3	1	400	2016-06-18 08:43:31.000
4	2	400	2016-06-18 08:43:36.000
5	1	400	2016-06-18 08:43:41.000
6	2	400	2016-06-18 08:43:46.000
7	1	400	2016-06-18 08:43:51.000
8	2	400	2016-06-18 08:43:56.000
9	1	400	2016-06-18 08:44:01.000
10	2	400	2016-06-18 08:44:06.000

Como se puede observar en las Figuras 75 y 76, los valores que genera la tabla no se elevan de 400ppm estableciendo un índice de contaminación normal, se podría decir casi inexistente.



Conclusiones

La red inalámbrica de sensores cumplió la función principal de monitoreo, obteniendo datos de medición a través de la sensibilidad de los nodos sensores y la conectividad de los mismos a la red WSN diseñada previamente.

De acuerdo a la investigación realizada se determinó que una red WSN de este tipo puede ser implementada a gran escala; y a su vez podría ser adaptable al sistema actual de monitoreo de calidad del aire implementado por la Secretaría del Ambiente proporcionándole un mayor alcance de mediciones, con el fin de determinar la cantidad de contaminación que produce el parque automotor en la ciudad de Quito.

La implementación de esta nueva tecnología aun en desarrollo permite contribuir con datos precisos a la problemática ambiental existente en ciudades que se encuentran en constante crecimiento. Las emisiones de CO₂ producidas diariamente por los vehículos producen a corto y largo plazo afecciones que pueden ser perjudiciales para las personas que se exponen a estas condiciones, teniendo como medida de control la implementación de estos nodos sensores conectados inalámbricamente capaces de recolectar la cantidad necesaria de datos que permitirán generar las soluciones pertinentes por las entidades reguladoras.

La implementación del presente proyecto permitió fusionar diferentes conceptos: implementar la parte electrónica, la conectividad de la red, la presentación de los datos a través de un aplicativo y finalmente la problemática ambiental; trabajando en conjunto, hacen que este tipo de redes sean válidas para ser utilizadas a gran escala y muestran que se puede adaptar a cualquier necesidad.

Se puede concluir que los datos de contaminación obtenidos a través del prototipo de WSN diseñado en el presente proyecto generan la cantidad

necesaria de información para establecer un índice de contaminación existente en varios sectores de la ciudad, obteniendo como resultado que el estado del aire en un lugar con suficiente ventilación, no presenta ningún riesgo en términos de contaminación que pueda afectar a la salud de las personas.

La investigación realizada nos indica que los índices de contaminación existentes en normativas y reglamentos actuales, son proporcionados a un nivel superior al que las personas se exponen diariamente, siendo este proyecto una alternativa fundamental para el monitoreo y control de emisiones de CO₂ a un nivel más cercano y directo a las personas con la presencia continua del parque vehicular.

Recomendaciones

La investigación realizada para el presente proyecto permitió determinar la necesidad de utilizar más nodos sensores para la toma de mediciones; por lo tanto, al ser un prototipo, se recomienda la utilización de un mínimo de cuatro nodos sensores que permitan obtener un número más preciso de datos de emisiones de CO₂ y un alcance superior del lugar de estudio.

Para el presente proyecto se utilizó una computadora portátil como la estación base de la red WSN, con el limitante de energía de no más de cuatro horas seguidas para la misma, por lo tanto, se recomienda el alquiler de un lugar que proporcione la carga energética necesaria y acceso a internet para la estación base durante el funcionamiento de la red.

Se recomienda la adquisición de nodos finales con una mayor capacidad en términos de alcance en conectividad y una mayor sensibilidad al momento de obtener datos de emisiones en los lugares seleccionados para realizar el monitoreo periódico, con el objetivo de abarcar más área y lograr datos más precisos.

Un proyecto enfocado en el monitoreo permite determinar posibles problemas en el aire, por lo tanto, se recomienda adaptar este proyecto al sistema actual de mediciones realizado por la Secretaría del Ambiente con el objetivo de incrementar el alcance de mediciones obtenidas en ciertos sectores considerados de mayor exposición a emisiones de CO₂ y otros contaminantes comunes en el aire.

Se recomienda adaptar más sensores a los nodos de medición que puedan medir diferentes contaminantes que están presentes en el aire y que de la misma forma que el CO₂, afectan a la salud de las personas; con esto, se lograría obtener un mejor índice de calidad del aire.

Referencias

Abelló Linde. (s.f.). Trabajando con Dióxido de carbono CO₂. Recuperado el 12 de junio de 2016 de [http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/CS_12_%20v%2012%20\(trabajando%20con%20di%C3%B3xido%20de%20carbono\)316_25938.pdf](http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/CS_12_%20v%2012%20(trabajando%20con%20di%C3%B3xido%20de%20carbono)316_25938.pdf)

Agencia Nacional de Tránsito. (2012). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2207:2002. Recuperado el 9 de junio de 2016 de <http://www.ant.gob.ec/index.php/servicios/normas-y-reglamentos-inen/emisiones-contaminantes-y-ruido/file/163-reglamento-tecnico-ecuatoriano-rte-inen-017-2008>

Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía IDEA. (2008). *Vigilancia Tecnológica Estudio Sectorial*. Sevilla, España: Junta de Andalucía.

Agencia Metropolitana de Tránsito. (2012). Ordenanza metropolitana que establece la tasa de revisión técnica vehicular. Recuperado el 3 de junio de 2016 de <http://www.ant.gob.ec/index.php/component/search/?searchword=Norma%20T%C3%A9cnica%20Ecuato&searchphrase=all&Itemid=101>

Aguilar, L. (2012). Contaminación Ambiental. Recuperado el 3 de junio de 2016 de <http://contaminacion-ambiente.blogspot.com/>

Almansa, J. (2013). Desarrollo e implementación utilizando Arduino y Zigbee con un sensor ultrasónico para control de nivel de llenado. Tarragona España: Universitat Rovira i Virgili.

Andrade, W. (2015). Prototipo de una red sensorial inalámbrica (WSN) para la medición del nivel de CO₂ en la ciudad de Ambato. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.

- Arduino. (2016). Arduino Products. Recuperado el 28 de enero de 2016 de <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>
- Atmel. (2013). Coexistence between ZigBee and Other 2.4 GHz Products. Recuperado el 6 de abril de 2016 de <http://docplayer.net/77553-Application-note-atmel-at02845-coexistence-between-zigbee-and-other-2-4ghz-products-atmel-mcu-wireless-description-features.html>
- Barro, S. y Escudero, C. (2012). Sistema sensorial inalámbrico para la detección de patologías en la construcción. Coruña, España: Universidad de Coruña.
- Blanco, J. y Pérez, J. (2012). Redes inalámbricas de geosensores aplicadas en sistemas de observación y monitoreo ambiental. Caldas, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Capella, J. (2010). Redes inalámbricas de sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Cobos, E. (2007). Estudio de las redes sensoriales como una nueva alternativa de comunicación inalámbrica. Sangolquí, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército.
- Corral, A. (2005). Diseño e implementación de un entorno de simulación para redes de sensores inalámbricos. Cartagena, Colombia: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Digi International Inc. (2012). XBee/XBee-PRO ZB RF Modules. Recuperado el 8 de abril de 2016 de <https://www.adafruit.com/datasheets/XBee%20ZB%20User%20Manual.pdf>

Diario La Hora. (2013). Quito será el cantón con más habitantes para 2020. Recuperado el 27 de junio de 2016 de [http://lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101449688/-1/Un_total_de_2_millones_781_mil_641_personas_vivir%3%A1n_en_Quito_para_el_a%C3%B1o_2020._Esto_es_lo_que_estima_el_Instituto_Nacional_de_Estad%C3%ADstica_y_Censos_\(INEC\),_que_ayer_present%C3%B3_sus_proyecciones_poblacionales_cantonales.%0D%0A.html#.V1BhPZF9600](http://lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101449688/-1/Un_total_de_2_millones_781_mil_641_personas_vivir%3%A1n_en_Quito_para_el_a%C3%B1o_2020._Esto_es_lo_que_estima_el_Instituto_Nacional_de_Estad%C3%ADstica_y_Censos_(INEC),_que_ayer_present%C3%B3_sus_proyecciones_poblacionales_cantonales.%0D%0A.html#.V1BhPZF9600)

Faludi, R. (2011). Building Wireless Sensor Networks. California, Estados Unidos: O'Reilly Media, Inc.

Güimi. (2009). Redes de Comunicaciones. Recuperado el 5 de abril de 2016 de http://guimi.net/monograficos/G-Redes_de_comunicaciones/G-Redes_de_comunicaciones.pdf

Gustavo Carballeiro. (2012). Redes WI-FI en entornos Windows. Buenos Aires, Argentina: Fox Andina.

Kioskea (2014). Introducción a la tecnología Bluetooth. Recuperado el 5 de abril de 2016 de <http://es.ccm.net/contents/70-bluetooth>

Kioskea (2014). WiFi-Redes Inalámbricas y Seguridad. Recuperado el 5 de abril de 2016 de <http://es.ccm.net/faq/1160-wifi-redes-inalambricas-y-seguridad>

Libelium. (s.f.). 802.15.4 vs ZigBee. Recuperado el 6 de abril de 2016 de <http://www.libelium.com/802-15-4-vs-zigbee/>

Loaiza, V. (2012). Tipos y Causas de la Contaminación Ambiental. Recuperado el 4 de junio de 2016 de <https://vanesaloaiza.wordpress.com/tipos-y-causas-de-la-contaminacion-ambiental/>

- Loaiza, V. (2012). Tipos y Causas de la Contaminación Ambiental. Recuperado el 4 de junio de 2016 de <https://vanesaloaiza.wordpress.com/tipos-y-causas-de-la-contaminacion-ambiental/>
- Marcellini, C., Martinez, D. y Quiroz, S. (2013). Tecnología 4G. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Martinez, R. (2014). Análisis y diseño de una red inalámbrica de sensores para un proyecto agrario. Catalunya, España: Universitat Oberta de Catalunya.
- MCI electronics. (2014). Xbee. Recuperado el 17 de marzo de 2016 de <http://xbee.cl/que-es-xbee/>
- National Instruments. (2010). Wireless Sensor Network Topologies and Mesh Networking. Recuperado el 19 de enero de 2016 de <http://www.ni.com/white-paper/11211/en/>
- Quito Turismo. (s.f.). Plaza Foch. Recuperado el 2 de junio de 2016 de <http://www.quito.com.ec/que-visitar/la-mariscal/la-floresta>
- Robinson, A., Robinson, N. y Soon W., (2013). Efectos Ambientales de los Incrementos Atmosféricos de Dióxido de Carbono. Recuperado el 12 de junio de 2016 de http://www.petitionproject.org/gw_article/spanish.pdf
- Saintmart. (2016). SainSmart XBee Shield module for ZigBee ARDUINO UNO Duemilanove Mega 1280 2560. Recuperado el 28 de enero de 2016 de <http://www.sainsmart.com/arduino/arduino-shields/wireless-shield/sainsmart-xbee-shield-module-for-zigbee-arduino-uno-duemilanove-mega-1280-2560.html>

Secretaría del Ambiente. (s.f.). Los contaminantes comunes del aire y sus efectos sobre la salud humana. Recuperado el 8 de junio de 2016 de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/contaminantes_aire_efec_salud.pdf

Zennaro, M. (2010). Introduction to Wireless Sensor Networks. Trieste, Italia: International Centre for Theoretical Physics.

ANEXOS

ANEXO 1.- Tipos de Placas Arduino

Arduino Mega 2560

Arduino Mega está compuesto por un microcontrolador ATmega2560, contiene 54 pines de entrada y salida digitales, 16 entradas análogas, 4 UARTs (interfaces seriales), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, botón de *reset* entre otras. En la Figura 77 se observa la placa física Arduino Mega 2560 y en la Tabla 21 se observan sus especificaciones técnicas.

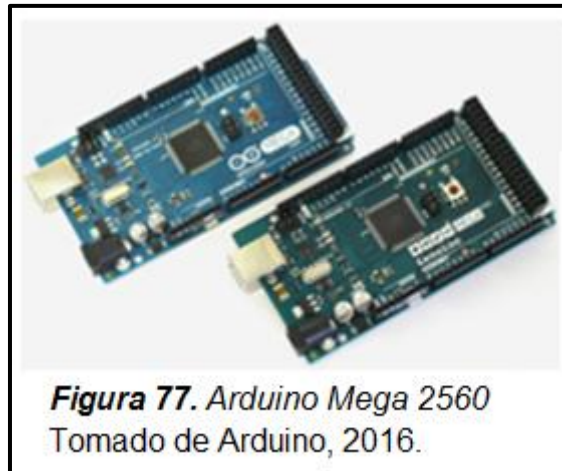


Tabla 21. Especificaciones Técnicas de Arduino Mega 2560

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

Tomado de Arduino, 2016.

Arduino Mega ADK Rev 3

Esta placa es una versión potente de las placas Arduino; posee un microcontrolador ATmega2560, tiene una interfaz de usuario USB para conectar con dispositivos móviles basados en Android. Posee 54 pines de entrada y salida digitales de las cuales 14 se pueden usar como salidas PWM (del inglés *Pulse Width Modulation*, salidas análogas), además contiene 16 entradas análogas, 4 UARTs (interfaces seriales), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB entre otras. En la Figura 78 se observa la placa física Arduino Mega ADK Rev 3 y sus especificaciones se observan en la Tabla 22.



Tabla 22. Especificaciones Técnicas de Arduino Mega ADK Rev 3.

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	9V
Input Voltage (limit)	7-18V
Digital I/O Pins	54
PWM Digital I/O Pins	14
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB
Flash Memory for Bootloader	8 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	36 g

Tomado de Arduino, 2016.

Arduino Uno

Arduino Uno está basado en un microcontrolador ATmega328P, posee 14 pines de entradas y salidas digitales de las cuales 6 pueden ser usadas como salidas PWM (salidas analógicas), contiene 6 entradas analógicas, conexión USB entre otras. En la Figura 79 se observa la placa física Arduino UNO y en la Tabla 23 se observan sus especificaciones técnicas.



Figura 79. Arduino Uno
Tomado de Arduino, 2016

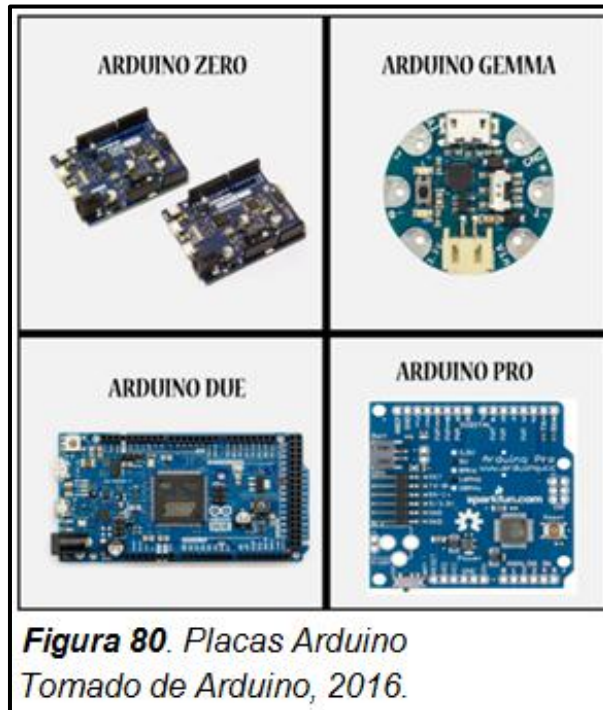
Tabla 23. Especificaciones Técnicas de Arduino Uno

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Tomado de Arduino, 2016.

Otras placas Arduino

Existe gran variedad de placas Arduino con propósitos específicos; se puede encontrar placas Arduino orientado al Internet de Todo (IDT). Otras con interfaces Ethernet, algunas con la funcionalidad de adaptarlos a una prenda, en fin, se puede optar por varias opciones de acuerdo a la necesidad del usuario y al propósito que desee lograr. Entre algunas de ellas se tiene: Arduino Pro, Arduino Due, Arduino Zero, Arduino Gemma, etc. En la Figura 80 se muestran las placas Arduino mencionadas anteriormente.



ANEXO 2.- Tipos de Antenas de Módulos XBee

Los módulos de radio necesitan una antena para poder transmitir y recibir datos. Digi fabrica los módulos XBee con diferentes tipos de antenas con sus propias ventajas y desventajas, éstas se seleccionan de acuerdo a la necesidad de la aplicación en la que se trabaje o la preferencia que tenga el usuario. En la Figura 81 se observan los tipos de antenas que utilizan los módulos XBee.

- **Whip or wire antenna (antena de cable)**

Es una sola pieza de alambre que sobresale del módulo de radio. Ofrece radiación omnidireccional, es decir, la distancia de transmisión máxima es casi la misma en todas las direcciones cuando el cable está recto y perpendicular al módulo.

- **Chip antenna (antena de chip)**

Es un chip plano de cerámica que está a nivel del módulo, esto hace que sea más pequeño y más robusto, pero estas ventajas tienen un precio. Las antenas de chip tienen un patrón de radiación cardioide (en forma de corazón), lo que hace que la señal se atenúe en muchas direcciones.

- **PCB antenna (antena PCB)**

La antena PCB se introduce con el XBee PRO S2B, esta antena se imprime directamente sobre la placa de circuito XBee. Ofrece muchas ventajas y desventajas como la antena de chip con un costo mucho menor de fabricación.

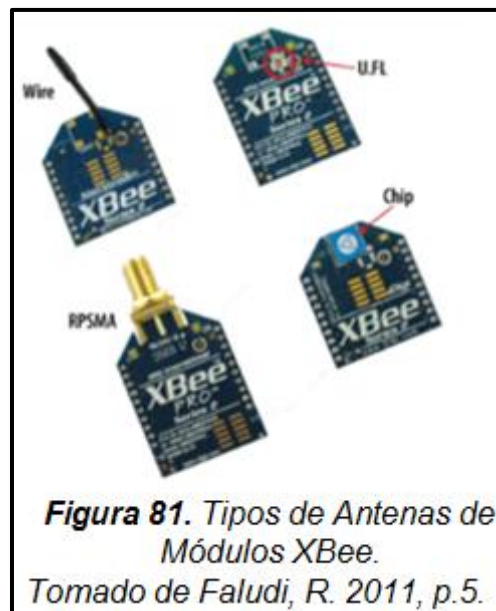
- **U. FL connector (conector U. FL)**

Es el más pequeño de los dos tipos de conectores de antena externa. No necesariamente se coloca una antena externa, solo en el caso en que el módulo se coloque en el interior de una caja de metal, de tal forma que el módulo necesite de una antena externa para que no se

produzca una atenuación de la señal por las condiciones físicas. La principal ventaja es que se pueden colocar antenas de diferentes características de acuerdo a la necesidad del usuario.

- **RPSMA Connector (conector RPSMA)**

Es un tipo de conector diferente al U.FL más grande y más luminoso, a diferencia del conector U.FL se puede conectar una antena externa colocando directamente en el módulo XBee, sin necesidad de un cable de conexión.



ANEXO 3.- Datasheet MG-811

