

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y**  
**AUTOMATISMO**

TEMA:

**Monitoreo ambiental con redes de sensores inalámbricos basados en microcontroladores de 32 bits y módulos RF, aplicado a un parqueadero cerrado.**

AUTOR:

González Romero, Bill Gianni

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de

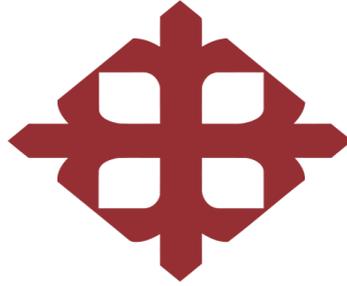
**INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

TUTOR:

Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.

Guayaquil, Ecuador

22 de marzo del 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y**  
**AUTOMATISMO**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente Trabajo de Titulación fue realizado en su totalidad por **GONZÁLEZ ROMERO, BILL GIANNY**, como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO**.

**TUTOR**

f. \_\_\_\_\_

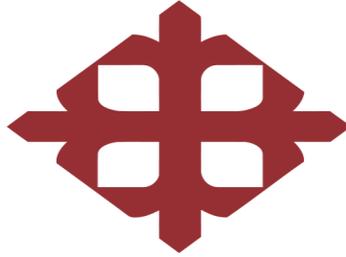
**Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.**

**DIRECTOR DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Heras Sánchez, Miguel Armando, M.Sc.**

**Guayaquil, a los 22 días del mes de marzo del año 2019.**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y**  
**AUTOMATISMO**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, González Romero, Bill Gianni**

**DECLARO QUE:**

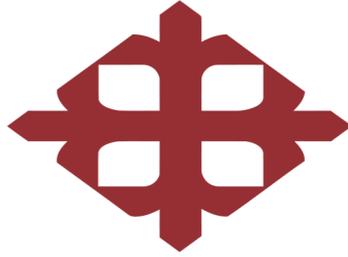
El Trabajo de Titulación, “**MONITOREO AMBIENTAL CON REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS BASADOS EN MICROCONTROLADORES DE 32 BITS Y MÓDULOS RF, APLICADO A UN PARQUEADERO CERRADO.**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 22 días del mes de marzo del año 2019.**

**EL AUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**González Romero, Bill Gianni**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y**  
**AUTOMATISMO**

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, González Romero, Bill Gianni**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la Institución del Trabajo de Titulación, “MONITOREO AMBIENTAL CON REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS BASADOS EN MICROCONTROLADORES DE 32 BITS Y MÓDULOS RF, APLICADO A UN PARQUEADERO CERRADO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 22 días del mes de marzo del año 2019.**

**EL AUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**González Romero, Bill Gianni.**

**REVISIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN CON PROGRAMA URKUND**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y**  
**AUTOMATISMO**

**TÍTULO:** “Monitoreo ambiental con redes de sensores inalámbricos basados en microcontroladores de 32 bits y módulos RF, aplicado a un parqueadero cerrado”.

**AUTOR:** GONZALEZ ROMERO BILL GIANNY

The screenshot shows the URKUND interface. On the left, document details for 'GONZALEZ BILL.docx' are shown, including a 3% match rate. On the right, a 'Lista de fuentes' (List of sources) displays various matches with percentages ranging from 72% to 100%. At the bottom, a comparison window shows a 71% match between the document and a source from the Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Después de analizar el resultado enviado por el programa Urkund, se determinó que el trabajo de titulación del estudiante: **GONZALEZ ROMERO BILL GIANNY**, observa un porcentaje inferior al 4% de coincidencias con otros documentos encontrados en la internet.

**DOCENTE – TUTOR:**

.....

**Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.**

## **DEDICATORIA**

A mi abuela, padres y hermano, por su apoyo incondicional durante todo este proceso de investigación, por ser mi motivación y mi mayor fuente de inspiración. Gracias por depositar su total confianza en mí, sin ustedes esto no sería posible.

Bill Gianni González Romero.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a Dios, que ha sido mi guía y mi fortaleza dándome fuerzas cada día, mediante su bendición pude llegar a cumplir uno de mis sueños, ser un profesional. Quién me ha cuidado y demostrado que, en los momentos más duros y difíciles de la vida, Él ha estado conmigo, me ha levantado e impulsado a seguir adelante.

A mi abuela Laura Miranda, quien ha estado conmigo desde siempre, sus esfuerzos, motivaciones, su apoyo incondicional; fueron, son y serán las cosas más importantes que tuve para llegar a esta meta. En estos años de carrera universitaria hemos pasado por muchas situaciones juntos, que quedarán grabadas en mi memoria; se lo debo todo ya que nada de esto pudo haber sido posible sin ella.

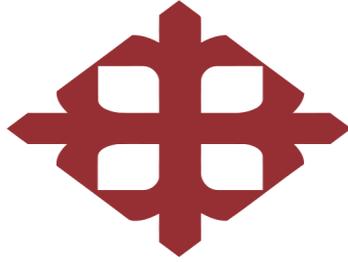
A mis padres, que siempre se preocuparon por mi bienestar y me animaban cuando tenía días malos, por estar siempre pendiente de cómo iba con mis estudios y los pudiera culminar con éxito. Por ser mis primeros maestros y enseñarme las cosas que tiene la vida para nosotros.

A mi hermano Allan, que siempre me llenaba de abrazos al llegar a casa los fines de semana, y poder compartir con él muchas de las cosas que nos gustan.

A mi hermana Martha, que fue mi inspiración de una profesional en todo el sentido de la palabra, por su cariño y afecto, por demostrarme que las adversidades que uno tiene a lo largo de la vida, se pueden vencer siempre teniendo a Dios a tu lado, haciéndole frente a las situaciones y no permitir que nos quite las ganas de seguir adelante.

A mi tutor, Ing. Eduardo Mendoza; por su paciencia y guía durante todo el proceso de titulación.

Bill Gianni González Romero.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y**  
**AUTOMATISMO**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**M.Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS**

DECANO

f. \_\_\_\_\_

**M.Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO**

COORDINADOR DEL ÁREA

f. \_\_\_\_\_

**M.Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO**

OPONENTE

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XVI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>4</b>
1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2. Justificación.....	5
1.3. Objetivos .....	5
1.3.1. Objetivo General .....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
1.4. Metodología de la Investigación .....	6
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1. Estado del Arte.....	7
2.2. Introducción de WSN.....	11
2.3. Aplicaciones de la red de sensores inalámbricos.....	13
2.4. Problemas de diseño de una red de sensores inalámbricos.....	14
2.5. Estructura de una red de sensores inalámbricos.....	16
2.5.1. Red estrella (punto a multipunto).....	16
2.5.2. Red de malla.....	17
2.5.3. Red híbrida estrella-malla.....	18
2.6. Contaminación ambiental.....	19
2.6.1. Contaminación y contaminantes.....	19
2.6.2. Tipos de contaminación.....	19
2.6.2.1. Contaminación del aire.....	20

2.6.3. Contaminación del ruido o acústica.....	20
2.6.4. Contaminación por radiación.....	21
2.7. Sensores para control ambiental.....	21
2.8. Sensores para monitoreo ambiental. ....	22
2.9. Microcontrolador.....	24
2.9.1. Microcontroladores 8051.....	25
2.9.2. Microcontroladores PIC.....	26
2.9.3. Microcontroladores ARM.....	27
2.10. Módulos de comunicación inalámbrica. ....	28
2.10.1. Módulo Zigbee.....	28
2.10.2. Módulo Bluetooth.....	32
2.10.2.1. Módulo Bluetooth Low Energy. ....	34
<b>CAPITULO III: ANÁLISIS DE LA RED DE MONITOREO DEL</b>	
<b>PARQUEADERO .....</b>	<b>36</b>
3.1. Consideraciones iniciales del diseño.....	36
3.1.1. Descripción del diseño en general.....	36
3.1.2. Caracterización del sistema de sensores inalámbricos.....	39
3.1.3. Funciones del sistema. ....	39
3.2. Análisis de la red inalámbrica. ....	40
3.2.1 Arquitectura de red.....	40
3.2.2. Análisis de operación de la red de sensores.....	41
3.2.3. Topología de la red inalámbrica.....	42
3.2.4. Protocolos de Comunicación.....	43
3.2.5. Tramas.....	44
3.3. Diseño de nodo secundario. ....	45
3.3.1. Construcción e implementación de red de sensores inalámbricos.....	47
3.3.2. Integración de los sensores de calidad con STM32 Núcleo en nodo secundario. ....	47

3.4. Diseño de nodo principal. ....	50
3.4.1. Configuración de nodo principal para adquisición de datos y presentación. .....	51
3.5. Cálculo de costos.....	53
3.6. Pruebas de Funcionamiento .....	54
3.6.1. Pruebas de alcance. ....	55
3.6.2. Pruebas de paquetes de datos perdidos según el voltaje recibido. ....	56
3.6.3. Pruebas de potencia de transmisión. ....	57
3.6.4. Pruebas de envío y recepción de datos.....	58
<b>CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN, ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ....</b>	<b>62</b>
4.1. Presentación de resultados .....	62
4.1.1. Resultados referentes al estado del arte .....	62
4.1.2. Resultados de hardware.....	62
4.1.3. Resultados del software.....	63
4.1.4. Resultados de las pruebas de prototipo .....	63
4.2. Discusión de resultados.....	64
4.2.1. Cumplimiento de los objetivos .....	64
4.2.1.1. Objetivo General .....	64
4.2.1.2. Objetivos Específicos.....	64
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>67</b>
5.1. Conclusiones .....	67
5.2. Recomendaciones.....	67
5.3. Trabajos futuros .....	68
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>74</b>
ANEXO A. Módulo XBEE S2. ....	74
ANEXO B. STM32F4 Discovery .....	76

ANEXO C. Sensores ambientales utilizados en el proyecto.....	77
--	----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1: Contaminantes del aire, sus fuentes y efectos.....	20
Tabla 3. 1: Costos de materiales utilizados en el proyecto. ....	54
Tabla 3. 2: Distancia de alcance y fallos.....	55
Tabla 3. 3: Paquetes recibidos vs paquetes perdidos según el voltaje. ....	56
Tabla 3. 4: Pruebas de potencia de transmisión .....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Topología típica de una red de sensores inalámbricos. ....	12
Figura 2. 2: Topología de una red estrella.....	17
Figura 2. 3: Topología de una red en malla. ....	18
Figura 2. 4: Topología de una red híbrida en estrella-malla o árbol.....	18

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Parqueadero vehicular de la UCSG con dimensionamiento de una de sus plantas. ....	37
Figura 3. 2: Parqueadero UCSG .....	37
Figura 3.3: Diagrama de flujo explicando el proyecto.....	38
Figura 3. 4: Arquitectura del proyecto propuesto. ....	41
Figura 3. 5: Distancia y tasa de transmisión entre nodo secundario y nodo principal	41
Figura 3. 6: Comunicación entre nodos. ....	43
Figura 3. 7: Diagrama de bloque de protocolo de comunicación de XBEE. ....	44
Figura 3. 8: Trama de envío de datos de temperatura mediante el segundo nodo secundario. ....	45
Figura 3. 9: Diagrama de bloque de protocolo de comunicación de XBEE. ....	46
Figura 3. 10: Flujograma del funcionamiento del nodo secundario que incluye los sensores ambientales del proyecto. ....	46
Figura 3. 11: Esquemático de conexiones del sistema WSN.....	47
Figura 3. 12: Diagrama de conexiones de los nodos secundarios.....	47
Figura 3. 13: Componentes de nodo secundario de CO2.....	48
Figura 3. 14: Componentes de nodo secundario de temperatura. ....	48
Figura 3. 15: Componentes de nodo secundario de calidad de aire. ....	49
Figura 3. 16: Cabecera del código utilizado para el nodo esclavo.....	49
Figura 3. 17: Función principal del nodo secundario o esclavo.....	50
Figura 3. 18: Diagrama de conexión del nodo principal.....	50
Figura 3. 19: Funcionamiento general del nodo principal. ....	51
Figura 3. 20: Esquemático de conexiones del nodo principal.....	52
Figura 3. 21: Cabecera del código utilizado en nodo principal.....	52
Figura 3. 22: Primera parte de la función principal del código.....	53

Figura 3. 23: Segunda parte de la función principal del código.....	53
Figura 3. 24: Pruebas en Interfaz XCTU. ....	58
Figura 3. 25: Pruebas de envío y recepción de datos con el sensor de temperatura. .	59
Figura 3. 26: Pruebas de recepción de datos en el LCD con información del sensor de temperatura.....	59
Figura 3. 27: Pruebas de recepción de datos en el LCD con información del sensor de CO2 .....	60
Figura 3. 28: Pruebas de envío y recepción de datos con el sensor de CO2.....	60
Figura 3. 29: Pruebas de envío y recepción de datos con el sensor de Calidad del Aire.....	61
Figura 3. 30: Pruebas de envío y recepción de datos con el sensor de Calidad del Aire.....	61

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se explica el estudio y la implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de variables ambientales (CO<sub>2</sub>, temperatura, calidad del aire) aplicado en el parqueadero de la UCSG, esta red está basada en microcontroladores de 32 bits (STM32) todo esto mediante el desarrollo de nodos secundarios que serán los encargados de enviar la información a un nodo principal para que sea mostrada en un LCD. Para este sistema se realizó una investigación correlacional de tipo cuantitativo aplicando las fuentes de investigación bibliográficas y experimentales, con esto se pudo llegar a comprender sobre las WSN sus características más importantes y en este caso los estándares de comunicación que utilizan los XBee, por otra parte la investigación cuantitativa ayudó a poder evaluar los datos mediante pruebas de funcionamiento del sistema propuesto que sirvieron para la discusión y análisis del proyecto. Como resultado de este trabajo de titulación, se implementó una red de sensores inalámbrico, conformada por 3 nodos secundarios encargados de censar las variables ambientales mencionadas anteriormente y 1 nodo principal al cual estarán comunicados los nodos secundarios enviando los distintos tipos de información mediante las direcciones de los nodos previamente establecidas en su trama de red de datos y así conocer los niveles de contaminación ambiental que existen en el parqueadero de la UCSG.

**Palabras claves:** Red de sensores inalámbricos (WSN), microcontroladores, sensores ambientales, parqueadero cerrado, nodos secundarios o sensores, nodo principal, Xbee.

## **ABSTRACT**

In the present degree work, the study and the implementation of a network of wireless sensors for the monitoring of environmental variables (CO<sub>2</sub>, temperature, air quality) applied in the parking lot of the UCSG is explained, this network is based on microcontrollers of 32 bits (STM32) all this through the development of secondary nodes that will be responsible for sending the information to a main node to be displayed on an LCD. For this system a correlation research of quantitative type was carried out applying the bibliographic and experimental research sources, with this it was possible to get to understand about the WSN its most important characteristics and in this case the communication standards that use the XBee, on the other hand The quantitative research helped to evaluate the data through functional tests of the proposed system that served for the discussion and analysis of the project. As a result of this titration work, a wireless sensor network was implemented, consisting of 3 secondary nodes in charge of the census of the environmental variables mentioned above and 1 main node to which the secondary nodes will be communicated by sending the different types of information through the addresses of the nodes previously established in its data network frame and thus know the levels of environmental contamination that exist in the parking lot of the UCSG.

**Key Words:** Network of wireless sensors (WSN), microcontrollers, environmental sensors, closed parking, secondary nodes or sensors, main node, Xbee.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años la contaminación ambiental ha aumentado en el mundo, y con eso hemos podido notar las consecuencias que ha causado en el planeta con los recientes desastres naturales, el calentamiento global, las bajas temperaturas, los cambios climáticos, que han llegado a cobrar vidas humanas porque no hacemos conciencia de aquello. En Guayaquil se registró que el 39% de la contaminación ambiental en la ciudad proviene de los vehículos y el 61%, de las cargas residuales del río Guayas, según una evaluación del proyecto Huella de Ciudades. Según la última evaluación, Guayaquil genera 6,8 toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) al año y 1.015 millones de m<sup>3</sup> de agua contaminada.

El monitoreo y control sobre estos gases puede aplicarse mediante el uso de redes de sensores inalámbricas (WSN), éstas gozan de grandes beneficios debido a su bajo costo, factor de pequeña escala, nodos de sensores inteligentes. No solo pueden emplearse en áreas de interés engorrosas y peligrosas para monitorear o controlar la región, sino que también pueden implementarse para automatizar otro tipo de tareas. En este trabajo la red de sensores inalámbricos de bajo costo se plantea como una solución para el edificio de parqueaderos de la UCSG que tiene una capacidad de 1000 unidades, dispone de 3 pisos de parqueos, por lo que hay muchas posibilidades de que se generen zonas de acumulación de gases y de ruidos que podrían ser peligroso para la salud humana. Esto hace necesario monitorear los valores de esta contaminación en varios puntos del espacio destinado a parqueaderos y sectores afectados, a fin de determinar picos peligrosos para la salud humana.

Previo al desarrollo de este trabajo de titulación, se realizó la búsqueda de documentos investigativos relacionados al tema propuesto, en los cuáles se pudo analizar las características de este tipo de redes en la actualidad, los módulos y protocolos de comunicación utilizados al momento de la implementación del sistema de redes de sensores inalámbricos en diversos ámbitos, en este caso con estándares ZigBee.

El proyecto de titulación presentado, posee un gran valor académico e investigativo ya que incluye varios temas de estudio e investigación relacionadas al monitoreo y control, automatización, envío y recepción de datos de manera inalámbrica por medio de las WSN, pudiendo estos ser estudiado y explorado por estudiantes, docentes, o

personas interesadas en este tipo de sistemas. El costo bajo de esta red de sensores inalámbricos genera un aporte a la sociedad, ya que puede ser aplicado en otros ambientes como soluciones de bajo costo para la observación del hábitat y el medio ambiente, desde la vigilancia militar y civil y las aplicaciones de detección y seguimiento de blancos, hasta la agricultura de precisión y la agricultura, el monitoreo de pacientes en el cuidado de la salud, aplicaciones residenciales como la gestión de la energía, para la seguridad. y eficiencia en redes vehiculares para exploraciones del espacio exterior.

El sistema tuvo una limitación con respecto a la obtención de materiales, ya que algunos de ellos no se podían conseguir en la localidad, esto generó un impedimento de otras opciones de pruebas de funcionamiento con respecto a los nodos diseñados de la red de sensores inalámbricos, incluyendo el número de nodos a desarrollarse en el proyecto.

El objetivo principal de la red es desarrollar un sistema de monitoreo basado en tecnología inalámbrica apoyada en una plataforma de microcontroladores de 32 bits, para la medición de parámetros ambientales en el edificio de parqueaderos de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil para lo cual se realizaron pruebas de funcionamiento cumpliendo los objetivos establecidos en el trabajo de titulación.

## CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

En este capítulo se detallan los aspectos generales del tema de este trabajo de titulación, los cuáles consisten en el planteamiento del problema, justificación, los objetivos que proyectamos y guiarán en el proceso, las delimitaciones que se nos presentan. También la metodología que se utilizó para la parte investigativa del proyecto teniendo en cuenta el tipo y los métodos empleados.

### 1.1. Planteamiento del problema

La concentración de gases contaminantes y el ruido generado por automotores encendidos en grandes parqueaderos cubiertos puede llegar a generar niveles contaminantes peligrosos para la salud humana (Acosta Gómez, R. C.,2017). Según la última evaluación, Guayaquil genera 6,8 toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) al año y 1.015 millones de m<sup>3</sup> de agua contaminada. Del total de emisiones de CO<sub>2</sub> en la urbe, el 39% proviene del transporte (principalmente por el consumo de gasolina y GLP), 25% de residuos (disposición de desechos), 16% de zonas residenciales (consumo de energía eléctrica y GLP), 14% del sector industrial (por uso de electricidad y diésel) y 6% del comercial e institucional. (Diario El Telégrafo, 2016).

El edificio de parqueaderos de la UCSG que tiene una capacidad de 1000 unidades, dispone de 3 pisos de parqueos, por lo que hay muchas posibilidades de que se generen zonas de acumulación de gases y de ruidos que podrían ser peligroso para la salud humana. Esto hace necesario monitorear los valores de esta contaminación en varios puntos del espacio destinado a parqueaderos y sectores afectados, a fin de determinar picos peligrosos para la salud humana. La forma de medir esta contaminación de gases se realiza a través de compañías especializadas que disponen de equipos apropiados para estas mediciones y durante un tiempo determinado (2 a 3 días) tomas muestras de parámetros ambientales y generan un informe de las condiciones determinadas. Este método de obtener valores de contaminación es muy puntual, por lo que se hace necesario tener un monitoreo continuo que determinen tiempo real los valores de contaminación y alerte de posibles peligros. En base al análisis realizado, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿El monitoreo continuo de la zona de parqueo de la UCSG, permitirá determinar con precisión las zonas y niveles de mayor contaminación?

## **1.2. Justificación**

Monitorear de forma permanente un espacio contaminado requiere una infraestructura que significaría costos elevados de equipos, instalación y mantenimiento, por lo que su aplicación no es viable (Bernal, d. C. C., Flórez, m. A. N., & San Juan, d. P. 2015). Se requiere de un sistema de bajo costo, bajo consumo de energía y que se ajuste a las necesidades específicas del espacio de parqueo, lo cual no se encuentra en el mercado local.

Las redes de sensores inalámbricas diseñadas a partir de componentes de bajo costo (esto implica desde los microcontroladores, módulos RF y sensores), son aplicaciones que permiten establecer una red o una plataforma de nodos sensores para tomar los valores de las variables involucradas en la contaminación. Por lo que se hace necesario para poder monitorear el ambiente de un espacio cerrado destinado a parqueo de automotores, de forma económica y eficiente, diseñar una red que comunique los nodos sensores a una central, donde se realizara el almacenamiento y procesamiento de la información, para la generación de reportes y alertas que permiten precautelar la salud y seguridad de los usuarios.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Desarrollar un sistema de monitoreo basado en tecnología inalámbrica apoyada en una plataforma de microcontroladores de 32 bits, para la medición de parámetros ambientales en el edificio de parqueaderos de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar nodos sensores para la medición de parámetros ambientales basados en microcontroladores de 32 bits y sensores para la determinación de gases contaminantes emanado por vehículos.
- Diseñar una red de sensores inalámbricas utilizando módulos de RF de bajo costo para comunicar nodos sensores de medición ambiental.

- Realizar pruebas experimentales del sistema de medición de parámetros ambientales que permitan validar su funcionamiento y evaluar las métricas de la red.

#### **1.4. Metodología de la Investigación**

El presente trabajo de titulación utiliza la investigación correlacional, que es un tipo de método de investigación no experimental, en el que el investigador mide variables, las comprende y evalúa la relación entre ellas sin la influencia de ninguna variable extraña. La investigación correlacional busca variables que parecen interactuar entre sí, de modo que cuando vea que una variable está cambiando, tenga una idea clara de cómo cambiará la otra variable.

También, se emplea métodos de investigación descriptivo y exploratorio. Descriptivo, porque con los fundamentos teóricos se establecen las herramientas necesarias para escoger el estándar adecuado para la comunicación inalámbricas de sensores. Exploratorio, porque se realiza una búsqueda de información relevante de los equipos a utilizar y los diferentes protocolos a utilizar.

Para todo este proyecto se necesitarán varias acciones a tomar que son:

- Investigación de fuentes de información basados en comunicaciones y protocolos.
- Estudio y análisis del área (parqueadero) donde serán colocados los nodos de la red inalámbrica.
- Análisis de cuántos nodos principales y secundarios serán utilizados para que puedan cubrir todo el rango del área propuesta.
- Determinar los sensores ambientales que serán utilizados para armar los nodos.
- Diseño de nodos principales y secundarios.
- Programación de los Xbee para la comunicación y envío de paquetes de datos entre los nodos.
- Pruebas de comunicación y funcionamiento de la red.
- Mejora del sistema y corrección de errores en caso de que existieran.
- Cálculo de costos de toda la red.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En los siguientes párrafos de este capítulo se analizan el estado del arte y la fundamentación teórica de las redes de sensores inalámbricos. En lo relacionado al estado del arte, se ha elaborado un resumen de los artículos científicos y más documentos válidos encontrados de los últimos años, que tienen relación con el tema de investigación planteado en este trabajo y que aportan con ideas importantes en su desarrollo. Finalmente, se ha resumido lo fundamental de las aportaciones teóricas relacionadas con el tema.

### 2.1. Estado del Arte.

En el artículo “Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de alertas tempranas en minas subterráneas: una solución a la problemática de atmósferas explosivas en la minería de carbón en Colombia” los autores presentan una alternativa de automatización y control en el monitoreo de alertas tempranas de atmósferas explosivas, mediante el protocolo ZigBee. Su propósito fue diseñar una red de sensores inalámbricos inteligentes para recopilar la información, de forma rápida y confiable, sobre las concentraciones de gases que generan una amenaza de atmósferas explosivas en minas subterráneas. De forma remota se pueden determinar los límites de alerta de acuerdo a los datos suministrados por la red, enviando un mensaje visual representado en semáforos a puntos estratégicos dentro de la mina. (Jiménez Builes, J. A., Romero Acero, A., & Marín Cano, A., 2013).

En la investigación “Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia” (Cama-Pinto, A., Acosta-Coll, M., Piñeres-Espitia, G., Caicedo-Ortiz, J., Zamora-Musa, R., & Sepúlveda-Ojeda, J., 2016). Se enfocaron en el riesgo de muerte de personas y pérdidas materiales asociadas con las inundaciones repentinas en las calles de la ciudad que es alta. Por ello, el artículo que presentaron muestra el diseño de una arquitectura de red de sensores inalámbricos o WSN (Wireless Sensor Network) para monitorear en tiempo real parámetros atmosféricos que influyen en la detección del nivel de peligrosidad de inundaciones repentinas o los llamados familiarmente "arroyos", producto de las súbitas e intensas lluvias en un breve período de tiempo. El diseño de la red se hizo por medio de un estudio de sitio o *site survey* para obtener los

datos y resultados que son usados en el presente trabajo. El sistema diseñado será de utilidad para la toma de decisiones preventivas por parte del usuario final y, además, está desarrollado para que sea replicable y escalable en entornos similares. Además, en este trabajo se ha probado la plataforma waspmote y los módulos XBee-PRO ZB (S2) como herramienta tecnológica para la WSN.

En su proyecto de titulación “Sistema de detección de incendios forestales mediante redes sensoriales inalámbricas (Zigbee)” (Jennyfer, K., & Carlos, A., 2014) han hecho énfasis en que, en el Ecuador, los Incendios Forestales han sido y son una de las principales causas de deterioro ambiental, teniendo varios efectos negativos sobre plantas, masas forestales, microclima, suelo, agua, fauna y sobre los valores recreativos. En definitiva, los incendios forestales influyen significativamente en la alteración y degradación de la vida. Según la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos el año 2012 se perdió 17.600 hectáreas de bosques, páramos y cultivos. Dichas tecnologías han permitido crear un sistema que han denominado Natura Sys que está conformado por motas sensoriales receptoras de información ambiental tal como temperatura, humedad y presencia de humo; así como una base central encargada de recolectar toda la información de forma inalámbrica enviada por los dispositivos sensoriales, ésta información será visualizada en una aplicación de escritorio y en donde se podrá detectar una posible alerta de incendio forestal bajo los parámetros programados en ésta; y como un plus se ha diseñado una página web en la cual se muestran reportes estadísticos acerca del área forestal monitoreada.

El desarrollo de las redes inteligentes abarca un sin número de aplicaciones, dentro de estas redes se encuentran las redes de sensores inalámbricas que cada vez toma mayor fuerza debido a la necesidad de tener información precisa de lo que sucede en nuestro entorno, ya sea ambiental, domótica, militar o médico. (Bravo Granda, B. A., Belduma, B., & Alberto, L, 2017). Los autores diseñan un proyecto que analiza el comportamiento vehicular a partir de mediciones de concentración de CO<sub>2</sub> y niveles de ruido, medidos en porcentaje por millón (ppm) y decibelios (dB) respectivamente. Estas mediciones fueron aplicadas en un sector de la ciudad de Cuenca. La red inalámbrica basada en sensores ZigBee, se compone por cuatro nodos sensores y un coordinador. Los esclavos envían los datos de forma inalámbrica hacia el maestro, el cual, a través de una interfaz gráfica desarrollada en JAVA, muestra el

comportamiento que describen las curvas de medición y almacenan la información en un servidor web vinculado a MySQL.

(Moya, G., & Javier, E., 2016), evaluaron el *Diseño de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) para monitorear parámetros relacionados con la agricultura* en el cual se realizó la implementación y diseño de una red WSN, la cual les permitió generar una configuración en estrella, misma que está configurada con sus nodos finales y Gateway, la recolección de muestras se guardó en una base de datos, para que su información permita generar un análisis de parámetros de medición. Los parámetros que tomaron en consideración fueron: la humedad, temperatura, luminosidad y presión ambiental, así también como la humedad y temperatura del suelo. En cuanto al análisis de datos obtenidos, se refiere a las medidas de humedad y temperatura ambiental y del suelo, así como también parámetros óptimos para una buena producción de rosas, mismos que están alrededor de 18 °C a 24 °C durante el día, en la noche puede cambiar dichos parámetros llegando a ser considerado como aceptables de 12 a 14 °C, cabe recalcar que la humedad relativa óptima del ambiente está entre el 60 a 80% de humedad.

Otro artículo científico que vale mencionar es el de “Redes inalámbricas de Geosensores aplicadas en sistemas de observación y monitoreo ambiental”, aquí los autores abordaron una visión general sobre los componentes que integran la plataforma computacional base para el funcionamiento de una Red Inalámbrica de Geosensores (GSN, Wireless GeoSensor Network) y modelos de envío de datos por demanda, continuos, conducidos por eventos e híbridos que se pueden establecer entre estos componentes. Describe los tipos de GSN y presenta gráficamente las diferentes arquitecturas empleadas en las GSN para colección de información y la forma como cada una beneficia a los tipos de GSN. Se definen los sistemas de monitoreo ambiental como un sistema continuo de observación de medidas y evaluaciones para propósitos definidos y se presentan ejemplos de los diferentes tipos de sistemas de control y observación ambiental tales como sistemas de observación terrestre, sistemas de observación geológica y sistemas de observación acuática. Esto los ha llevado a diseñar redes inalámbricas que pueden monitorear variables físicas, ambientales o atmosféricas, permitiendo generar alertas tempranas y consecuentemente prevenir catástrofes mayores. (Velandia, J. A. B., & Castillo, J. N. P., 2012).

En el trabajo publicado “Simulación de redes de sensores inalámbricos: Un modelo energético a nivel nodo-sensor bajo las especificaciones IEEE 802.15.4 y Zigbee”, se analizó que actualmente la gran mayoría de fabricantes de dispositivos (nodos-sensores) de redes de sensores inalámbricos (WSNs), están utilizando las especificaciones IEEE 802.15.4 y ZigBee en un gran número de sus dispositivos (nodos-sensores), debido a la aceptación y amplia utilización que estos han tenido a nivel académico, comercial e industrial. Las principales características y ventajas de los dispositivos (nodos-sensores) de redes de sensores inalámbricos que utilizan las especificaciones IEEE 802.15.4/ZigBee son el bajo costo de hardware y el bajo consumo de energía, para aplicaciones que no necesitan un alto flujo de datos (desde 20Kbits/seg hasta 250Kbits/seg). En este trabajo de investigación, se diseñó e implementó en el simulador de redes OPNET, un modelo de simulación de WSN que se basa en las especificaciones IEEE 802.15.4 y ZigBee. El modelo de simulación tiene tres modelos de nodo, cada uno consta de un modelo de flujo de datos y un modelo energético. (Amarillo Rojas, M. O., 2015).

Este artículo publicado en la revista colombiana de tecnologías avanzadas “Automatización de un sistema de suministro de agua potable a través de la tecnología Zigbee”, consiste de una aplicación industrial, para el control y automatización de procesos a través de una tecnología inalámbrica. El sistema utilizado para el desarrollo del sistema inalámbrico fue basado en el protocolo ZigBee, y consiste en una potente herramienta para la optimización de aplicaciones industriales. Para la prueba y el funcionamiento del sistema se realizó un prototipo para un proceso de suministro de agua potable, donde se llevan a cabo acciones como: Suministrar y llenar el tanque de abastecimiento de agua en forma manual y automática, adquirir datos, realizar mediciones de nivel, mediciones de volúmenes de agua y generar históricos. La herramienta computacional LabView fue utilizada para el control y monitoreo del proceso. (Acevedo, C. M. D., & Iturriago, A. X., 2013).

Un artículo publicado por la Universidad Politécnica de Valencia, titulado “Sistema Distribuido de Detección de Sismos Usando una Red de Sensores Inalámbrica para Alerta Temprana” hace hincapié en que el detectar eventos disruptivos usando sensores COTS como los utilizados en *smartphones* representa un gran desafío, pero también una oportunidad interesante. En este artículo se presenta una arquitectura de sistema de tiempo real crítico, jerárquico y distribuido, que hace

uso de *smartphones* que actúan como sensores a través de una aplicación de bajo consumo de energía que convierte a sus acelerómetros en acelerógrafos. Los *smartphones* desplegados forman una red de sensores que detecta, analiza y notifica un pico sísmico. El sistema optimiza cálculos distribuidos y capacidades de comunicación en *smartphones* para proveer tiempo extra para alertas tempranas en escenarios de desastre de tipo sísmico, aunque puede ser empleada como solución a otros desastres naturales. Se propone una solución innovadora de bajo coste que realiza análisis tanto espaciales como temporales, no presentes en otros trabajos, lo cual lo hace más preciso y personalizable permitiendo adaptarse a las características geográficas de la zona, de red, y recursos tanto humanos como monetarios. (Vizueté, A. Z., Llopis, I. P., Salvador, C. P., & Domingo, M. E., 2015).

En la revista: US National Library of Medicine National Institutes of Health, el artículo “Security and Privacy Issues in Wireless Sensor Networks for Healthcare Applications”; comprende que el uso de redes de sensores inalámbricos (WSN) en aplicaciones de atención médica está creciendo a un ritmo acelerado. Ya se están utilizando numerosas aplicaciones, como el monitor de frecuencia cardíaca, el monitor de presión arterial y la cápsula endoscópica. Para abordar el creciente uso de la tecnología de sensores en esta área, ha surgido un nuevo campo conocido como redes inalámbricas de área del cuerpo (WBAN o simplemente BAN). Como la mayoría de los dispositivos y sus aplicaciones son de naturaleza inalámbrica, las preocupaciones de seguridad y privacidad se encuentran entre las principales áreas de preocupación. Debido a la participación directa de los humanos también aumenta la sensibilidad. Ya sea que los datos recopilados de pacientes o individuos se obtengan con el consentimiento de la persona o sin ella debido a la necesidad del sistema, el uso indebido o la privacidad pueden impedir que las personas aprovechen todos los beneficios del sistema. (Al Ameen, M., Liu, J., & Kwak, K., 2012).

## **2.2. Introducción de WSN**

Las redes de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Network*, WSN) se pueden definir como redes inalámbricas autoconfiguradas y sin infraestructura para monitorear las condiciones físicas o ambientales, como la temperatura, el sonido, la vibración, la presión, el movimiento o los contaminantes, y para pasar de forma cooperativa sus datos a través de la red a una ubicación o sumidero (Sink) donde los datos pueden ser observados y analizados. (Archila & Santamaría, 2013)

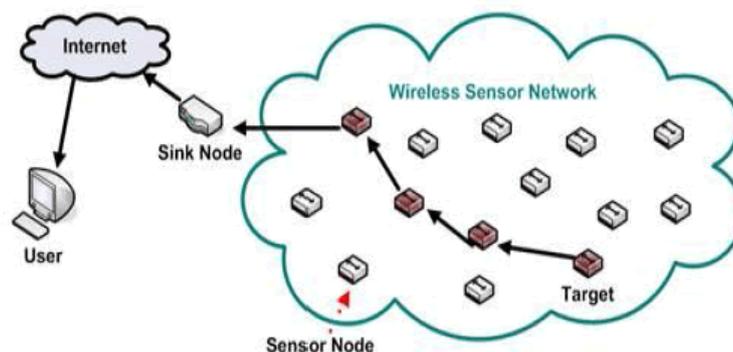


Figura 2. 1: Topología típica de una red de sensores inalámbricos.

Fuente: (Sumitha, 2014).

Una estación base (*Base Station, BS*) o receptor actúa como una interfaz entre los usuarios y la red. Uno puede recuperar la información requerida de la red inyectando consultas y recopilando resultados del sumidero (Sink) (Capella, 2010). Normalmente, una red de sensores inalámbricos contiene cientos de miles de nodos de sensores. Los nodos sensores pueden comunicarse entre sí utilizando señales de radio. Un nodo de sensor inalámbrico está equipado con dispositivos de detección y computación, transceptores de radio y componentes de alimentación. (Maroto, 2010)

Los nodos individuales en una WSN están intrínsecamente limitados por los recursos: tienen una velocidad de procesamiento, una capacidad de almacenamiento y un ancho de banda de comunicación limitados. Una vez que se implementan los nodos sensores, son responsables de auto organizar una infraestructura de red adecuada, a menudo con comunicación multisalto con ellos (Rueda-Rueda & Portocarrero, 2016). Entonces los sensores a bordo comienzan a recopilar información de interés. Los dispositivos sensores inalámbricos también responden a las consultas enviadas desde un "sitio de control" para realizar instrucciones específicas o proporcionar muestras de detección.

El modo de trabajo de los nodos sensores puede ser continuo o controlado por eventos. El sistema de posicionamiento global (*Global Position System, GPS*) y los algoritmos de posicionamiento local se pueden usar para obtener información de ubicación y posicionamiento. Los dispositivos sensores inalámbricos pueden equiparse con actuadores para "actuar" en ciertas condiciones. Estas redes a veces se

refieren más específicamente a redes inalámbricas de sensores y actuadores como se describe en (Toor & Jain, 2016)

### **2.3. Aplicaciones de la red de sensores inalámbricos.**

Las redes de sensores inalámbricos han ganado una considerable popularidad debido a su flexibilidad para resolver problemas en diferentes dominios de aplicaciones y tienen el potencial de cambiar nuestras vidas de muchas maneras diferentes. Las WSN se han aplicado con éxito en varios dominios de aplicación, tales como:

- a. Aplicaciones militares: las redes de sensores inalámbricos probablemente sean una parte integral de los sistemas militares de comando, control, comunicaciones, computación, inteligencia, vigilancia en el campo de batalla, reconocimiento y selección de objetivos.
- b. Monitoreo del área: en el monitoreo del área, los nodos de los sensores se despliegan en una región donde se controlará algún fenómeno. Cuando los sensores detectan el evento que se está monitoreando (calor, presión, etc.), el evento se informa a una de las estaciones base, que luego toma las medidas apropiadas.
- c. Transporte: la información de tráfico en tiempo real está siendo recolectada por WSN para luego alimentar modelos de transporte y alertar a los conductores de congestión y problemas de tráfico.
- d. Aplicaciones de salud: algunas de las aplicaciones de salud para redes de sensores son interfaces compatibles para discapacitados, monitoreo integrado de pacientes, diagnósticos y administración de medicamentos en hospitales, tele-monitoreo de datos fisiológicos humanos y seguimiento y monitoreo de médicos o pacientes dentro de un hospital.
- e. Detección ambiental: el término redes de sensores ambientales (*Environmental Sensor Networks, ESN*) se ha desarrollado para cubrir muchas aplicaciones de WSN a la investigación en ciencias de la tierra. Esto incluye la detección de volcanes, océanos, glaciares, bosques, etc. Algunas otras áreas importantes se enumeran a continuación:
  - Vigilancia de la contaminación del aire.
  - Detección de incendios forestales.
  - Monitorización de invernaderos.

- Detección de deslizamientos
- f. Monitoreo estructural: los sensores inalámbricos se pueden utilizar para monitorear el movimiento dentro de los edificios y la infraestructura, como puentes, pasos elevados, terraplenes, túneles, etc., lo que permite que las prácticas de ingeniería monitoreen los activos de manera remota sin la necesidad de visitas costosas al sitio.
  - g. Monitoreo industrial: las redes de sensores inalámbricos se han desarrollado para el mantenimiento basado en el estado de la maquinaria (CBM), ya que ofrecen ahorros significativos en los costos y permiten nuevas funcionalidades. En los sistemas cableados, la instalación de suficientes sensores a menudo está limitada por el costo del cableado.
  - h. Sector agrícola: el uso de una red inalámbrica libera al agricultor del mantenimiento del cableado en un entorno difícil. La automatización del riego permite un uso más eficiente del agua y reduce los residuos.

#### **2.4. Problemas de diseño de una red de sensores inalámbricos**

El despliegue de redes de sensores que son un súper conjunto de los que se encuentran en redes inalámbricas Ad-hoc presenta muchos desafíos. Los nodos sensores se comunican a través de líneas inalámbricas y sin pérdidas, sin infraestructura. Un desafío adicional está relacionado con el suministro de energía limitado, generalmente no renovable, de los nodos sensores.

Para maximizar la vida útil de la red, los protocolos deben diseñarse desde el principio con el objetivo de una gestión eficiente de los recursos energéticos (Potdar, Sharif, & Chang, 2009). Los problemas de diseño de redes de sensores inalámbricos se mencionan en (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam, & Cayirci, 2002), y diferentes plataformas posibles para la simulación y prueba de los protocolos de enrutamiento para WSN se analizan en el software NS-2. A continuación, se discute los problemas de diseño individuales con mayor detalle.

- a. Tolerancia a fallos: los nodos de los sensores son vulnerables y se implementan con frecuencia en entornos peligrosos. Los nodos pueden fallar debido a problemas de hardware o daños físicos o agotando su suministro de energía. Se espera que las fallas de los nodos sean mucho más altas que las que normalmente se consideran en redes inalámbricas cableadas o basadas

en infraestructura. Los protocolos implementados en una red de sensores deberían poder detectar estas fallas tan pronto como sea posible y ser lo suficientemente robustos para manejar una cantidad relativamente grande de fallas mientras se mantiene la funcionalidad general de la red. Esto es especialmente relevante para el diseño del protocolo de enrutamiento, que debe garantizar que las rutas alternativas estén disponibles para el reencaminamiento de los paquetes. Los diferentes entornos de implementación plantean diferentes requisitos de tolerancia a fallos.

- b. Escalabilidad: las redes de sensores varían en escala desde varios nodos hasta varios cientos de miles. Además, la densidad de despliegue también es variable. Para recopilar datos de alta resolución, la densidad del nodo puede alcanzar el nivel donde un nodo tiene varios miles de vecinos en su rango de transmisión. Los protocolos implementados en redes de sensores deben ser escalables a estos niveles y ser capaces de mantener un rendimiento adecuado.
- c. Costos de producción: dado que muchos modelos de implementación consideran que los nodos sensores son dispositivos desechables, las redes de sensores pueden competir con los enfoques tradicionales de recopilación de información solo si los nodos sensores individuales pueden producirse de manera muy económica. El precio objetivo previsto para un nodo sensor debería ser idealmente inferior a \$ 1.
- d. Restricciones de hardware: como mínimo, cada nodo sensor debe tener una unidad de detección, una unidad de procesamiento, una unidad de transmisión y una fuente de alimentación. Opcionalmente, los nodos pueden tener varios sensores incorporados o dispositivos adicionales, como un sistema de localización para permitir el enrutamiento con reconocimiento de ubicación. Sin embargo, cada funcionalidad adicional tiene un costo adicional y aumenta el consumo de energía y el tamaño físico del nodo. Por lo tanto, la funcionalidad adicional debe equilibrarse siempre con el costo y los requisitos de bajo consumo.
- e. Topología de la red de sensores: aunque las WSN han evolucionado en muchos aspectos, siguen siendo redes con recursos limitados en términos de energía, capacidad de computación, memoria y capacidades de comunicación. De estas limitaciones, el consumo de energía es de suma

importancia, como lo demuestra la gran cantidad de algoritmos, técnicas y protocolos que se han desarrollado para ahorrar energía y, por lo tanto, extender la vida útil de la red. El mantenimiento de la topología es uno de los problemas más importantes investigados para reducir el consumo de energía en las redes de sensores inalámbricos.

- f. Medios de transmisión: la comunicación entre los nodos normalmente se implementa mediante la comunicación por radio a través de las populares bandas ISM. Sin embargo, algunas redes de sensores utilizan comunicación óptica o infrarroja, y esta última tiene la ventaja de ser robusta y prácticamente libre de interferencias.
- g. Consumo de energía: como ya se ha visto, muchos de los desafíos de las redes de sensores giran en torno a los limitados recursos de energía. El tamaño de los nodos limita el tamaño de la batería. El diseño de software y hardware debe considerar cuidadosamente los problemas del uso eficiente de la energía. Por ejemplo, la compresión de datos puede reducir la cantidad de energía utilizada para la transmisión de radio, pero utiliza energía adicional para el cálculo y / o filtrado. La política energética también depende de la aplicación; en algunas aplicaciones, podría ser aceptable desactivar un subconjunto de nodos para ahorrar energía, mientras que otras aplicaciones requieren que todos los nodos operen simultáneamente.

## **2.5. Estructura de una red de sensores inalámbricos.**

Dentro de la estructura de una red de sensores inalámbricos se analizan diferentes topologías para redes de comunicaciones de radio frecuencia. A continuación, se describe brevemente las topologías de red que se mas se utilizan en las redes de sensores inalámbricos:

### **2.5.1. Red estrella (punto a multipunto).**

Una red estrella es una topología de comunicaciones en la que una sola estación base puede enviar y/o recibir un mensaje a varios nodos remotos, tal como se muestra en la figura 2.2. Los nodos remotos no tienen permitido enviar mensajes entre sí. La ventaja de este tipo de red para WSN incluye la simplicidad, la capacidad de mantener al mínimo el consumo de energía del nodo remoto. También permite comunicaciones de baja latencia entre el nodo remoto y la estación base. La desventaja de dicha red es

que la estación base debe estar dentro del rango de transmisión de radio de todos los nodos individuales y no es tan robusta como otras redes debido a su dependencia de un solo nodo para administrar la red.

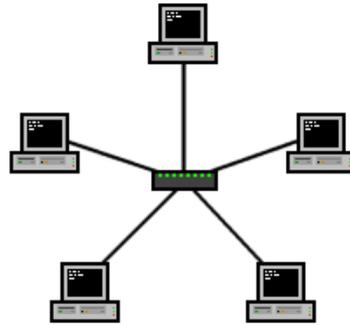


Figura 2. 2: Topología de una red estrella.

Fuente: (Roldán , 2015).

### **2.5.2. Red de malla.**

Una red de malla permite transmitir datos de un nodo a otro nodo en la red que está dentro de su rango de transmisión de radio. Esto permite lo que se conoce como comunicaciones de múltiples saltos, es decir, si un nodo desea enviar un mensaje a otro nodo que está fuera del rango de comunicaciones de radio, puede usar un nodo intermedio para reenviar el mensaje al nodo deseado, tal como se muestra en la figura 2.3. Esta topología de red tiene la ventaja de la redundancia y la escalabilidad. Si un nodo individual falla, un nodo remoto aún puede comunicarse con cualquier otro nodo en su rango, que, a su vez, puede reenviar el mensaje a la ubicación deseada.

Además, el rango de la red no está necesariamente limitado por el rango entre nodos individuales; simplemente se puede extender agregando más nodos al sistema. La desventaja de este tipo de red es que el consumo de energía para los nodos que implementan las comunicaciones de múltiples saltos generalmente es mayor que para los nodos que no tienen esta capacidad, lo que a menudo limita la vida útil de la batería. Además, a medida que aumenta el número de saltos de comunicación a un destino, también aumenta el tiempo para entregar el mensaje, especialmente si el funcionamiento a baja potencia de los nodos es un requisito.



Figura 2. 3: Topología de una red en malla.

Fuente: (Roldán , 2015)

### 2.5.3. Red híbrida estrella-malla.

Un híbrido entre la red en estrella y malla (véase la figura 2.4) proporciona una red de comunicaciones robusta y versátil, al mismo tiempo que mantiene la capacidad de mantener el consumo de energía de los nodos inalámbricos al mínimo. En esta topología de red, los nodos sensores con la potencia más baja no están habilitados con la capacidad de reenviar mensajes. Esto permite mantener un consumo mínimo de energía. Sin embargo, otros nodos en la red están habilitados con capacidad de salto múltiple, lo que les permite reenviar mensajes de los nodos de baja potencia a otros nodos en la red. En general, los nodos con capacidad de salto múltiple tienen mayor potencia y, si es posible, a menudo se conectan a la línea eléctrica principal. Esta es la topología implementada por el promotor estándar de redes de malla conocido como ZigBee.

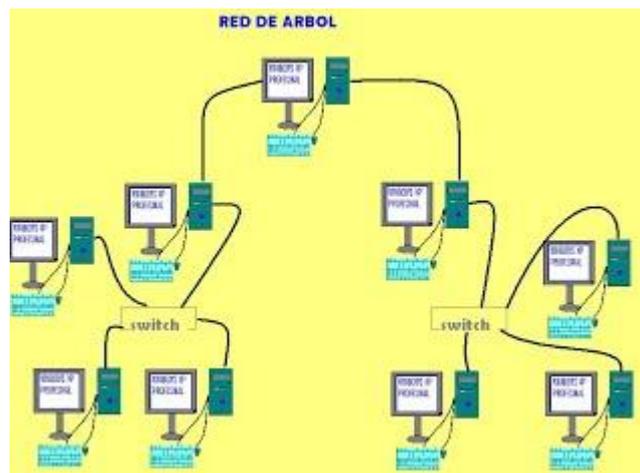


Figura 2. 4: Topología de una red híbrida en estrella-malla o árbol.

Fuente: (Fontánez & Marín , 2014).

## **2.6. Contaminación ambiental.**

Las actividades de desarrollo, como la construcción, el transporte y la fabricación, no solo agotan los recursos naturales, sino que también producen una gran cantidad de desechos que conducen a la contaminación del aire, el agua, el suelo y los océanos; calentamiento global y lluvias ácidas. Los residuos no tratados o tratados incorrectamente son una de las principales causas de la contaminación de los ríos y la degradación del medio ambiente que causa mala salud y pérdida de productividad de los cultivos. En esta sección, se estudia las principales causas de la contaminación, sus efectos en nuestro medio ambiente y las diversas medidas que se pueden tomar para controlar tales contaminaciones.

### **2.6.1. Contaminación y contaminantes.**

Las actividades humanas, directa o indirectamente, afectan adversamente el medio ambiente. Una trituradora de piedra agrega una gran cantidad de partículas en suspensión y ruido a la atmósfera. Los automóviles sacan de sus tubos de escape óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, dióxido de carbono, monóxido de carbono y una mezcla compleja de hidrocarburos no quemados y hollín negro que contaminan la atmósfera. Las aguas residuales domésticas y las fugas de los campos agrícolas, cargados de pesticidas y fertilizantes, contaminan los cuerpos de agua.

Los efluentes de las curtiembres contienen muchos químicos dañinos y emiten mal olor. Estos son solo algunos ejemplos que muestran cómo las actividades humanas contaminan el medio ambiente. La contaminación puede definirse como la adición de material indeseable al medio ambiente como resultado de actividades humanas. Los agentes causantes de la contaminación ambiental se denominan contaminantes. Un contaminante puede definirse como una sustancia física, química o biológica liberada involuntariamente al medio ambiente que es directa o indirectamente dañina para los humanos y otros organismos vivos.

### **2.6.2. Tipos de contaminación.**

La contaminación puede ser de los siguientes tipos:

- contaminación del aire
- contaminación del ruido o acústica
- contaminación térmica

- contaminación por radiación

### 2.6.2.1. Contaminación del aire.

La contaminación del aire es resultado de la actividad industrial y doméstica. Un uso cada vez mayor de combustibles fósiles en centrales eléctricas, industrias, transporte, minería, construcción de edificios, canteras de piedra había llevado a la contaminación del aire. La contaminación del aire puede definirse como la presencia de cualquier sustancia sólida, líquida o gaseosa, incluido el ruido y la radiación radiactiva en la atmósfera en una concentración que pueda ser directa e indirectamente perjudicial para los seres humanos u otros organismos vivos, plantas, propiedades o interferencias con los procesos ambientales normales.

Los contaminantes son de dos tipos: (1) partículas suspendidas y (2) contaminantes gaseosos como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), NO<sub>x</sub>, etc. Algunos de los principales contaminantes del aire, sus fuentes y efectos se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1: Contaminantes del aire, sus fuentes y efectos.

Contaminante	Fuentes	Efectos
Partículas en suspensión/polvo	Humo de hollín doméstico, industrial y vehicular.	Depende de la composición específica. Reduce la luz solar y la visibilidad, aumenta la corrosión, la neumoconiosis, el asma, el cáncer y otras enfermedades pulmonares.
Cenizas	Parte del humo liberado de chimeneas de fábricas y centrales eléctricas.	Se asienta sobre vegetación, casas. Agrega a la materia de participación suspendida (SPM) en el aire. Los lixiviados contienen material nocivo.

Fuente: (Romero , 2014).

### 2.6.3. Contaminación del ruido o acústica.

El ruido es uno de los contaminantes más generalizados. Un reloj musical puede ser agradable para escuchar durante el día, pero puede ser irritante durante el sueño por la noche. El ruido por definición es "sonido sin valor" o "cualquier ruido no deseado por el destinatario". El ruido en industrias como el corte y trituración de

piedras, piezas forjadas de acero, altavoces, gritos de los vendedores ambulantes que venden sus productos, el movimiento de vehículos pesados de transporte, ferrocarriles y aeropuertos provoca irritación y un aumento de la presión arterial, pérdida de temple, disminución de la eficiencia en el trabajo, pérdida de audición que puede ser por primera vez temporal, pero puede volverse permanente en la tensión de ruido continúa.

Por lo tanto, es de suma importancia que se controle el ruido excesivo. El nivel de ruido se mide en términos de decibelios (dB). La OMS (Organización Mundial de la Salud) ha prescrito un nivel de ruido óptimo de 45 dB por día y 35 dB por noche. Cualquier cosa por encima de 80 dB es peligrosa.

#### **2.6.4. Contaminación por radiación.**

La contaminación por radiación es el aumento de la radiación de fondo natural. Hay muchas fuentes de contaminación por radiación, como los desechos nucleares de las centrales nucleares, la minería y el procesamiento de material nuclear, etc. El peor caso de la contaminación nuclear fue el desastre de Chernobyl en Rusia que ocurrió en 1986, pero los efectos aún más en la actualidad.

#### **2.7. Sensores para control ambiental.**

El monitoreo ambiental es necesario para proteger al público y al ambiente de contaminantes tóxicos y patógenos que pueden ser liberados en una variedad de medios, incluyendo aire, suelo y agua. Los contaminantes del aire, como ya se indicó anteriormente, incluyen dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, que se originan de fuentes tales como emisiones de vehículos, centrales eléctricas, refinerías y procesos industriales y de laboratorio. (Amable Álvarez et al., 2017)

Los contaminantes del suelo y el agua pueden clasificarse como microbiológicos (por ejemplo, coliformes), radioactivos (por ejemplo, tritio), inorgánicos (por ejemplo, arsénico), orgánicos sintéticos (por ejemplo, pesticidas) y compuestos orgánicos volátiles (por ejemplo, benceno). (Delgadillo-López, González-Ramírez, Prieto-García, Villagómez-Ibarra, & Acevedo-Sandoval, 2011)

Los pesticidas y los herbicidas se aplican directamente a las plantas y los suelos, y las liberaciones incidentales de otros contaminantes pueden originarse a partir de derrames, tuberías con fugas, tanques de almacenamiento subterráneos, vertederos y depósitos de residuos. Algunos de estos contaminantes pueden persistir durante muchos años y migrar a través de grandes regiones del suelo hasta que alcanzan los recursos hídricos, donde pueden presentar una amenaza ecológica o para la salud humana.

Para Gaikwad & Mistry, (2015) uno de los mayores problemas que enfrenta el mundo hoy en día es la contaminación ambiental, que se compone de suelo, agua y contaminación del aire. La primera y más importante contaminación ambiental es la contaminación del aire que causa el calentamiento global y el cambio climático, que también afecta a la salud humana.

La supervisión del entorno es una de las principales aplicaciones de la red de sensores inalámbricos. WSN consta de diferentes sensores que se distribuyen ampliamente para controlar diferentes parámetros del entorno, como la temperatura, la humedad, los gases, la presión, la velocidad del viento, etc (Valdivia A., 2013). WSN consta de nodos sensores que son dispositivos de bajo costo con una potencia limitada. La eficiencia energética es el mayor problema cuando estos sensores se utilizan para el monitoreo de entornos a gran escala, ya que los sensores funcionan con baterías. Por lo tanto, es necesario mejorar la eficiencia energética del sistema de monitoreo. Para lo cual se utilizan varias técnicas para mejorar el consumo de energía.

## 2.8. Sensores para monitoreo ambiental.



Figura 2. 5: Sensores ambientales.

Fuente: (Montoya , 2016)

Existen numerosos tipos de sensores ambientales que dependen de las especificaciones necesarias para el monitoreo. La sensibilidad, el tamaño y la velocidad son factores que se deben tener en cuenta al elegir un sensor ambiental. Los sensores se pueden dividir en categorías según el tipo de sensor que se use y los factores ambientales que un analista está considerando. Los principales tipos de sensores incluyen:

- a. Sensores de traza de metales: espectroscopia de ruptura inducida por láser (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS), matriz de nano electrodos y sensor de sonda de flujo químico en miniatura. (Alvira, 2011)
- b. Sensores radioisotópicos: tales como, detección de transistores de efecto de campo de radiación (*Radiation Field-Effect Transistor, RadFET*) se puede profundizar el tema en (Andjelković, Ristić, & Jakšić, 2015), detección de telururo de zinc y cadmio (*Cadmium Zinc Telluride, CZT*) en (Gandhi, Raja, & Misra, 2008) se detalla a profundidad, espectrómetros beta de diodos pin de baja energía, dosímetro termoluminiscente (*Thermoluminescent Dosimeter, TLD*), detector gamma de identificación de isótopos, generador de neutrones para detección de material nuclear.
- c. Sensores de compuestos orgánicos volátiles: sensor químico de fibra óptica evanescente, espectroscopia de reflexión de luz de rejilla (*Grating Light Reflection Spectroscopy, GLRS*), sensor de sonda de flujo químico en miniatura, conjuntos de sensores químicos, quimiosensores de nanopartículas de oro, impedancia eléctrica de bicapas lipídicas atadas en electrodos planos.
- d. Sensores biológicos: analizador de ésteres metílicos de ácidos grasos (*Fatty Acid Methyl Esters, FAME*), dielectroforesis basada en aisladores, matrices de sensores biológicos.

Los sensores también se pueden dividir en tipos según los factores ambientales. Estos tipos de sensores incluyen:

- a. Sensores de humedad: los sensores de humedad son esenciales para la medición del contenido volumétrico de agua en el suelo hacia el entorno químico en varios órdenes de magnitud.
- b. Sensores de presión/transductores: los sensores de presión funcionan sobre la base de la presión aplicada. Se utilizan en campos como la aviación, la

fabricación de mediciones biomédicas, las mediciones automáticas móviles e hidráulicas.

- c. Sensores de inclinación: el sensor de inclinación relaciona los dos ejes diferentes que indican un plano de referencia que puede estar en dos ejes diferentes. Esto juega un papel importante en la medición de los ángulos de inclinación con referencia al plano terrestre de la Tierra. Los sensores de inclinación son comunes en la industria y en los controladores de juegos.
- d. Sensores de lluvia: los sensores de lluvia son un tipo de dispositivo de conmutación que se activa en presencia de lluvia. Los sensores de lluvia se utilizan en áreas como dispositivos de conservación de agua en sistemas de riego y en automóviles con limpiaparabrisas.
- e. Sensores de vibración: los sensores de vibración son importantes para el desplazamiento y la aceleración con respecto al impacto duradero en el medio ambiente. El desplazamiento, la velocidad lineal y la aceleración son diferentes factores según los cuales se miden los sensores de vibración.

## **2.9. Microcontrolador**

Un microcontrolador (uC o MCU) puede ser comparable a una pequeña computadora autónoma; es un dispositivo extremadamente potente, capaz de ejecutar una serie de tareas preprogramadas e interactuar con dispositivos de hardware adicionales. Al estar embalado en un pequeño circuito integrado (*Integrated Circuit, IC*) cuyo tamaño y peso es normalmente insignificante, se está convirtiendo en el controlador perfecto ya que los robots o cualquier máquina requiere algún tipo de automatización inteligente.

Un solo microcontrolador puede ser suficiente para administrar un pequeño robot móvil, una lavadora automática o un sistema de seguridad. Varios microcontroladores contienen una memoria para almacenar el programa que se va a ejecutar y muchas líneas de entrada/salida que pueden usarse para actuar conjuntamente con otros dispositivos, como leer el estado de un sensor o controlar un motor. Los microcontroladores más utilizados en la enseñanza superior son los PIC, Atmel y AVR. Aunque, en la carrera de Electrónica en Control y Automatismo se utilizó el MCU

### 2.9.1. Microcontroladores 8051.

El microcontrolador 8051 (ver figura 2.6) es una familia de microcontroladores de 8 bits desarrollada por Intel en el año 1981. Esta es una de las familias populares de microcontroladores que se utilizan en todo el mundo. Este microcontrolador también se denominó "sistema en un chip" ya que tiene 128 bytes de RAM, 4 Kbytes de ROM, 2 temporizadores, 1 puerto serie y 4 puertos en un solo chip. La CPU también puede trabajar para 8 bits de datos a la vez, ya que 8051 es un procesador de 8 bits. En el caso de que los datos tengan más de 8 bits, deben dividirse en partes para que la CPU pueda procesar fácilmente. La mayoría de los fabricantes contienen 4 Kbytes de ROM, aunque el número de ROM puede exceder hasta 64 Kbytes.



Figura 2. 6: Encapsulado del microcontrolador 8051.

Fuente: (ElProCus , 2014)

El 8051 se ha utilizado en una gran cantidad de dispositivos, principalmente porque es fácil de integrar en un proyecto o hacer un dispositivo aproximadamente. Las siguientes son las principales áreas de enfoque:

- a. Gestión de la energía: los sistemas de medición eficientes facilitan el control del uso de energía en los hogares y las aplicaciones de fabricación. Estos sistemas de medición están preparados para incorporar microcontroladores.
- b. Pantallas táctiles: un gran número de proveedores de microcontroladores incorporan capacidades de detección táctil en sus diseños. Los dispositivos electrónicos portátiles, como los teléfonos celulares, los reproductores multimedia y los dispositivos de juego, son ejemplos de pantallas táctiles basadas en microcontroladores.
- c. Automóviles: El 8051 encuentra amplia aceptación de soluciones de automóviles. Se utilizan ampliamente en vehículos híbridos para manejar variantes de motor. Además, se han preparado funciones como el control de

crucero y el sistema anti-frenos más capaces con el uso de microcontroladores.

- d. Dispositivos médicos: los dispositivos médicos móviles, como la presión arterial y los monitores de glucosa, utilizan microcontroladores para mostrar los datos, por lo que proporcionan una mayor confiabilidad en los resultados médicos.

### 2.9.2. Microcontroladores PIC.

El Controlador de Interfaz Periférico (PIC) es un microcontrolador desarrollado por un microchip, el microcontrolador PIC es un programa rápido y sencillo de implementar cuando comparamos otros microcontroladores como el 8051. La facilidad de programación y la interfaz sencilla con otros periféricos se convierten en un microcontrolador exitoso. La figura 2.7 muestra el encapsulado de un microcontrolador PIC.



Figura 2. 7: Encapsulado del microcontrolador PIC de microchip.

Fuente: (ElProCus , 2014)

Sabemos que el microcontrolador es un chip integrado que consiste en RAM, ROM, CPU, TEMPORIZADOR y CONTADORES. El PIC es un microcontrolador que también consta de RAM, ROM, CPU, temporizador, contador, ADC (convertidores analógicos a digital), DAC (convertidor digital a analógico). El Microcontrolador PIC también es compatible con protocolos como CAN, SPI, UART para una interfaz con periféricos adicionales. El PIC se utiliza principalmente para modificar la arquitectura de Harvard y también es compatible con RISC (Equipo de conjunto de instrucciones reducido) según el requisito anterior RISC y Harvard.

Simplemente podemos decir que el PIC es más rápido que los controladores basados en 8051, que está preparado para la arquitectura Von-Neuman.

### **2.9.3. Microcontroladores ARM.**

ARM es uno de los microcontroladores más populares en el mundo de sistemas integrados digitales y la mayoría de las industrias prefieren los microcontroladores ARM, ya que consta de enormes características para implementar productos con una apariencia avanzada. Los microcontroladores ARM son dispositivos sensibles al costo y de alto rendimiento que se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, tales como sistemas de control de instrumentos industriales, redes inalámbricas y sensores y sistemas de carrocería de automóviles, etc.

ARM significa máquina avanzada de RISC (*Advanced RISC Machine, ARM*) y es un microcontrolador de computadora (RISC) con un conjunto de instrucciones reducido de 32 bits. Fue introducido por primera vez por la organización de computadoras Acron en 1987. El uC ARM es una familia de microcontroladores desarrollados por los diferentes fabricantes, como la microelectrónica ST, Motorola y otros. La arquitectura del microcontrolador ARM viene con algunas versiones diferentes, como ARMv1, ARMv2, etc. y cada una tiene sus propias ventajas y desventajas.

La familia STM32 de microcontroladores Flash de 32 bits basados en el procesador Arm® Cortex®-M está diseñado para ofrecer nuevos grados de libertad a los usuarios de MCU. Ofrece productos que combinan un rendimiento muy alto, capacidades en tiempo real, procesamiento de señales digitales y operación de bajo voltaje y potencia, y conectividad, a la vez que mantiene la integración completa y la facilidad de desarrollo. La incomparable y amplia gama de dispositivos STM32, basada en un núcleo estándar de la industria y acompañada por una amplia variedad de herramientas y software, hace de esta familia de productos la opción ideal, tanto para proyectos pequeños como para plataformas completas.

La figura 2.8 muestra el diagrama de bloques del procesador STM32F100. La CPU Cortex-M3 se muestra en la esquina superior izquierda. Los componentes de la línea de valor tienen una frecuencia máxima de 24 MHz; otros procesadores STM32

pueden admitir un reloj de 72 MHz. La mayor parte de la figura ilustra los periféricos y su interconexión. El procesador de descubrimiento tiene 8Kbytes de SRAM y 128Kbytes de memoria flash. Hay dos buses de comunicación periféricos: APB2 y APB1 que admiten diversos periféricos.

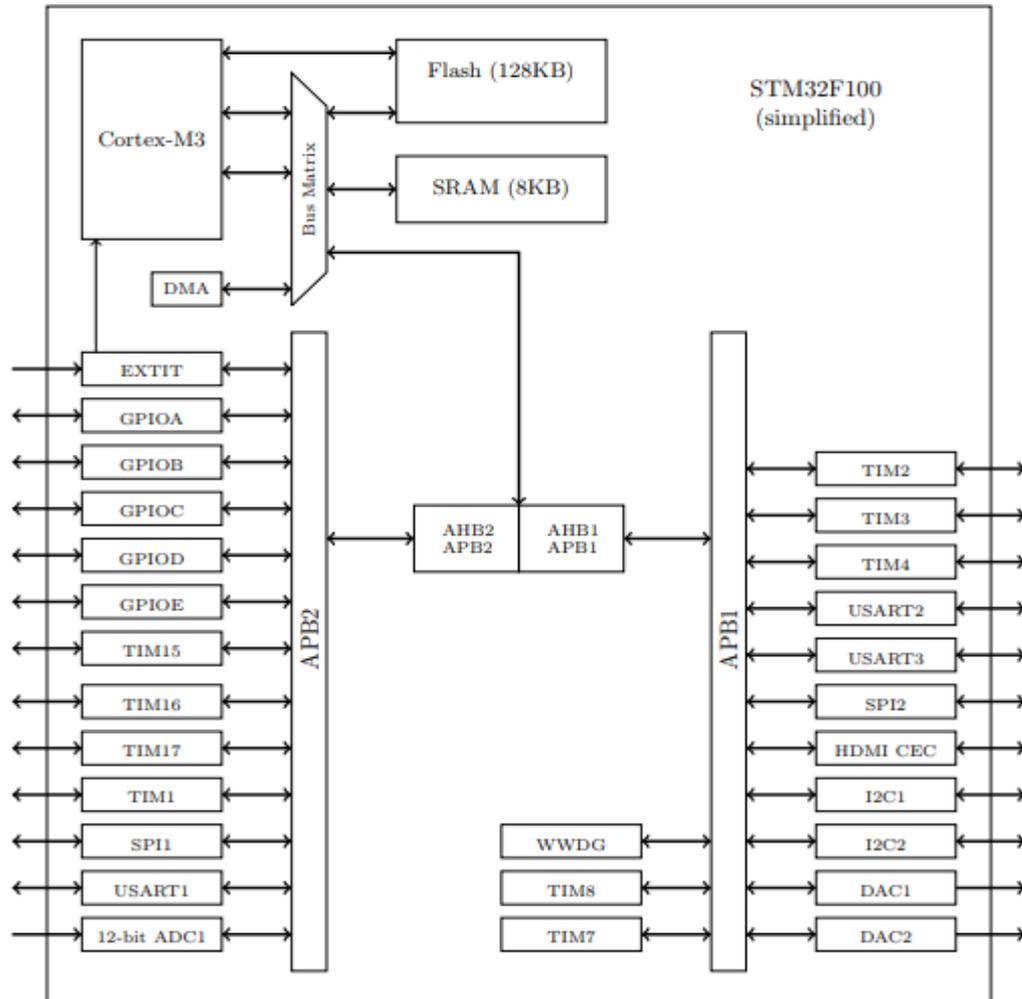


Figura 2. 8: Encapsulado del microcontrolador PIC de microchip.

Fuente: (Brown , 2012)

## 2.10. Módulos de comunicación inalámbrica.

A continuación, se describen los módulos de comunicación inalámbrica que más se utilizan en redes de sensores inalámbricos.

### 2.10.1. Módulo Zigbee.

El transmisor digital Zigbee (véase la figura 2.9) en la banda 2.4GHZ está diseñado con Verilog para la trama de reconocimiento (o) arquitectura. Existen dos tipos de capas, que son:

- a) Capa física y
- b) Capa de control de acceso al medio (MAC).

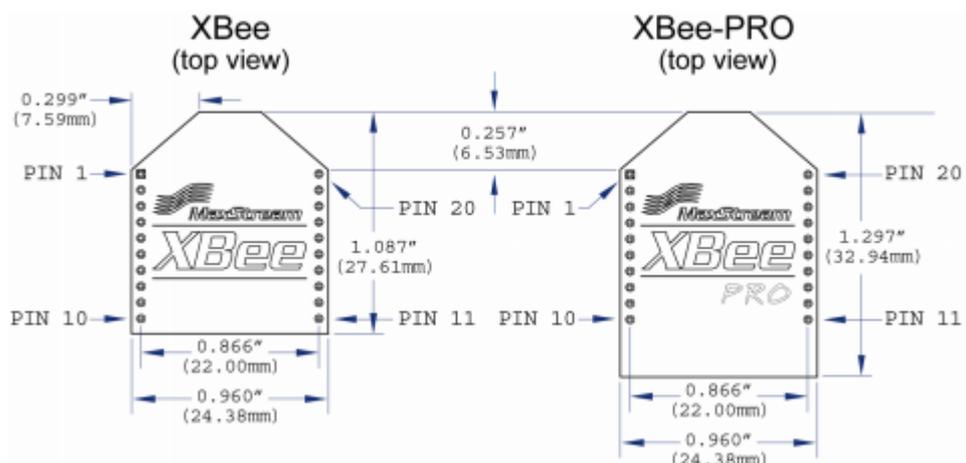


Figura 2. 9: Módulo transmisor de Zigbee/Xbee.

Fuente: (Digi, 2009)

La capa física admite 3 bandas de frecuencia de 2,45 GHz con 16 canales, 915 MHz con 10 canales, 868 MHz con 1 canal. En estos transmisores Zigbee se trabaja en la banda de 2.4 GHz porque es una banda mundial. En este esquema, se centra en la aplicación de banda de 2.4 GHz que tiene 16 canales con espaciado de 5 MHz y la velocidad de datos es de 250 Kbps. La tabla 2.3 muestra la especificaciones y parámetros del módulo de transmisión Zigbee.

La capa MAC define dos tipos de nodos: dispositivos de función reducida (*Reduced Function Devices, RFD*) y dispositivos de función completa (*Full Function Devices, FFD*). RFD solo puede actuar como dispositivo final y está equipado con sensores o actuadores como transductores, luces, interruptores y lámparas. Solo pueden interactuar con una sola FFD. Los FFDs están equipados con un conjunto completo de funciones de la capa MAC, que les permite actuar como coordinadores de red o como dispositivo final de red.

Tabla 2. 2: Parámetros y especificaciones del módulo Zigbee/Xbee.

Parámetros	Especificaciones
Velocidad de datos	250 kbps
Número de canales	16

Frecuencia de operación	2.4 GHz
Espaciado de canales	5 MHz
Espectro ensanchado	DSSS
Velocidad de chip	2 Mcps
Modulación	OQPSK con formación de pulsos

Fuente: (Vera, Barbosa & Pabón, 2015)

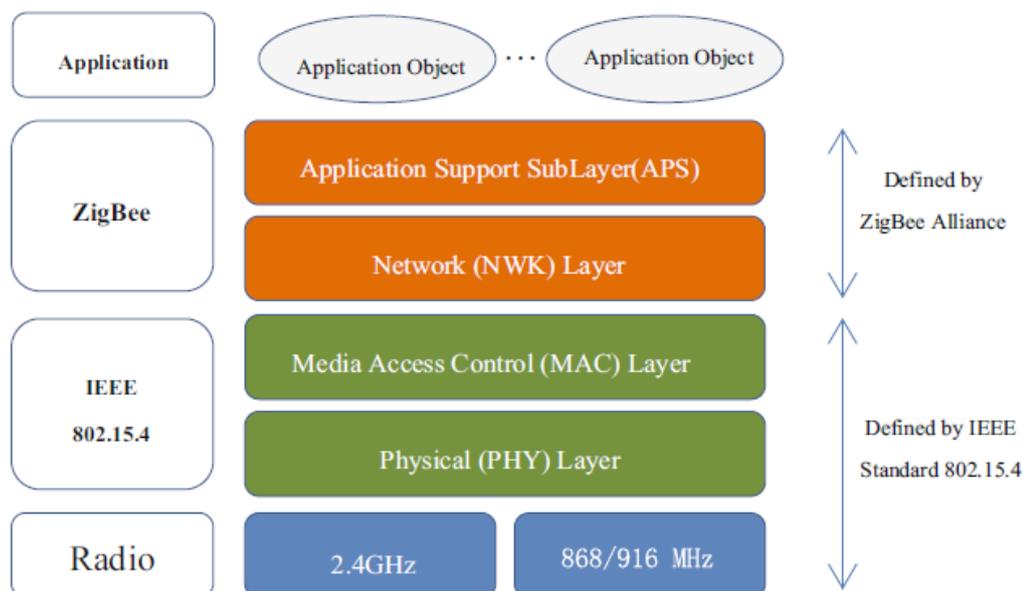


Figura 2. 10: Arquitectura de la pila del protocolo Zigbee.

Fuente: (Shi & Li, 2017)

El estándar IEEE 802.15.4 define cuatro estructuras de tramas MAC: balizas (beacon), datos, confirmación y tramas de comando MAC. La trama de baliza es utilizada por un nodo coordinador para transmitir balizas. La función de las balizas es sincronizar el reloj de todos los dispositivos dentro de la misma red. La trama de datos se utiliza para transmitir datos. Mientras tanto, el marco de confirmación se utiliza para confirmar la recepción exitosa del marco. Los comandos MAC se transmiten utilizando una trama de comando MAC.

La figura 2.10 muestra la pila de protocolos ZigBee, que consta de cuatro capas, a saber, PHY, MAC, red y capa de aplicación. Los dos primeros están cubiertos en la norma IEEE 802.15.4 y los dos últimos están cubiertos en los documentos publicados por la alianza ZigBee (Zigbee Alliance). Los dos primeros son los factores críticos para manejar la interferencia de WiFi. Por lo tanto, el siguiente contenido se enfoca en la capa MAC y PHY.

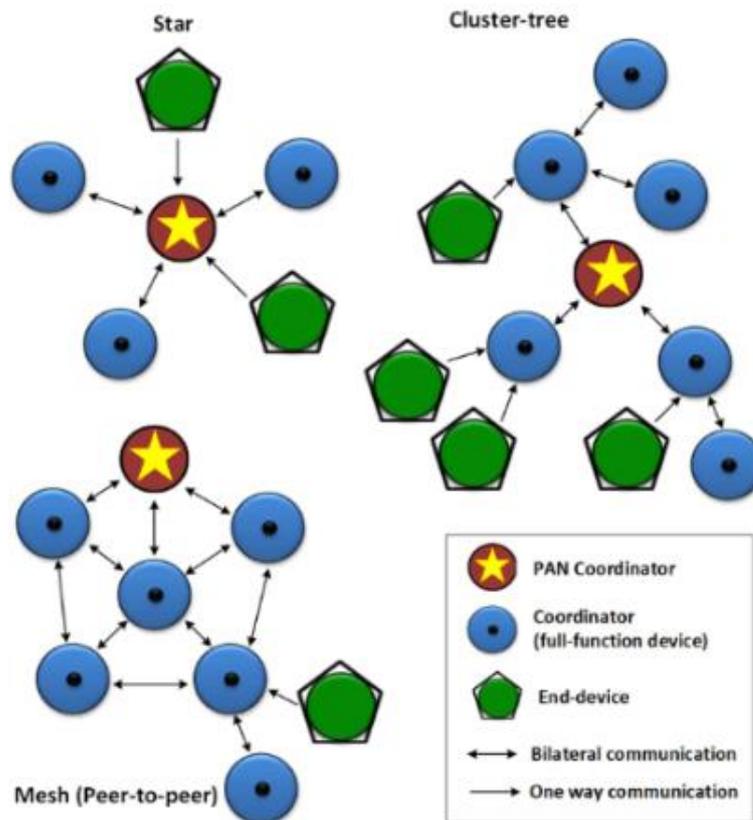


Figura 2. 11: Tipos de topologías de redes de sensores inalámbricos.

Fuente: (Moridi et al., 2018)

Existen tres topologías de red en ZigBee. Además de la topología en estrella, la capa de red ZigBee también admite topologías más complejas como el árbol y la malla, tal como se muestra en la figura 2.11. Entre las funcionalidades proporcionadas por la capa de red se encuentran el enrutamiento de saltos múltiples (multihop), el descubrimiento y mantenimiento de rutas, la seguridad y la conexión/salida de una red, con la consiguiente asignación de direcciones cortas (de 16 bits) a los dispositivos recientemente incorporados.

La figura 2.12 muestra el formato de trama de confirmación del módulo Zigbee. El estándar ZigBee emplea la técnica de espectro de propagación de secuencia directa (*Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS*) para evitar interferencias. La modulación se realiza mediante el modulador por desplazamiento de fase en cuadratura compensada (*Offset Quadrature Phase Shift Keying, O-QPSK*), que suma la señal en fase con una señal de fase de cuadratura retardada de medio ciclo. El transmisor ZigBee ha sido diseñado para el uso del formato de trama de acuse de recibo, que es el formato de trama de subcapa MAC más simple sin la carga útil de control de acceso al medio (MAC). Proporciona la retroalimentación activa del receptor al remitente de que el paquete se ha recibido sin error.

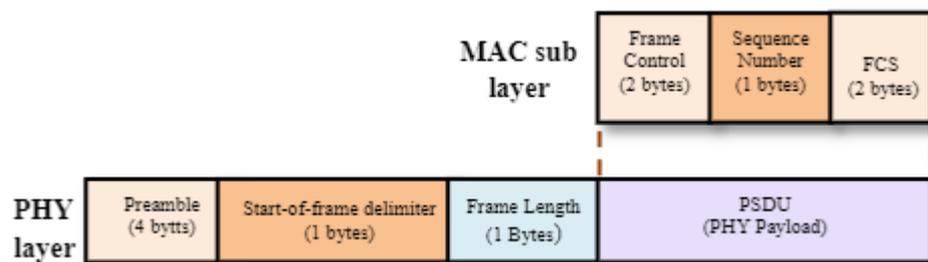


Figura 2.12: Formato de trama de confirmación del módulo Zigbee.

Fuente: (Biswas, Ghosh, Chandra, & Dhar Roy, 2017)

### 2.10.2. Módulo bluetooth

Bluetooth es una tecnología inalámbrica de bajo costo y corto alcance con un tamaño reducido, un consumo reducido de energía, un rendimiento razonable (Zhang & Xiao, 2009) y, por lo tanto, es adecuada para varios dispositivos pequeños con batería como teléfonos móviles, PDA, cámaras, computadoras portátiles, etc.

El desarrollo del Bluetooth comenzó hace varios años con la intención de reemplazar todo tipo de cables utilizados para conectar diferentes dispositivos. Mientras tanto, la idea ha evolucionado y Bluetooth ahora se está desarrollando no solo como un punto a punto, sino también como una tecnología de red. Bluetooth opera en la banda de 2,4 GHz libre ISM. Utiliza un esquema de espectro de salto de frecuencia (FHSS) (Bonnet, Beaufour, Dydensborg, & Leopold, 2003). Bluetooth ha pasado por períodos de gran exageración cuando fue considerada como la mejor tecnología de corto alcance, así como por períodos en los que se consideró una falla.

Sin embargo, podría verse como decisivo ya que una gran cantidad de diversos dispositivos y accesorios Bluetooth aparecieron en el mercado. Con esto una amplia gama de usuarios pudieron utilizarlo y las primeras experiencias fueron generalmente positivas. El principal desafío que enfrentan los desarrolladores de Bluetooth ahora es demostrar la interoperabilidad entre los dispositivos de diferentes fabricantes y proporcionar numerosas aplicaciones interesantes. Un ejemplo de tales aplicaciones son las redes de sensores inalámbricos.

Los módulos Bluetooth de bajo consumo (precio inferior a \$ 10) parecen cumplir los requisitos de las redes de sensores inalámbricos. Capacidad de establecimiento de conexión Ad-hoc, rendimiento razonable (hasta 721 kbps en enlace ascendente y enlace descendente a 56 kbps), utiliza el esquema de salto de frecuencia mediante duplexación por división de tiempo (*Time-Division Duplexing, TDD*) para minimizar el impacto de la interferencia en la banda ISM (2.4 GHz).

La existencia de diferentes modos de ahorro de energía junto con su disponibilidad y especificación estandarizada son las principales ventajas de Bluetooth sobre otras tecnologías inalámbricas.

La figura 2.13 muestra la pila de protocolos Bluetooth con interfaz de intérprete de comandos. El intérprete de comandos ofrece una serie de comandos diferentes para admitir la funcionalidad dada por los diferentes perfiles. La aplicación de control maneja la ejecución y el tiempo de la interfaz. (Zhang & Xiao, 2009)

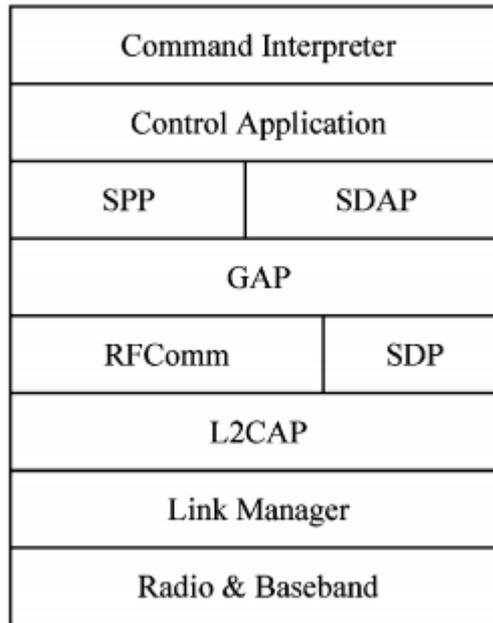


Figura 2. 13: Formato de pila de protocolos de Bluetooth.

Fuente: (Zhang & Xiao, 2009)

### 2.10.2.1. Módulo Bluetooth Low Energy.

Desde que aparecieron los dispositivos Bluetooth a finales de los 90's. Ya existían varios dispositivos en el mercado que eran compatibles con las versiones 1, 2 y 3. Estos dispositivos se denominaron dispositivos Bluetooth clásicos, cuya arquitectura se observa en la figura 2.13. También se construyeron dos nuevos dispositivos que se conocen como dispositivos de modo dual y de modo único. Un dispositivo de modo único es un dispositivo Bluetooth que solo admite BLE. Los dispositivos que admiten BLE y Bluetooth clásico se denominan dispositivos de modo dual, cuyas arquitecturas son las que se muestran en la figura 2.14 respectivamente.

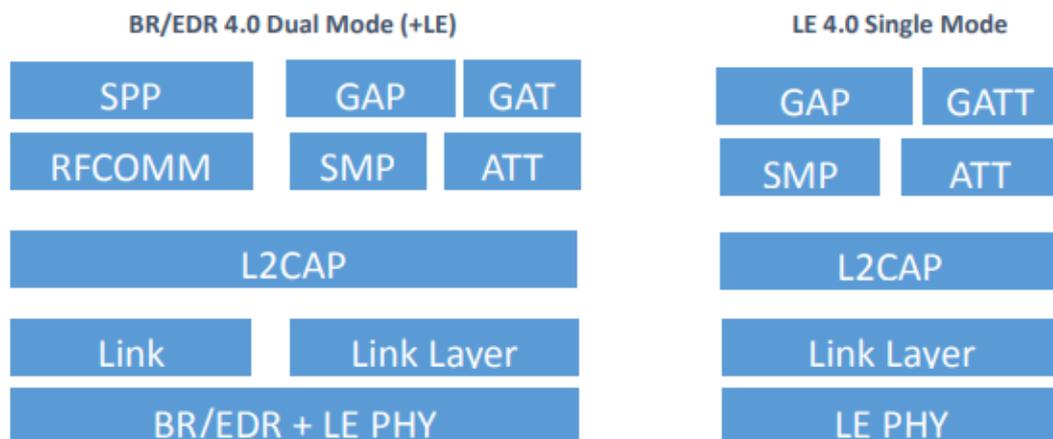


Figura 2.14: Arquitectura Bluetooth 4.0 de modo dual y único.

Fuente: (Garijo & Falcone, 2016).

Bluetooth Low Energy (BLE) es la tecnología de nuevo diseño y complementaria al Bluetooth clásico. Es la tecnología inalámbrica de potencia más baja posible en la actualidad. Esta tecnología toma su nombre de su matriz, que tenía una tasa básica de 1 Mbps y se conocía como tasa básica (*Basic Rate, BR*). La velocidad de datos mejorada (*Enhanced Data Rate, EDR*) fue la versión 2, que tenía una velocidad de datos de 3 Mbps. La versión 3, que se conoce como Alternativa MAC PHY (*Alternate MAC PHY, AMP*), proporcionó velocidades de datos de hasta cientos de Mbps.

Sin embargo, BLE proporciona una menor velocidad de datos en comparación con AMP, pero en su lugar optimiza el consumo de energía ultra bajo en virtud de su diseño, lo que significa que la conexión Bluetooth puede mantenerse durante más tiempo, por ejemplo, horas o días.

Furst, Chen, Kim, & Bonnet, (2018) indican que BLE es popular como bloque de construcción para el Internet de las Cosas (*Internet of Things, IoT*). Las aplicaciones de IoT se basan en BLE para el intercambio de datos local y de bajo consumo de energía entre teléfonos inteligentes y periféricos con recursos limitados.

Los dispositivos BLE de bajo costo y bajo consumo de energía podrían admitir una variedad de aplicaciones con parámetros tan amplios. Mientras tanto, el ajuste de parámetros apropiados inicialmente debe cumplir con las necesidades prácticas de baja latencia y, al mismo tiempo, evitar el uso innecesario de energía. (Luo, Xu, & Sun, 2018)

## **CAPITULO III: ANÁLISIS DE LA RED DE MONITOREO DEL PARQUEADERO**

En este capítulo se describirá los elementos utilizados y consideraciones generales para este proyecto, solucionando la problemática de la conectividad de los sensores para la obtención de datos y su procesamiento de las variables para el monitoreo del parqueadero de la UCSG. Posteriormente se realizarán pruebas para la red prototipo en sitios diferentes para medir y analizar la eficiencia de la red inalámbrica de sensores para la obtención de CO<sub>2</sub>, temperatura y calidad del aire.

### **3.1. Consideraciones iniciales del diseño.**

En este apartado se realizará la descripción, características y funcionamiento del sistema de sensores inalámbricos para obtención de datos ambientales mencionados anteriormente, con el objetivo de proporcionar una idea generalizada del proyecto.

#### **3.1.1. Descripción del diseño en general.**

Esta sección se explica la descripción de la red de sensores inalámbricas (WSN) propuesta para la planta baja del edificio de parqueo de automóviles de la UCSG donde se obtendrán métricas de niveles de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), temperatura ambiente y calidad del aire. En la figura 3.1 se muestra las dimensiones del parqueadero en la planta baja y del posicionamiento de los nodos sensores donde se realizarán las pruebas de campo. La WSN dispone de un nodo coordinador y tres nodos secundarios (incorporados los sensores de CO<sub>2</sub>, temperatura y calidad de aire). En la figura 3.3 se muestra el proceso de funcionalidad del sistema WSN, donde se configuran los dispositivos para que el nodo principal (NP) reconozca a los nodos secundarios (sensores) y a su vez solicita las variables ambientales ya descritas. Posteriormente, el NP procesa la temperatura para conocer la temperatura adecuada; si no es adecuada generará una alarma caso contrario, procesará niveles de CO<sub>2</sub>, para saber si el nivel de CO<sub>2</sub> es normal, si no es normal se generará una alarma caso contrario, se procesará la calidad del aire, si dicha calidad no es óptima, se generará otra alarma caso contrario, se almacena la variable. Todo este proceso finalmente se visualizan las variables en una LCD.

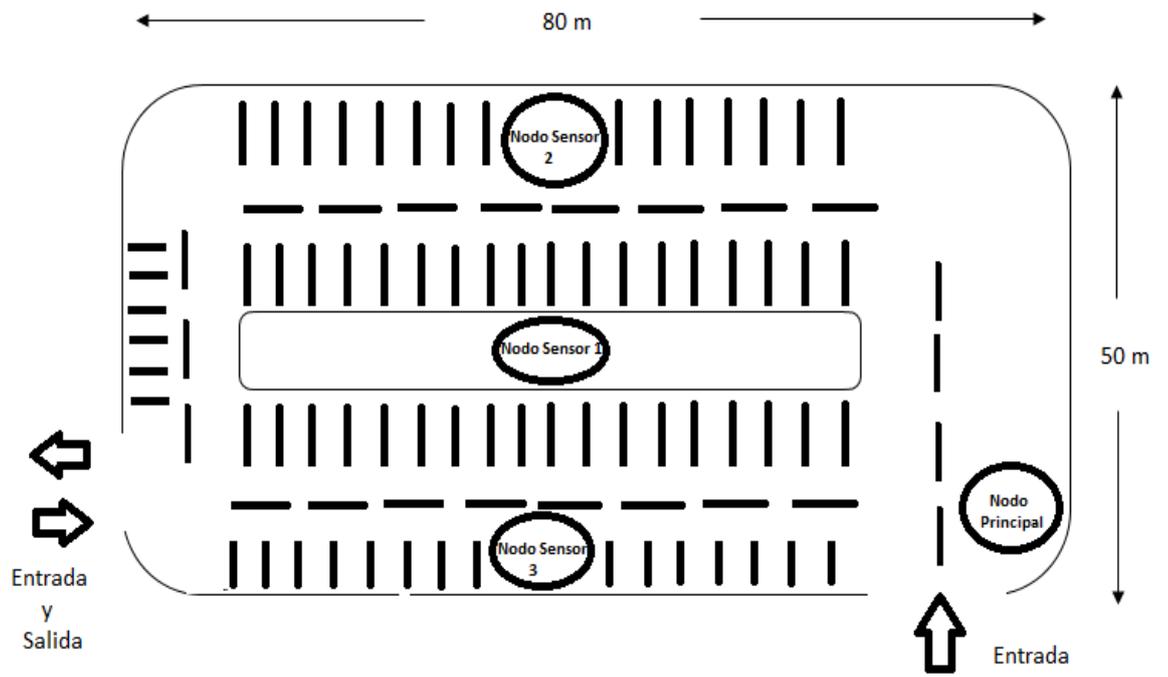


Figura 3. 1: Parqueadero vehicular de la UCSG con dimensionamiento de una de sus plantas.

Fuente: Elaboración propia.

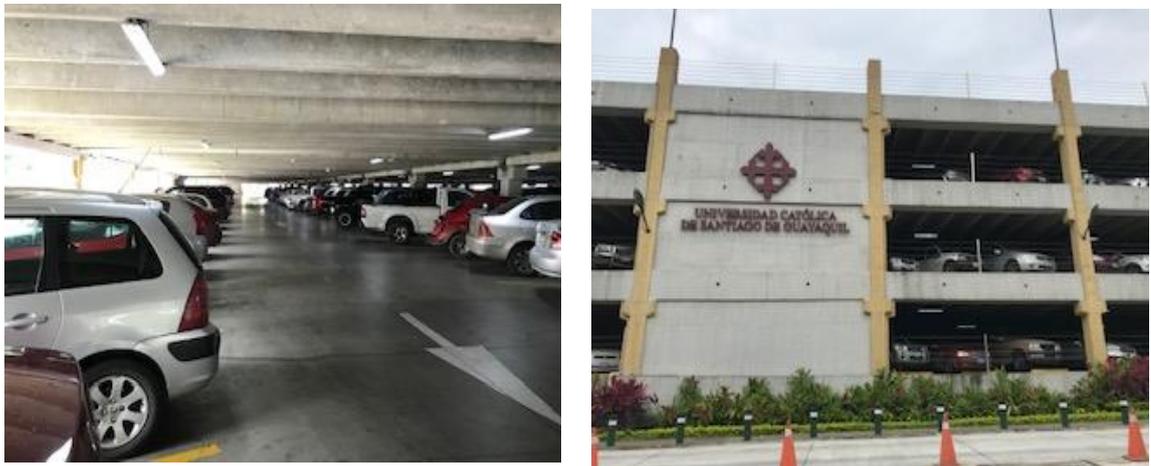


Figura 3. 2: Parqueadero UCSG

Fuente: Elaboración propia.

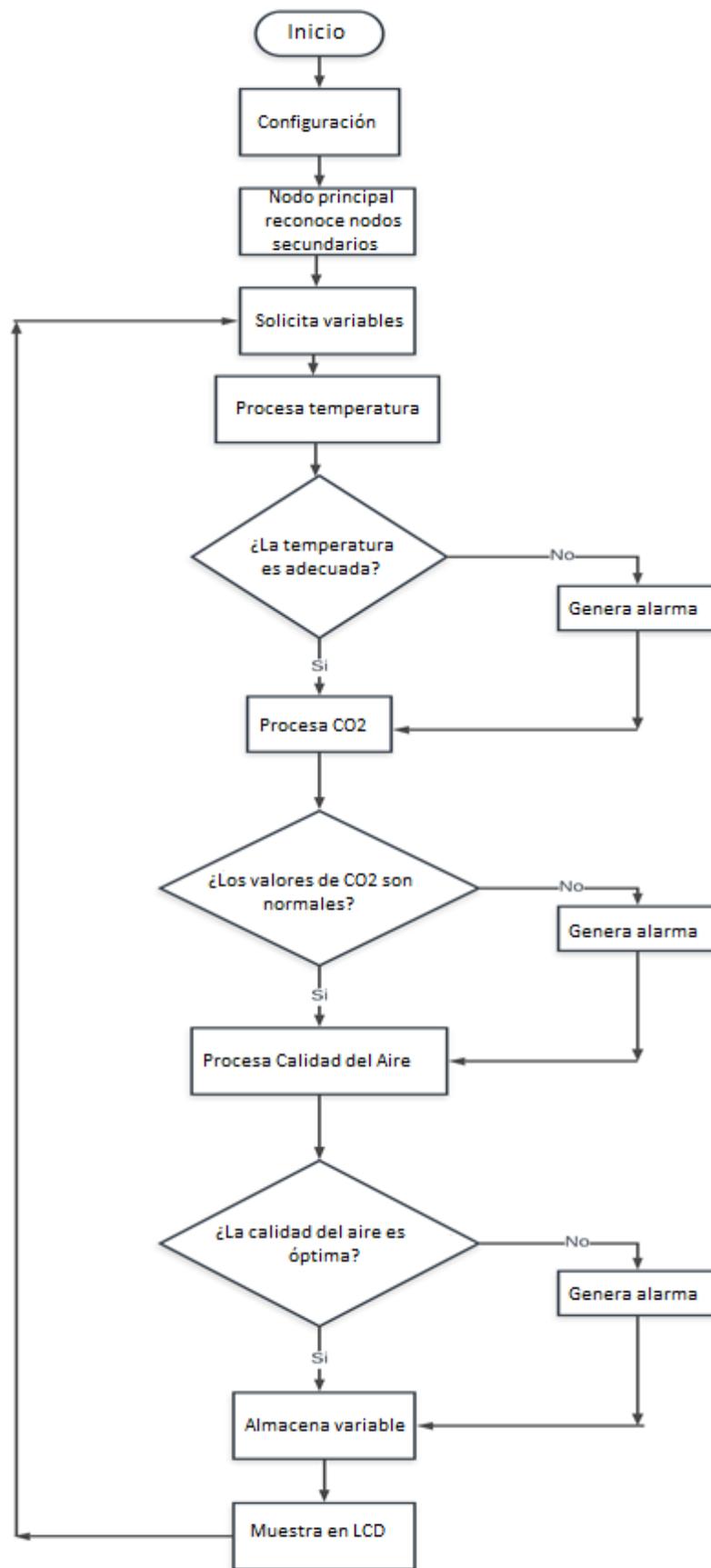


Figura 3.3: Diagrama de flujo explicando el proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

### **3.1.2. Caracterización del sistema de sensores inalámbricos.**

Este apartado tiene como finalidad describir las características técnicas de la red de sensores inalámbricos y sus controladores en su estructura topológica de red. Vale recalcar que todos los elementos de la red serán lo mismo, lo que cambia es su configuración y programación para funcionar en determinada forma.

- El nodo principal recibirá los datos de los sensores de los nodos secundarios o esclavos por medio de una comunicación inalámbrica, el microcontrolador STM32F429ZIT6 posee los recursos suficientes para el procesamiento de la información y poder mostrarlas al usuario mediante una interfaz parecida a los HMI utilizados a nivel industrial.
- El LCD que está integrado en la placa embebida es una pantalla TFT QVGA de 2,4”.
- El nodo principal se comunicará con los nodos secundarios mediante el estándar IEEE802.15.4. Los nodos tanto principal como secundarios serán los mismos, en este caso en micro STM32 para procesamiento de los datos recibidos inalámbricamente.
- Cada uno de los nodos sensores, como nivel de concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura y contaminación del aire estarán conectados a sus respectivos micros ARM para procesamiento de la señal de este, y su transmisión mediante un Shield a la XBEE para despliegue a la red que comunicará con el dispositivo STM32F429ZIT6 para procesar y presentar los datos resultantes. Cabe recalcar para la comprensión del lector que este proyecto está enfocado en la utilización de tres tipos de sensores (CO<sub>2</sub>, Temperatura y aire) para su captación y muestreo en distintas áreas.

### **3.1.3. Funciones del sistema.**

El funcionamiento de este proyecto será descrito a continuación:

- Monitoreo de variables ambientales de un parqueadero.
- Monitoreo y generación de alarmas para la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente.
- Monitoreo y generación de alarmas basadas en las lecturas de la temperatura.
- Monitoreo y generación de alarmas correspondientes a la calidad del aire del medio.
- Reconocimiento automático de nuevos nodos sensores a la red mediante previa configuración.

### **3.2. Análisis de la red inalámbrica.**

En esta sección se detalla el análisis realizado para la red inalámbrica de sensores para adquisición de datos utilizando software de simulación.

#### **3.2.1 Arquitectura de red.**

La arquitectura propuesta para la red de sensores inalámbrica consta básicamente de tres niveles jerárquicos, suficientes para organizar de forma adecuada la interacción entre los diferentes nodos desarrollados para este sistema. A continuación, en la figura 3.4, se puede apreciar esta organización, y en los siguientes párrafos analizarlas de forma más detallada.

- Nivel de supervisión: este nivel, como su nombre lo indica, se encarga de supervisa el normal funcionamiento de la red inalámbrica compuesta de un nodo principal y los nodos secundarios. En el nivel presente se desarrollará una aplicación dentro de la tarjeta embebida STM32F4 Discovery para administrar los datos obtenidos por la red de los XBEE, permitirá visualizar los resultados de los sensores inalámbricos.
- Nivel de comunicación: En este nivel de la arquitectura de la red inalámbrica se considera la comunicación entre todos los elementos de la red (NP y NS), utilizando los módulos de comunicación inalámbrico, para lo cual se definirá los protocolos y las tramas requeridas para disponer de una comunicación eficaz. los transmisores y receptores de la red inalámbrica de XBEE funcionan bajo el protocolo de comunicación AODV que permitirá enrutamiento de vector distancia.
- Nivel de campo: Este nivel estará relacionado con la adquisición de datos a través de los diferentes sensores ubicados en los NS, requeridos para la medición de los parámetros ambientales. Está compuesto por los micros STM32 y los sensores de concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura y calidad de aire.

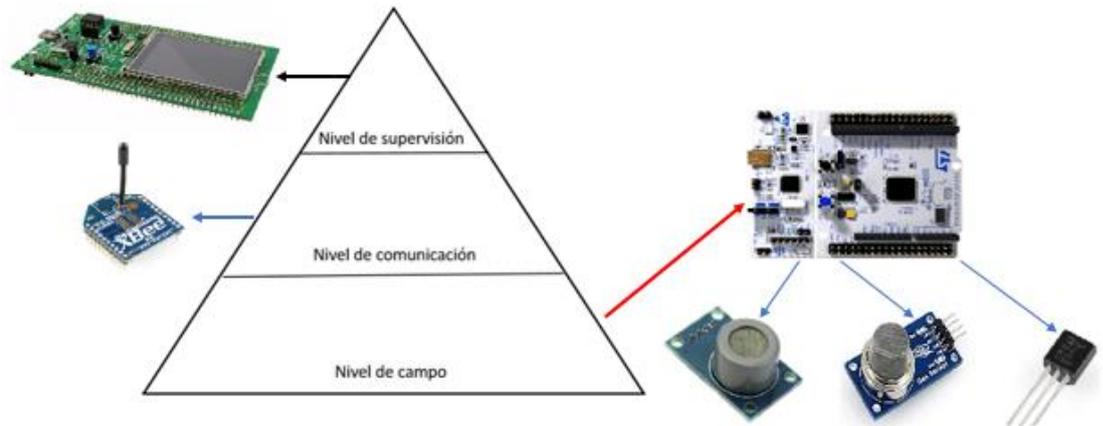


Figura 3. 4: Arquitectura del proyecto propuesto.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2. Análisis de operación de la red de sensores.

En este acápite se va a realizar el análisis del funcionamiento de la red de sensores inalámbrico, orientado a la adquisición y monitoreo de variables ambientales de un parqueadero cerrado. Para iniciar el análisis, la distancia garantizada será de 40 m entre nodos, y asegurando que posean línea de vista entre ellas para mejorar la eficiencia, la tasa de transferencia de datos según las especificaciones de los módulos XBEE puede ser de hasta 200kbps, además se puede confirmar que la gestión de la información está determinada por el nodo principal de modo que permita decidir cuando los nodos secundarios o esclavos deben enviar los datos resultantes. La figura 3.5 muestra el proceso de comunicación entre nodo secundario y nodo principal.

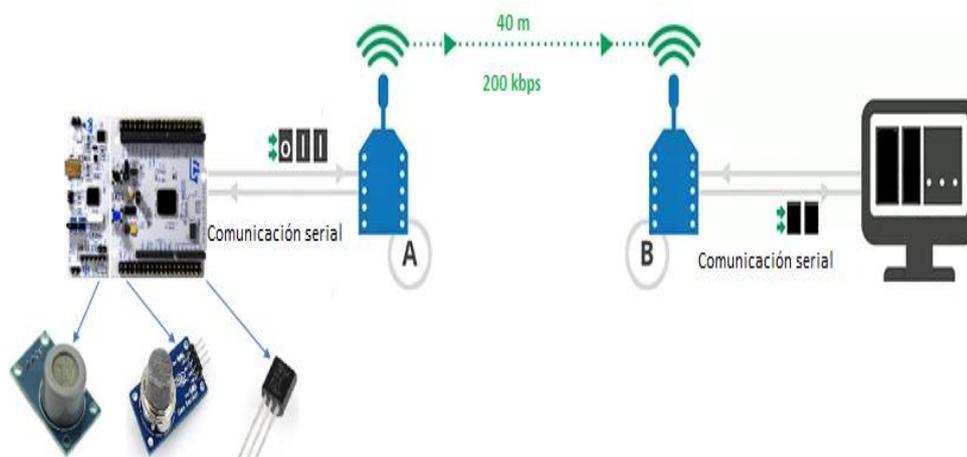


Figura 3. 5: Distancia y tasa de transmisión entre nodo secundario y nodo principal.

Fuente: Elaboración propia.

Los nodos están compuestos de un STM32, sensor de CO2, temperatura, calidad de aire y un XBEE que permitirá la transmisión y recepción de datos desde y hacia el nodo principal para mostrar de modo grafico en la pantalla, la comunicación entre STM32 y módulo XBEE se dará mediante serial (UART).

Los componentes del nodo principal serán:

- Módulo XBEE
- Micro STM32F4 Discovery
- Fuente de alimentación

Los nodos secundarios o esclavos quienes serán los encargados de recopilar la información de los sensores de CO2, estarán conformados por los siguientes componentes:

- Módulo XBEE
- Micro STM32
- Sensor de CO2
- Sensor de temperatura
- Sensor de calidad del aire
- Fuente de alimentación

Los nodos estarán dispuestos para cada vehículo estacionado en el parqueadero de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, como dispone el proyecto. Los nodos al estar ubicado de manera simétrica no mostraran ningún problema al proceso de transmisión de datos por parte de los esclavos al principal.

### **3.2.3. Topología de la red inalámbrica**

La topología estrella en este tipo de red ayuda en la implementación del sistema, el nodo principal se encargará de evitar las colisiones y perdidas de paquetes de información recibidas por parte de los nodos secundarios. A continuación, en la figura 3.6 se muestra la elección que se tomó para este proyecto el cual en que todos los nodos se puedan comunicar entre sí y a su vez enviar los datos al nodo principal para su procesamiento de datos.

De acuerdo al proyecto establecido para esta investigación es necesario definir los parámetros que se utilizara para la topología de red asignado y la metodología de la gestión de la información de dicha red. La topología de red será tipo estrella ya que este sistema se lo puede implementar en un sitio como ejemplo un parqueadero para la evaluación de la emisión de gases, para ello se utilizará el estándar IEEE802.15.4 en frecuencia de 2.4GHz, 900MHz y 868MHz. Cada dispositivo tendrá la facultad de conectarse al nodo principal y enviar los datos en tiempo real de las lecturas del sensor conectado al nodo secundario o esclavo.

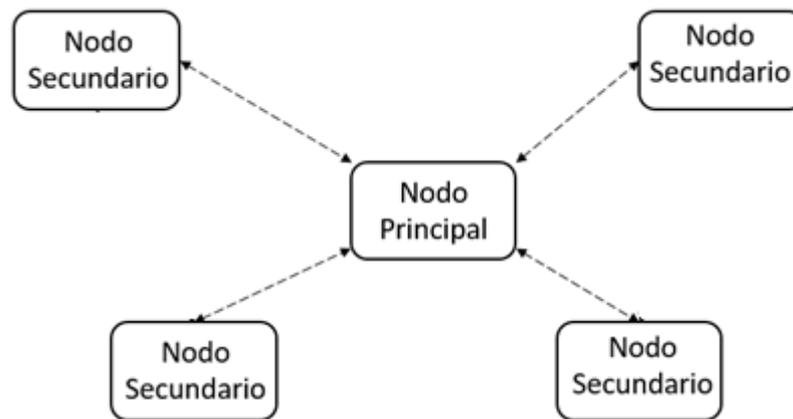


Figura 3. 6: Comunicación entre nodos.

Fuente: Elaboración propia.

La topología sugerida es para mejorar la eficiencia de la transferencia de datos en ciertos lugares, los sensores físicamente serán colocados en una planta del parqueadero de la UCSG para su análisis de los gases, el nodo principal decidirá quién debe enviar los datos porque se requiere un orden evitando colisiones y pérdidas de paquetes.

#### 3.2.4. Protocolos de Comunicación

Para la gestión de la información se utilizará dos protocolos de comunicación, el primero será encargado de comunicar la data obtenida de los sensores al módulo XBEE, es decir de subida mediante el puerto serie (UART) que no es más que un transmisor receptor asíncrono universal, este soporta varias velocidades que está definida hasta 921.6kbps, así mismo este mismo sistema de comunicación se utilizara en el nodo principal en la parte de bajada, es decir, del XBEE al micro, y este procesara la información para ser mostrada en la pantalla del STM32F4 Discovery.

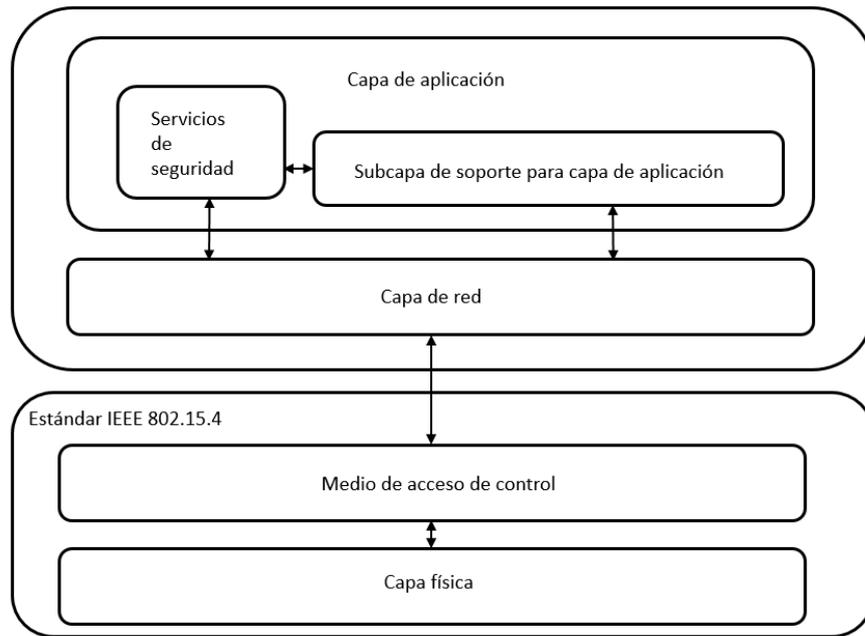


Figura 3. 7: Diagrama de bloque de protocolo de comunicación de XBEE.

Fuente: Elaboración propia.

Existe otro protocolo de comunicación que se utilizara en la transmisión de información entre nodos por medio del XBEE, este módulo provee varias configuraciones que permiten la estructuración de la red, este está definido a nivel físico por el estándar IEEE 802.15.4. En la figura 3.7 se muestra la especificación para el protocolo de comunicación de los módulos XBEE.

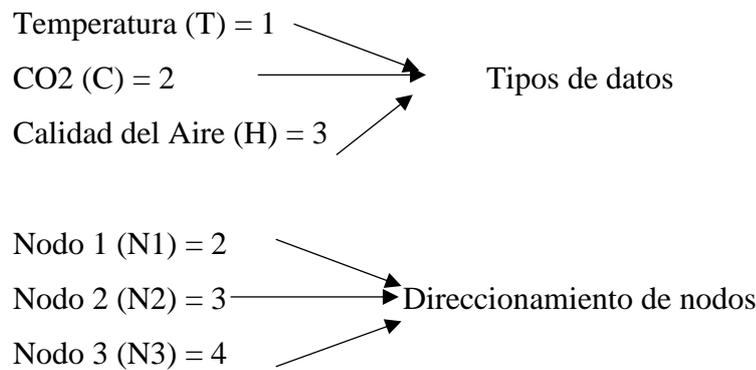
### 3.2.5. Tramas

La trama es una unidad de datos. La creación de la trama del proyecto de las WSN ayudará a identificar los paquetes de datos utilizados en las estructuras de redes y comunicaciones, en este caso; como se envían los datos de los sensores de CO2, temperatura y calidad del aire desde los diferentes nodos secundarios al nodo principal para luego ser presentado en la LCD y generar la alarma si el caso lo amerita. Las tramas también ayudan a determinar cómo los receptores de datos interpretan un flujo de datos de una fuente.

Las tramas y paquetes pueden tener una terminología diferente adjunta a su uso según el contexto o la industria en cuestión. En general, la trama es un recurso de formato para los datos que deben dividirse en partes reconocibles para ser interpretados por un receptor.

El proyecto consiste en cuatros nodos, de ellos están destinados 3 para ser nodos sensores los cuales poseen sus direcciones y enviarán los datos de las variables receptadas (CO2, temperatura, Calidad del Aire) y 1 para ser el nodo principal.

En la figura 3.8 se explica la trama general creada para este sistema de redes de sensores inalámbricos, en este caso; envía datos de temperatura desde el segundo nodo secundario, se almacenan los datos para luego ser recibidos y presentados. Posteriormente se enviarán los demás datos de los sensores ambientales por medios de los otros nodos y así sucesivamente estarán viajando los paquetes de datos con la información.



Tipo (Sensor)	Dirección de Nodo	Bytes de Información
1	2	8

Figura 3. 8: Trama de envío de datos de temperatura mediante el segundo nodo secundario.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Diseño de nodo secundario.

El nodo secundario es el elemento de la red que dispone de los sensores para medir las variables ambientales y de módulos de comunicación inalámbrica XBee. La arquitectura propuesta para el diseño del nodo sensores se muestra en la figura 3.9. Se observa que los sensores de medición ambiental (CO2, Temperatura y aire) adquieren datos que son procesados por la tarjeta SMT32 núcleo, posteriormente, estas métricas son enviadas al nodo principal mediante el módulo de comunicación inalámbrica

Xbee. Adicional, las métricas obtenidas por los sensores serán visualizadas a través del LCD del nodo principal (STM32F4 Discovery).

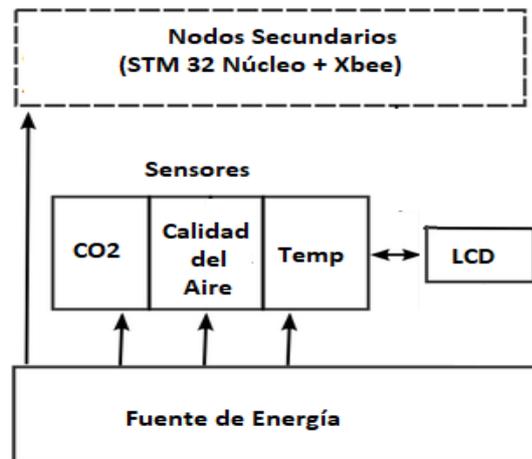


Figura 3. 9: Diagrama de bloque de protocolo de comunicación de XBEE.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.10 muestra el diagrama de flujo generalizado para el funcionamiento de los nodos secundarios mediante los sensores ambientales. Cada nodo secundario incluye la tarjeta STM32 Núcleo, 3 sensores (MQ07-CO2, LM335-temperatura y MQ135-aire) y módulo de comunicación inalámbrica Xbee, este se encarga de procesar y transmitir los datos obtenidos al nodo principal.

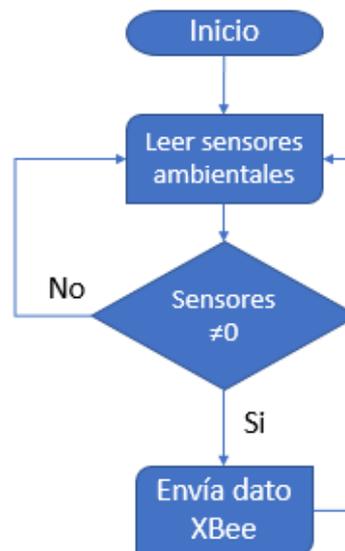


Figura 3. 10: Flujograma del funcionamiento del nodo secundario que incluye los sensores ambientales del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1. Construcción e implementación de red de sensores inalámbricos.

En esta sección del capítulo se describirá las partes fundamentales para la implementación de una red de sensores inalámbricos utilizando XBEE y los microcontroladores ARM STM32 para procesamiento de resultados en una interfaz amigable al usuario final. La figura 3.11 muestra el esquemático de conexiones del sistema WSN propuesto y que se describe en las siguientes subsecciones.

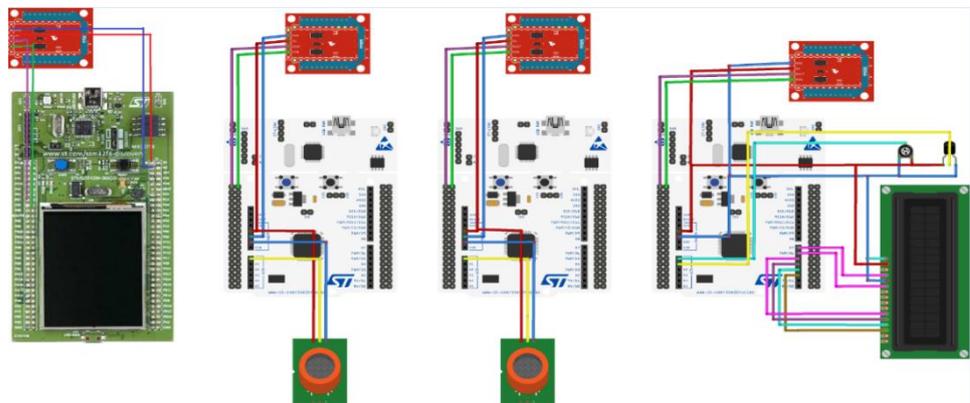


Figura 3. 11: Esquemático de conexiones del sistema WSN.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2. Integración de los sensores de calidad con STM32 Núcleo en nodo secundario.

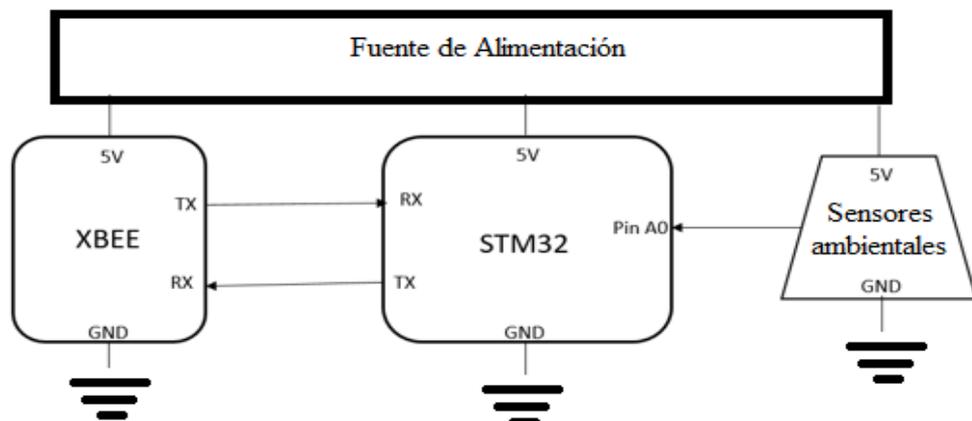


Figura 3. 12: Diagrama de conexiones de los nodos secundarios.

Fuente: Elaboración propia.

En esta sección del proyecto se realiza la conectividad entre cada uno de los sensores (MQ-7, MQ-135 y LM35) y el micro STM32 Núcleo, para posteriormente transmitir los datos a una red inalámbrica. Para ello es necesario adquirir los datos en un micro ARM STM32 desde los sensores. En las figuras 3.13, 3.14 y 3.15 se muestran las conexiones de los nodos sensores (slave) para monitoreo de CO2, temperatura y calidad del aire.

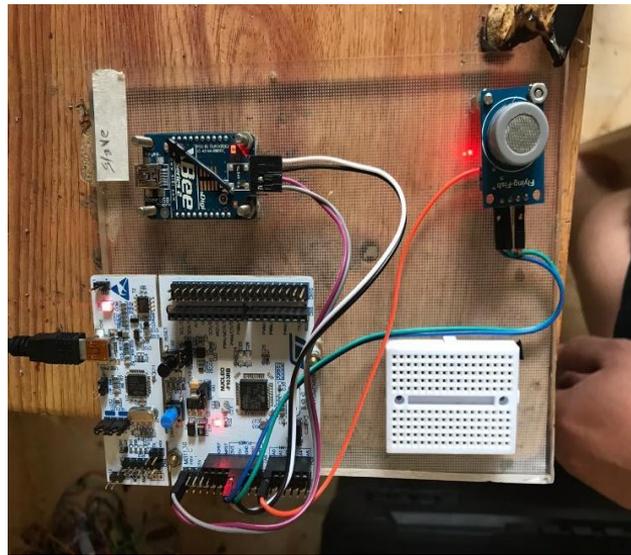


Figura 3. 13: Componentes de nodo secundario de CO2.

Fuente: Elaboración propia.

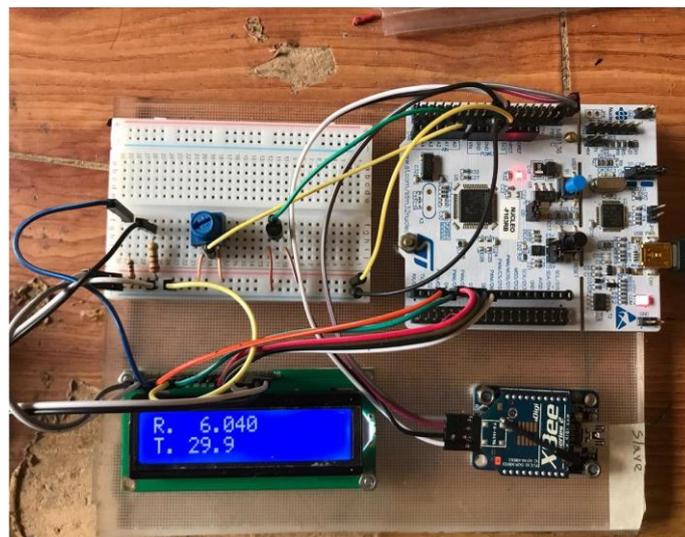


Figura 3. 14: Componentes de nodo secundario de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

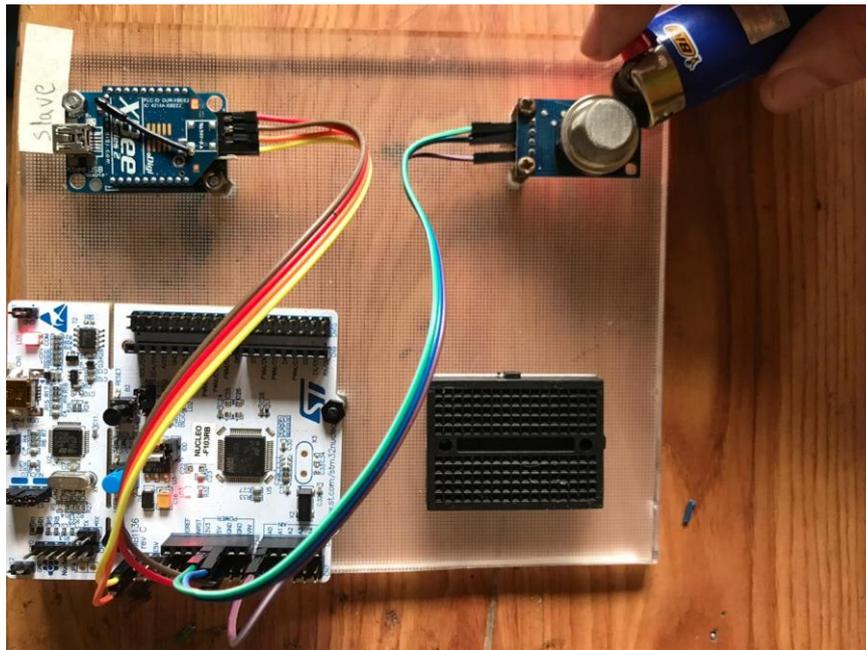


Figura 3. 15: Componentes de nodo secundario de calidad de aire.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta por partes el código utilizado el STM32F para la obtención de datos del sensor y transmisión de este valor al nodo principal mediante el XBEE. En figura 3.16 se muestra la primera parte del código establecido se define la librería a utilizar mbed.h ya que este define los puertos y configuraciones del ARM seleccionado para la tarea que realizara, a continuación, se definen los puertos seriales y el pin analógico utilizado para lectura del sensor.

```

1  #include "mbed.h"
2  //-----
3  // Hyperterminal configuration
4  // 9600 bauds, 8-bit data, no parity
5  //-----
6  Serial pc(SERIAL_TX, SERIAL_RX);
7  //Serial blue(PA_2, PA_3);
8  Serial blue(PC_10, PC_11);
9  AnalogIn sensor1(A0);

```

Figura 3. 16: Cabecera del código utilizado para el nodo esclavo.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, el dispositivo deberá adquirir los datos de manera analógica y transmitirla por el puerto serial previamente configurado al XBEE para que este pueda

comunicarse al nodo principal, estas tareas serán realizadas por la función principal del código como se muestra en la figura 3.17.

```

10 int main()
11 {
12     float dato;
13     pc.baud(9600);
14     blue.baud(9600);
15     pc.printf("Receptor!\n");
16     while(1) {
17         blue scanf("%2.1f [^\n]", &dato);
18         if(dato==2.0)
19         {
20             blue.printf("%2.1f [^\n]", sensor1.read());
21             pc.printf("%2.1f ", sensor1.read());
22             pc.printf("\n");
23         }
24     }
25 }

```

Figura 3. 17: Función principal del nodo secundario o esclavo.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Diseño de nodo principal.

Así como se describió previamente el diseño de los nodos secundarios para los sensores, en esta sección se describirá la estructura diseñada para el nodo principal, que como se ha explicado anteriormente será la encargada de mostrar al usuario final mediante una pantalla TFT los datos en tiempo real del test realizado en cualquier momento.

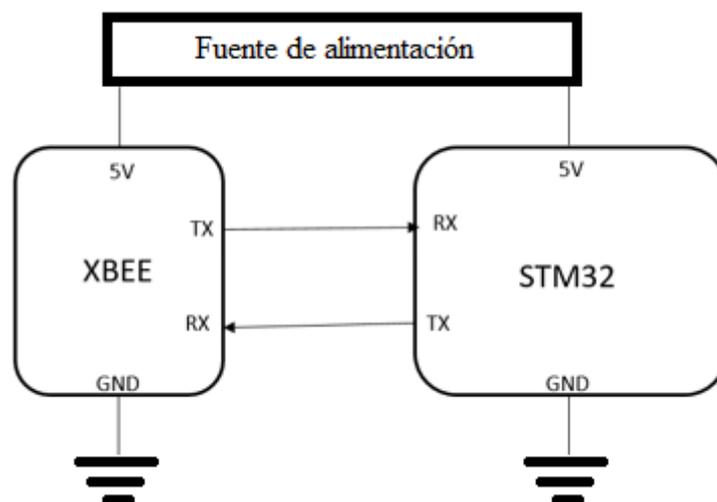


Figura 3. 18: Diagrama de conexión del nodo principal.

Fuente: Elaboración propia.

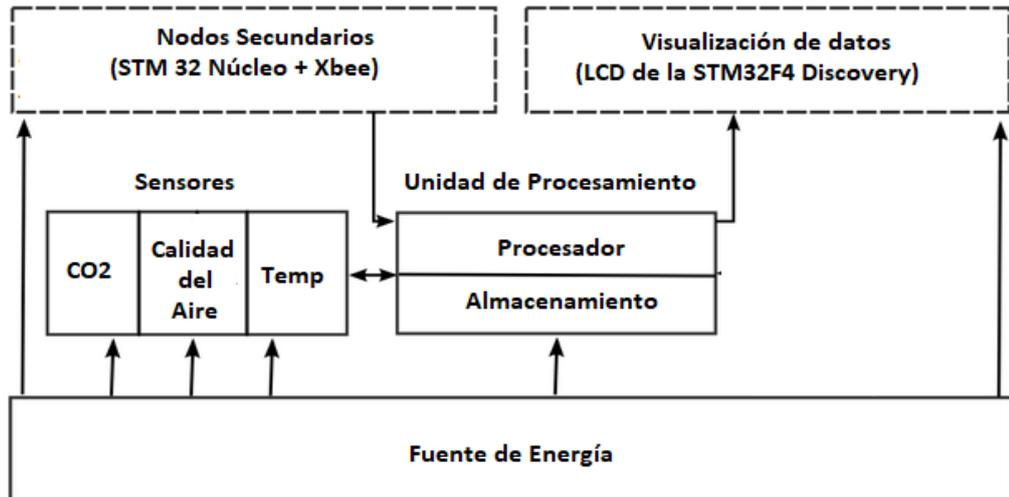


Figura 3. 19: Funcionamiento general del nodo principal.

Fuente: Elaboración propia.

Este nodo se compondrá de:

- STM32F4 Discovery para análisis de datos recibidos, coordinación de petición de datos de los nodos secundarios y presentación en pantalla TFT al usuario.
- Módulo XBEE que permitirá la recepción de los nodos secundarios.
- Pantalla TFT para presentación a usuario final
- Fuente de poder

### 3.4.1. Configuración de nodo principal para adquisición de datos y presentación.

En esta sección se presentará el código realizado y esquemático diseñado para el nodo principal, este se encargará de comunicarse con los nodos secundarios o esclavos para la obtención de los resultados de la lectura del sensor de concentración de CO2.

En la figura 3.20 se presenta la forma en la que se conectó el micro ARM STM32F4 Discovery al medio de comunicación que será un módulo XBEE, por este se adquirirá los datos de los esclavos de una red inalámbrica.

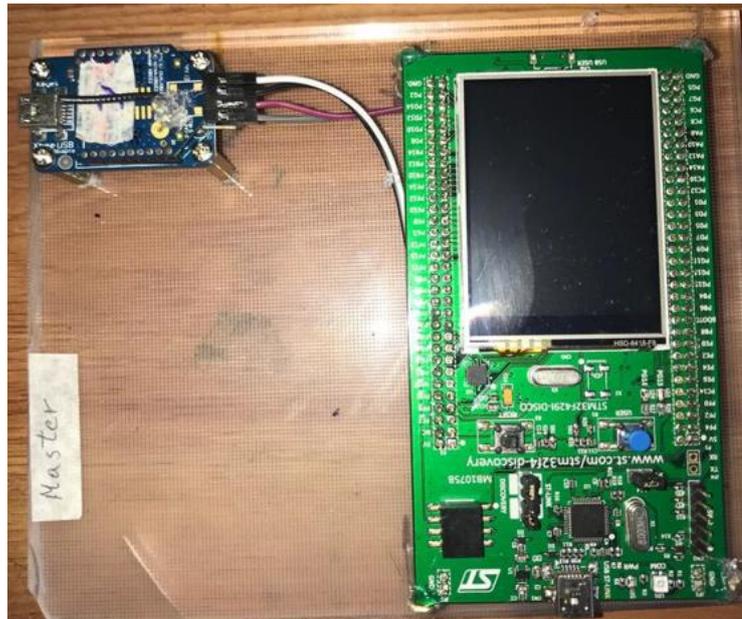


Figura 3. 20: Esquemático de conexiones del nodo principal.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realiza la programación de este micro ARM STM32F4 para que realice las tareas designadas, esto se puede observar en el código que se presentara a continuación.

En la figura 3.21 se muestra la cabecera del código en el que se llaman a las librerías a utilizar, en este caso para este nodo es necesario llamar a mbed.h y LCD\_DISCO\_F429ZI.h, posteriormente se requiere llamar a la utilización del LCD y los puertos seriales correspondientes, adicionalmente se crean variables tipo flotante para guardar los datos recibidos por la red inalámbrica.

```
1 #include "mbed.h"
2 #include "LCD_DISCO_F429ZI.h"
3
4 LCD_DISCO_F429ZI lcd;
5 //Serial pc(SERIAL_TX, SERIAL_RX);
6 Serial pc(PB_6, PB_7);
7 DigitalOut led1(LED1);
8 float dato,sensor1,sensor2;
```

Figura 3. 21: Cabecera del código utilizado en nodo principal.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se debe realizar las tareas de presentación y asignación de valores a variables creadas en la cabecera, en la figura 3.22 se presenta función principal del código, en el que se configura la velocidad en baudios del puerto serial para sincronizar con el módulo XBEE, a continuación, se realiza diseño de presentación del lcd con

texto y valores, inicialmente tendrán valor igual a cero ya que no se han obtenido valores algunos.

```
9     int main()
10    {
11        led1 = 1;
12        pc.baud(9600);
13        BSP_LCD_SetFont(&Font20);
14        lcd.DisplayStringAt(0, LINE(1), (uint8_t *)"Master ", CENTER_MODE);
15        lcd.DisplayStringAt(0, LINE(4), (uint8_t *)"SENSOR1", CENTER_MODE);
16        lcd.DisplayStringAt(0, LINE(5), (uint8_t *)"0", CENTER_MODE);
17        lcd.DisplayStringAt(0, LINE(6), (uint8_t *)"SENSOR2", CENTER_MODE);
18        lcd.DisplayStringAt(0, LINE(7), (uint8_t *)"50", CENTER_MODE);
19    }
```

Figura 3. 22: Primera parte de la función principal del código.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, por medio de un lazo while, como se muestra en la figura 3.23, se reciben los datos del puerto serial y se lo asigna a una variable de acuerdo al dato recibido de la red, y este se presentará en la pantalla LCD.

```
20        wait(1);
21        while(1)
22        {
23            lcd.Clear(LCD_COLOR_BLUE);
24            lcd.SetBackColor(LCD_COLOR_BLUE);
25            lcd.SetTextColor(LCD_COLOR_WHITE);
26            dato=1.0;
27            pc.printf("%2.1f [^\n]",&dato);
28            pc.scanf("%2.1f [^\n",&sensor1);
29            dato=2.0;
30            pc.printf("%2.1f [^\n",&dato);
31            pc.scanf("%2.1f [^\n",&sensor2);
32
33            lcd.DisplayStringAt(0, LINE(1), (uint8_t *)"Master ", CENTER_MODE);
34            lcd.DisplayStringAt(0, LINE(4), (uint8_t *)"SENSOR1", CENTER_MODE);
35            lcd.DisplayStringAt(0, LINE(5), (uint8_t *)"0", CENTER_MODE);
36            lcd.DisplayStringAt(0, LINE(6), (uint8_t *)"SENSOR2", CENTER_MODE);
37            lcd.DisplayStringAt(0, LINE(7), (uint8_t *)"50", CENTER_MODE);
38        wait(1);
39    }
40    }
41 }
```

Figura 3. 23: Segunda parte de la función principal del código.

Fuente: Elaboración propia.

A medida que crezca la red de nodos es necesario colocar en el nodo principal más variables, y así mismo presentarlas en orden en la pantalla TFT LCD.

### 3.5. Cálculo de costos.

A continuación, en esta sección del capítulo se describe los costos del proyecto para efecto del lector cuando se desee implementar la solución inalámbrica. En primera

instancia antes de realizar la compra de los dispositivos se debe prever para que tipo de red se implementara, ya que los módulos XBEE que se adquirieron garantizan una comunicación entre 40 metros con línea de vista sin pérdida de paquetes o intermitencias.

El micro ARM STM32 también es pilar fundamental del proyecto, este se adquirió de acuerdo a la necesidad de procesamiento y para implementación de manera demostrativa se adquiere una placa embebida con un LCD TFT.

Los sensores MQ-135 son perfecto para calcular la cantidad de concentración de CO2 en un ambiente determinado, para ello se los adquirió, los costos varían de acuerdo a los proveedores, pero existe una media muy accesible para que los costos del proyecto no se eleven.

A continuación, se detalla costos de cada uno de los elementos:

Tabla 3. 1: Costos de materiales utilizados en el proyecto.

Material	Cantidad	Costo
STM32F4 Discovery	1	\$95
STM32F1 Núcleo	3	\$106
Sensor MQ-135	1	\$54
Sensor MQ-7	1	\$21
Sensor LM35	1	\$0.25
Shield Xbee	4	\$100
Xbee S2 Pro	4	\$140
Cables	-	\$4
Costo Total : \$520,25		

Fuente: Elaboración propia.

Los costos de implementar un proyecto así varían mucho de acuerdo a cuantos nodos serian requeridos, en el caso de este proyecto se implementó tres nodos secundarios y uno principal, para ello se utilizó un STM32F4 y tres STM32F1.

### 3.6. Pruebas de Funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento permiten comprobar si el proyecto implementado ha cumplido con las funciones designadas para el cual fue diseñado, en este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante pruebas de campo al sistema.

### 3.6.1. Pruebas de alcance.

**Objetivo de la prueba:** Determinar el alcance de comunicación que existe entre los nodos secundarios y el nodo principal incluyendo las paredes como obstáculos.

**VARIABLES QUE INTERVIENEN:** Distancia, solicitudes fallidas, alcance.

**Desarrollo del experimento:** Esta prueba se realizó mediante el uso de los 3 nodos secundarios y el nodo principal, ubicados en diferentes lugares del parqueadero de la UCSG para ver la efectividad del proyecto. Los nodos secundarios comenzaron a comunicarse con el nodo principal y se fue alejando más la distancia entre los nodos para analizar el alcance de su comunicación y contrastar los fallos que esta podría presentar.

**Análisis de resultados:** Para analizar los resultados se elaboró una tabla de distancia vs fallos (tabla 3.2), la cual se creó con 10 diferentes distancias de lectura observar cuántos fallos nos generaba la distancia entre los nodos, teniendo en cuenta también los obstáculos como paredes que disminuyen el alcance y la comunicación entre nodos. A partir de los 40 m de distancia se empezaron a generar los fallos. Con el software XCTU para la comunicación de los Xbee en los nodos secundarios, se evidenció los resultados presentamos.

Tabla 3. 2: Distancia de alcance y fallos

Distancia (m)	Fallos
15	0
25	0
30	0
35	0
40	1
45	1
50	1
55	1
60	1

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.2. Pruebas de paquetes de datos perdidos según el voltaje recibido.

**Objetivo de la prueba:** Analizar cuántos paquetes se pierden según el voltaje al que se alimenten los nodos, por lo que se utilizó una fuente para alimentar el circuito e ir nivelando el voltaje deseado. Los voltajes deben estar en un umbral para que exista sincronía y el correcto funcionamiento ya que los elementos principales de los nodos (Módulo Xbee S2 pro, Stm32f4 y la Stm32 Núcleo) poseen características similares en su voltaje.

**Variables que intervienen:** Voltajes inducidos, módulos de comunicación de los nodos secundarios.

**Desarrollo del experimento:** En esta prueba se aplicaron diferentes niveles de voltaje para analizar el comportamiento de los dispositivos y verificar si recepta o no los datos el nodo principal en función del voltaje que esté presente.

**Análisis de resultados:** Se pudo comprobar que de 0 a 3.2 V en donde hubo un porcentaje del 100% donde se perdieron datos y desde el 3.3 a 5 V se receptaron todos los paquetes sin ningún inconveniente, entonces para un correcto funcionamiento se determinó un umbral de 3.3 a 5 V, ya que superando los 5 V los dispositivos pueden dañarse y no cumplir los objetivos establecidos en los nodos secundarios.

Tabla 3. 3: Paquetes recibidos vs paquetes perdidos según el voltaje.

Voltaje	Paquetes recibidos	Paquetes perdidos
5 V	100%	0%
4.5 V	100%	0%
4 V	100%	0%
3.5 V	100%	0%
3.4 V	100%	0%
3.3 V	100%	0%
3.2 V	0%	100%
3.1 V	0%	100%
3 V	0%	100%

Fuente: Elaboración propia

### 3.6.3. Pruebas de potencia de transmisión.

**Objetivo de la prueba:** El objetivo de esta prueba es constatar la potencia, velocidad de transmisión y velocidad de datos de la interfaz que está propuesta para el sistema en cada uno de los nodos mediante los módulos de comunicación Xbee S2 Pro.

**Variables que intervienen:** Potencia de transmisión, velocidad de transmisión, velocidad de datos de la interfaz, frecuencia.

**Desarrollo del experimento:** Se puso al sistema en funcionamiento para medir la potencia de transmisión de los datos, al igual que la velocidad de transmisión y la de interfaz todo esto se ejecutó mediante el software XCTU (figura 3.24), encargado de verificar las variables establecidas para esta prueba para asegurar el envío de las transmisiones.

**Análisis de resultados:** Las pruebas de potencia de transmisión varían en los dispositivos Xbee ya que cada uno tiene características que los diferencian según el modelo utilizado y del tipo de antena del mismo (SMD, wired, chip). La serie PRO de Xbee son los más robustos en cuanto a alcance y potencia de transmisión, para esta red de sensores inalámbricas se utilizó el Xbee S2 pro, en la tabla 3.4 se presentan los resultados de las pruebas de funcionamiento al momento de ejecutarse todo el proceso.

Tabla 3. 4: Pruebas de potencia de transmisión

Características	Pruebas
Potencia de transmisión	100 (mW) – 20(dBm)
Velocidad de transmisión (RF)	250 Kbps
Velocidad de datos de la interfaz	1200 – 115200 pbs
Voltaje de alimentación	3.3 a 5V (con shield)
Frecuencia	2.4 GHz

Fuente: Elaboración propia



Figura 3. 24: Pruebas en XCTU.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.4. Pruebas de envío y recepción de datos.

**Objetivo de la prueba:** Enviar y recibir los datos desde una computadora para analizar los valores que fueron almacenados y presentados por los nodos secundarios al nodo principal en la SMT32 desde el software Hércules.

**Variables que intervienen:** Monitoreo ambiental, envío, recepción de datos, sensores ambientales.

**Desarrollo del experimento:** Para este tipo de pruebas se utilizó el software Hércules, que es un terminal de puerto serie (terminal RS-485 o RS-232), terminal UDP / IP y terminal de servidor de cliente TCP / IP. Mediante el cual una vez conectado, tenemos tres ventanas diferentes con la información de los tres sensores implementados en los nodos secundarios (CO2, temperatura, Calidad del Aire) donde vamos a poder observar los datos enviados y recibidos por parte de los nodos.

**Análisis de resultados:** El software Hércules es de gran ayuda para el monitoreo desde una computadora, al realizarse las pruebas se evidenció los datos enviados por los nodos secundarios en las pantallas que se muestran en las figuras 3.25, 3.28 y 3.30 que son las mismas que se ven reflejadas en el lcd de la STM32 en el nodo principal.

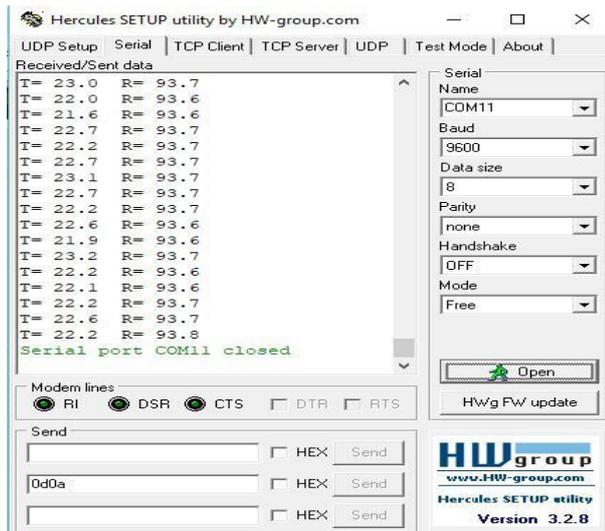


Figura 3. 25: Pruebas de envío y recepción de datos con el sensor de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. 26: Pruebas de recepción de datos en el LCD con información del sensor de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

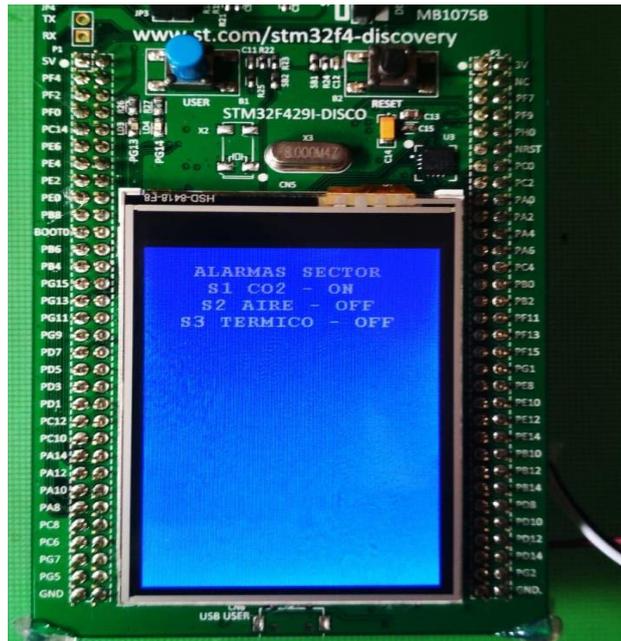


Figura 3. 27: Pruebas de recepción de datos en el LCD con información del sensor de CO2

Fuente: Elaboración propia.

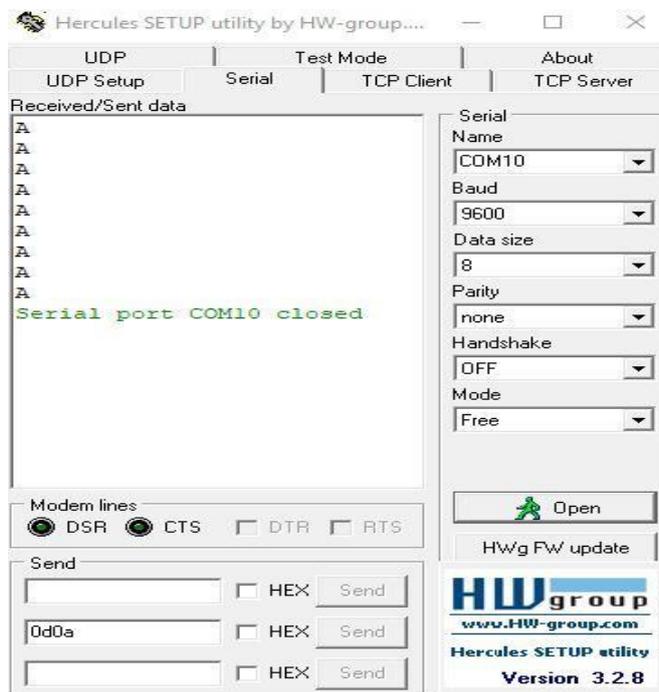


Figura 3. 28: Pruebas de envío y recepción de datos con el sensor de CO2.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3. 29: Pruebas de envío y recepción de datos con el sensor de Calidad del Aire.

Fuente: Elaboración propia.

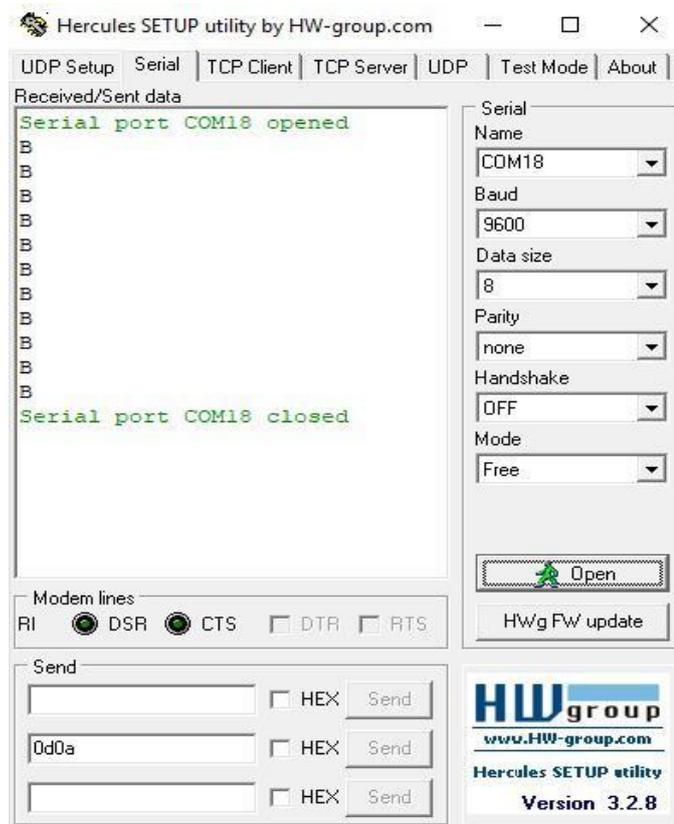


Figura 3. 30: Pruebas de envío y recepción de datos con el sensor de Calidad del Aire.

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN, ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del trabajo de titulación presentado., donde se analizará las características, pruebas de funcionamiento, las funciones que se propusieron en los anteriores capítulos, discusiones de objetivos establecidos y análisis de la solución al problema.

### **4.1. Presentación de resultados**

En este apartado, se expresan la recopilación de los resultados que se obtuvieron abarcando el estado del arte, los componentes de la red, pruebas de prototipo y las funciones realizadas.

#### **4.1.1. Resultados referentes al estado del arte**

Se estudiaron varios trabajos investigativos para tener más conocimiento sobre las redes de sensores inalámbricos y analizar su incidencia en la actualidad frente a las diferentes aplicaciones a las que han sido sustentadas a lo largo de su desarrollo y actualizaciones referente a la tecnología que se utiliza.

Con el análisis que se realizó a todos estos trabajos, identificamos que las redes de sensores inalámbricos (WSN) actualmente son muy utilizadas principalmente para el control y monitoreo de variables que establece cada proyecto de manera diferente, en su mayoría este tipo de redes trabajan con estándares como ZigBee y 6L0WPAN con sus respectivos protocolos de comunicación, para este proyecto de titulación se utilizó ZigBee. Las WSN utilizan varios nodos sensores que envían los datos a los nodos principales llevando la información donde se almacenará y si es el caso, se presentará en pantallas para mayor exposición de los datos, para cada proyecto se destina una topología previamente estudiada previo a su implementación, este tipo de redes se caracterizan con transmisiones de datos a velocidades de 250 Kbps garantizando la seguridad de los datos.

#### **4.1.2. Resultados de hardware**

La red que se diseñó para este trabajo de titulación está compuesta dos ejes importantes que son los nodos secundarios y el nodo principal; ambos tienen diferentes estructuras y están conformados por diversos componentes que se los detallará a continuación.

**Nodo principal:** Este nodo posee dos elementos: el microcontrolador STM32F4 Discovery y un módulo de comunicación inalámbrica Xbee S2 pro. El microcontrolador STM32F4 es el que se comunica de manera serial con el Xbee S2 pro el cual es encargado de transmitir y enviar los paquetes de datos establecidos en la trama de red a una frecuencia de 2.4 GHz.

**Nodos secundarios:** Estos nodos poseen los siguientes elementos: STM32 Núcleo, módulo de comunicación inalámbrica Xbee S2 Pro, protoboard, sensores ambientales (CO2, temperatura, Calidad del Aire). La STM32 Núcleo es la que gestiona y condiciona la señal con todo el proceso en los nodos secundarios, los sensores ambientales detectan la variable, la procesan, se almacena y son enviadas al nodo principal para ser presentados los datos en el LCD.

#### **4.1.3. Resultados del software**

El trabajo de titulación se desarrolló en el software Mbed donde se realizó la programación para la STM32 y los módulos Xbee, donde se asignaron los respectivos puertos del sistema mediante las librerías previamente descargadas para el correcto funcionamiento. En el software XCTU se configuraron los módulos Xbee S2 pro donde se establecieron cuáles eran los maestros y esclavos para el envío y recepción de datos en comunicación serial, se realizaron las pruebas de transmisión y recepción de paquetes para el correcto uso de los dispositivos. El software Hércules sirvió para poder visualizar los datos enviados de los nodos secundarios hacia el nodo principal desde una computadora.

#### **4.1.4. Resultados de las pruebas de prototipo**

Se realizaron cuatro tipos de pruebas de funcionamiento diferentes en el sistema, las pruebas resultaron satisfactorias y se describen a continuación:

- Respecto a las pruebas de alcance sin líneas de vista no hubo solicitudes fallidas; con obstáculos se presentó 1 solicitud de falla a los 55 m de distancia.
- En las Pruebas de paquetes de datos perdidos según el voltaje recibido, de 0 a 3.2 V hubo un 100% de paquetes perdidos en la alimentación del sistema, mientras que desde los 3.3 a 5 V se generaron con éxito el 100% de paquetes recibidos.
- Las pruebas de potencia de transmisión dieron como resultados 100 (mW) – 20(dBm), a una frecuencia de 2.4 GHz.

- Finalmente, las pruebas de envío y recepción de datos se usó el software Hércules para las pruebas en el campo, pudiendo enviar y recibir datos de manera remota sin inconvenientes.

## **4.2. Discusión de resultados**

En esta sección, se realizara un estudio de los resultados adquirido en el sistema desde diferentes puntos de vista, que otorgue respaldar los logros de este trabajo de titulación, no tanto como un diseño de control, sino como un desarrollo sistemático y técnico que nos permita utilizar en otros sistemas , y que se ha podido satisfacer con las expectativas propuestas al inicio del proyecto, en base a una metodología e investigación científica, que asegure la severidad tanto académico como científico.

### **4.2.1. Cumplimiento de los objetivos**

A continuación, se explicará si los objetivos propuestos al comienzo del trabajo de titulación han sido cumplidos o no por el desarrollo del sistema, prototipo y de qué manera estos objetivos se ejecutan en el sistema.

#### **4.2.1.1. Objetivo General**

Se analizó el sistema de monitoreo que fue basado en tecnología inalámbrica que fue apoyada en una plataforma de microcontroladores 32 bits. Así, se pudo analizar la red de sensores inalámbricos de bajo costo para su control y monitoreo ambiental, mediante la ejecución de varias pruebas en el sistema que se elaboró, cuyos resultados arrojó que la red de sensores elegidos para este prototipo fue la correcta y donde existe un control optimo del sistema.

#### **4.2.1.2. Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos establecidos en el capítulo 1 del proyecto de titulación se lograron realizar con éxito, los cuáles se presentan a continuación. Se diseñaron nodos secundarios o sensores para la medición de parámetros ambientales basados en microcontroladores de 32 bits y sensores para la determinación de gases contaminantes emanado por vehículo en el parqueadero de la UCSG enviados al nodo principal. Otro de los objetivos que se propuso y se logró, fue diseñar una red de sensores inalámbricas utilizando módulos de RF de bajo costo para comunicar nodos sensores de medición ambiental. Finalmente se realizaron las diferentes pruebas

experimentales del sistema de medición de parámetros ambientales que permitieron validar su funcionamiento y evaluar la contaminación el parqueadero de la UCSG.

#### **4.2.3. Análisis de la metodología**

Para este proyecto de titulación se utilizó la metodología de tipo correlacional, utilizando trabajos bibliográficos de los últimos 5 años que han sido implementados en diversos proyectos. También, se emplea métodos de investigación descriptivo y exploratorio, con el cual se pudieron establecer las tramas y los protocolos para la red de sensores inalámbricos con lo cual funcionó de manera óptima todo el sistema. Gracias al uso de este tipo de metodología se llegó a cumplir los objetivos que se plantearon, las pruebas, rutas y el tipo de arquitectura que se implementó para la elaboración de los nodos secundarios y nodo principal.

#### **4.2.4. Análisis de la solución del problema de investigación**

Mediante el diseño y la implementación de esta red de sensores inalámbricas, el problema de investigación pudo ser abarcado en su totalidad, generándose una WSN para el monitoreo de los factores ambientales (CO<sub>2</sub>, temperatura y calidad del aire) que desbordan los vehículos en el parqueadero de la UCSG. El proyecto se realizó con materiales de bajo costo con la tecnología ZigBee, la topología utilizada fue acertada para la creación de toda la red donde se obtuvieron los datos enviados y recibidos entre los nodos secundarios y el principal mediante la comunicación serial. El monitoreo de manera remota para el control desde una computadora también fue logrado con el software Hércules que proporcionó toda la información en las pantallas de comunicación de cada uno de los diferentes sensores de la red.

#### **4.2.5. Discusión final**

Los objetivos que fueron planteados al inicio del proyecto, se realizaron con éxito; diseñándose la red de sensores inalámbricos con materiales de bajo costo y que en la actualidad tienen gran impacto en lo que respecta a WSN, se evidenció en todos los trabajos de tipo investigativo que se estudiaron previo a la elaboración de esta red. Las redes de sensores inalámbricos para el monitoreo de factores ambientales en el parqueadero de la UCSG se adaptaron al área donde fue implementado incluso con los obstáculos que se presentaron por parte de la infraestructura, las pruebas de

funcionamiento realizadas y los resultados obtenidos nos dan la fiabilidad de la red y de este tipo de sistemas.

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegaron al finalizar y analizar la red de sensores inalámbricos para el monitoreo de valores ambientales en el parqueadero de la UCSG.

### **5.1. Conclusiones**

El desarrollo del sistema de redes de sensores inalámbricos permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- Los protocolos de comunicación utilizados para redes de comunicación en ordenadores, funcionan con pequeñas adaptaciones en microcontroladores.
- La red de sensores inalámbricos diseñada e implementada, funciona de forma adecuada hasta los 40 m, luego de los cuales genera errores que se incrementan en función de la distancia.
- Los sensores utilizados (MQ135, MQ7, LM35) permiten determinar con mucha precisión y de forma instantánea la calidad de aire en ambientes semicerrados.
- El sistema para la detección del CO<sub>2</sub>, calidad de aire y temperatura propuesto y diseñado puede ser utilizado no solo en los estacionamientos tipo edificios sino también en subterráneos y zonas industriales, gracias a la capacidad de escalabilidad y adaptación a cualquier tipo de espacio de las redes de sensores inalámbricos.

### **5.2. Recomendaciones**

Al finalizar el proyecto se hacen las siguientes recomendaciones:

Desarrollar interfaz gráfica de usuario (GUI) en Matlab para procesamiento o implementación de los datos, la cual facilitaría la verificación de envío y recepción de datos en la red.

Para mejorar el sistema desarrollado en este trabajo de titulación, se recomienda extender la red a todos los niveles del parqueadero de la UCSG, agregando más nodos principales y secundarios para tener un monitoreo más completo sobre la contaminación vehicular.

La contaminación ambiental que se produce en el parqueadero de la UCSG puede bajar si existiera una extracción de los gases ambientales para poder mejorar la calidad del aire.

### **5.3. Trabajos futuros**

En trabajos futuros se podrían añadir y continuar con el proyecto e incluso mejorarlo con el desarrollo de una plataforma o sistema de gestión de red para el monitoreo y control con acceso a internet.

La adaptación de nuevos sensores en la red de monitoreo para proporcionar más información sobre el estado real del parqueadero, en caso de que necesite mejoras para evitar la contaminación en el ambiente.

Desarrollo de una aplicación que nos envíe alertas vía sms o correo en caso de no estar presentes en el área donde está actuando la red de sensores inalámbricos.

Utilizar otro modelo de módulos de comunicación Xbee o adaptarles antenas extras, para aumentar el alcance y recepción rápida de los datos de información.

Por otro lado, para las plataformas de nodos sensores podría ser de particular interés investigar arquitecturas híbridas, ya que, en ellas, el procesamiento de datos de alto rendimientos se externaliza al nodo secundario, mientras que el control del sistema y la comunicación se maneja de manera centralizada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Jiménez Builes, J. A., Romero Acero, A., & Marín Cano, A. (2013). Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de alertas tempranas en minas subterráneas: una solución a la problemática de atmósferas explosivas en la minería de carbón en Colombia. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 31(2), 227-250.

Cama-Pinto, A., Acosta-Coll, M., Piñeres-Espitia, G., Caicedo-Ortiz, J., Zamora-Musa, R., & Sepúlveda-Ojeda, J. (2016). Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24(4), 581-599.

Jennyfer, K., & Carlos, A. (2014). Sistema de detección de incendios forestales mediante redes sensoriales inalámbricas (Zigbee).

Bravo Granda, B. A., Belduma, B., & Alberto, L. (2017). Diseño de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo del tránsito vehicular y la contaminación CO2 dentro de un sector urbano (Bachelor's thesis).

Moya, G., & Javier, E. (2016). Diseño de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) para monitorear parámetros relacionados con la agricultura (Bachelor's thesis, Quito, 2016.).

Velandia, J. A. B., & Castillo, J. N. P. (2012). Redes Inalámbricas de Geosensores aplicadas en sistemas de observación y monitoreo ambiental. *Revista GTI*, 11(29), 59-68.

Amarillo Rojas, M. O. (2015). Simulación de redes de sensores inalámbricos: un modelo energético a nivel de nodo-sensor bajo las especificaciones Ieee 802.15. 4tm y Zigbee (Master's thesis, Facultad de Ingeniería).

Acevedo, C. M. D., & Iturriago, A. X. (2013). Automatización de un sistema de suministro de agua potable a través de la tecnología ZigBee. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(20).

Vizuete, A. Z., Llopis, I. P., Salvador, C. P., & Domingo, M. E. (2015). Sistema Distribuido de Detección de Sismos Usando una Red de Sensores Inalámbrica para Alerta Temprana. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 12(3), 260-269.

Al Ameen, M., Liu, J., & Kwak, K. (2012). Security and privacy issues in wireless sensor networks for healthcare applications. *Journal of medical systems*, 36(1), 93-101.

Acosta Gómez, R. C. (2017). Concentraciones de monóxido de carbono y su incidencia en la salud del personal que labora en el parqueadero del edificio principal del GAD Municipal de Ambato (Master's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Dirección de Posgrado. Maestría en Seguridad e Higiene Industrial y Ambiental).

Bernal, D. C. C., Flórez, M. A. N., & San Juan, D. P. (2015). Medición y registro en tiempo real de concentración de gases contaminantes y niveles de ruido en sectores específicos de una población. Amable Álvarez, Isabel, Méndez Martínez, Jesús, Delgado Pérez, Lenia, Acebo Figueroa, Fernando, de Armas Mestre, Joanna, & Rivero Llop, Marta Lidia. (2017). Contaminación ambiental por ruido. *Revista Médica Electrónica*, 39(3), 640-649. Recuperado en 25 de octubre de 2018, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1684-18242017000300024&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18242017000300024&lng=es&tlng=es).

DIARIO EL ELÉGRAFO. (2016, May 30). 36,8 toneladas de CO2 se generan anualmente en Guayaquil. 30 de Mayo de 2016. Retrieved from <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/guayaquil/1/36-8-toneladas-de-co2-se-generan-anualmente-en-guayaquil>

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), 393-422. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)

Alvira, F. C. (2011). Espectroscopía de Plasmas Inducidos por Láser (LIBS) aplicada a la caracterización de piezas únicas y productos de interés industrial (Tesis). Facultad de Ciencias Exactas. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10915/2641>

Amable Álvarez, I., Méndez Martínez, J., Bello Rodríguez, B. M., Benítez Fuentes, B., Escobar Blanco, L. M., & Zamora Monzón, R. (2017). Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. *Revista Médica Electrónica*, 39(5), 1160-1170.

Andjelković, M. S., Ristić, G. S., & Jakšić, A. B. (2015). Using RADFET for the real-time measurement of gamma radiation dose rate. *Measurement Science and Technology*, 26(2), 25004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/2/025004>

Archila Córdoba, D. M., & Santamaría Buitrago, F. A. (2013). Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos. *Revista Digital TIA*, 2(1), 4-14.

Biswas, S., Ghosh, B., Chandra, A., & Dhar Roy, S. (2017). Frame error rate for single-hop and dual-hop transmissions in 802.15.4 LoWPANs. *International Journal of Electronics*, 104(8), 1413-1426. <https://doi.org/10.1080/00207217.2017.1312706>

Bonnet, P., Beaufour, A., Dydensborg, M. B., & Leopold, M. (2003). Bluetooth-based sensor networks. *ACM SIGMOD Record*, 32(4), 35. <https://doi.org/10.1145/959060.959067>

Capella Hernández, J. V. (2010). *Redes inalámbricas de sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597-612.

Digi. (2009). XBee®/XBee-PRO® RF Modules: Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol. Digi International Inc. Recuperado de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>

Furst, J., Chen, K., Kim, H.-S., & Bonnet, P. (2018). Evaluating Bluetooth Low Energy for IoT. En 2018 IEEE Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Networks and Systems (CPSBench) (pp. 1-6). Porto: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CPSBench.2018.00007>

Gaikwad, N., & Mistry, Y. (2015). Review on Environment Monitoring System and Energy Efficiency. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(7), 90-92.

Gandhi, T., Raja, K. S., & Misra, M. (2008). Cadmium zinc telluride (CZT) nanowire sensors for detection of low energy gamma-ray detection. En T. George & Z. Cheng (Eds.) (p. 695904). Presentado en SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, FL. <https://doi.org/10.1117/12.771310>

García Patiño, M. R., & Mora Valero, J. (2013). *Guía para la implementación de redes de sensores inalámbricos (WSN)*. Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado de <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/877>

Luo, B., Xu, J., & Sun, Z. (2018). Neighbor discovery latency in bluetooth low energy networks. *Wireless Networks*. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1864-3>

Maroto Cantillo, S. R. (2010). Desarrollo de aplicaciones basadas en WSN (Trabajo fin de carrera). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle/10251/8592>

Moridi, M. A., Kawamura, Y., Sharifzadeh, M., Chanda, E. K., Wagner, M., & Okawa, H. (2018). Performance analysis of ZigBee network topologies for underground space monitoring and communication systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.08.018>

Potdar, V., Sharif, A., & Chang, E. (2009). Wireless Sensor Networks: A Survey. En 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (pp. 636-641). Bradford, United Kingdom: IEEE. <https://doi.org/10.1109/WAINA.2009.192>

Rueda-Rueda, J. S., & Portocarrero, J. M. T. (2016). De las redes de sensores inalámbricas al Internet de las cosas: ¿Tecnologías complementarias o antagonistas? En Congreso Internacional en Innovación y Apropiación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación. Bucaramanga, Colombia. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/310320964\\_De\\_las\\_redes\\_de\\_sensores\\_inalambricas\\_al\\_Internet\\_de\\_las\\_cosas\\_Tecnologias\\_complementarias\\_o\\_antagonistas](https://www.researchgate.net/publication/310320964_De_las_redes_de_sensores_inalambricas_al_Internet_de_las_cosas_Tecnologias_complementarias_o_antagonistas)

Shi, G., & Li, K. (2017). Fundamentals of ZigBee and WiFi. En G. Shi & K. Li, *Signal Interference in WiFi and ZigBee Networks* (pp. 9-27). Cham: Springer International Publishing. Recuperado de [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-47806-7\\_2](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-47806-7_2)

Toor, A. S., & Jain, A. K. (2016). A survey of routing protocols in Wireless Sensor Networks: Hierarchical routing. En 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE) (pp. 1-6). Jaipur, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2016.7939555>

Valdivia A., J. A. (2013). Análisis y propuesta de un método de prevención de incendios forestales utilizando redes de sensores inalámbricos (WSN) (Tesis de Grado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Recuperado de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfciv146a/doc/bmfciv146a.pdf>

Zhang, Y., & Xiao, H. (2009). Bluetooth-Based Sensor Networks for Remotely Monitoring the Physiological Signals of a Patient. *IEEE Transactions on Information*

Technology in Biomedicine, 13(6), 1040-1048.  
<https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2028883>

T. Sumitha, K. S. (2014). To Enhance the Lifetime of WSN Network using PSO, Vol 2, 6.

Roldan. (2015). Ofimática I. Retrieved from  
<https://sites.google.com/site/ofimaticaboris/topologia-de-red/red-estrella>

## ANEXOS

### ANEXO A. Módulo XBEE S2.

Estos dispositivos son módulos capaces de comunicarse entre sí de manera inalámbrica, por lo tanto, pueden reemplazar así los cables en una comunicación serial. De acuerdo al fabricante estos dispositivos son una solución muy efectiva cuando se requiere transmitir y recibir información desde los microcontroladores u otro tipo de procesadores de datos.

Los XBEE tienen la ventaja de dar soluciones en redes inalámbricas proporcionando técnicas de comunicación tipo punto a punto, y punto a multipunto, existen en el mercado variaciones de estos dispositivos, pero para el proyecto propuesto se optó por adquirir con un tipo de conector U. RL. RF para la antena ya que permite conectar cualquier tipo de antena, además se debe adquirir un módulo o shield para comunicar vía serial al micro STM32.

En la figura 3.7 se muestra el módulo XBEE adquirido para implementar de modo de estudio el proyecto de sensores de adquisición de nivel de concentración de factores ambientales dentro del parqueadero de la UCSG.



Figura: Modulo XBEE.

Elaborado por: Autor.

Este módulo Xbee S2 se utiliza para habilitar una variedad de diferentes tipos de redes de malla ZigBee con respecto al firmware de malla ZigBee. XBee admite comunicaciones punto a punto de baja potencia, multipunto y puerto serial con computadoras. Al utilizar el firmware de ZigBee, es fácil configurar el módulo como usuario, dispositivo final y nodo coordinador. Las características de XBee serie 2 se enumeran a continuación:

1. Cuenta con antena incorporada.
2. El rango de transmisión en el área urbana es de aproximadamente 40 m y 133 pies.
3. El alcance de la línea de visión es de aproximadamente 20 y 400 m.
4. El voltaje de E/S es 3.3 V.
5. Transmisión máxima y corriente de recepción 40 mA.
6. Corriente de desconexión de 1 uA.
7. La potencia de transmisión es de aproximadamente 2mW.
8. Dispone de 8 pines de E/S digitales.
9. Se puede configurar con AT o API.

El adaptador Explorer USB para Xbee (véase la figura 3.8) está diseñado para que los parámetros de configuración del módulo XBee S2 faciliten el uso o el funcionamiento como un escritor FTDI. La nueva versión del adaptador USB Xbee también está soldada con el pin hembra para FTDI para que los usuarios puedan utilizar directamente el adaptador como un programa de escritura FTDI, como Arduino FIO/pro/mini lilypad Arduino, etc. Es imprescindible para instalaciones y proyectos electrónicos interactivos.

El adaptador permite que la PC configure el módulo XBee/Bluetooth y la placa de desarrollo/controlador para la transmisión inalámbrica de datos a través del cable USB. Puede cargar programas a través del módulo controlador inalámbrico o realizar una transmisión inalámbrica de datos en tiempo real. El adaptador utiliza un chip convertidor USB-UART FTDI232 para garantizar una transmisión de datos estable y confiable.



Figura: Modulo adaptador explores USB para Xbee S2.

Elaborado por: Autor.

Este tipo de dispositivos lleva en el mercado desde hace un tiempo atrás, su gran ventaja es el costo ya que por su bajo precio y las posibilidades que tiene mucha gente comenzó a adquirirlos para realizar pruebas y proyectos en el campo de la conectividad inalámbrica de microcontroladores. Entre las características técnicas proporcionada por la hoja de datos de este dispositivo están:

- Frecuencia de trabajo 2.4 GHz
- Velocidad de datos: 250000 b/s
- Sensibilidad: -101dBm
- Técnica de modulación: DSSS
- Capacidad de memoria: 32kB Flash, 2kB RAM
- Corriente de recepción: 31mA
- Corriente de transmisión: 120mA
- Temperatura de operación: -40°C a 85°C

Entre las ventajas más destacadas de este tipo de módulos son la manera de funcionar de manera consistente en entornos industriales, debido a su amplio rango de temperatura de operación, el chip ofrece confiabilidad y robustez. Está diseñado para dispositivos móviles, electrónica portátil y aplicaciones de IoT como antes se mencionó, logra un bajo de consumo de energía con una combinación de varias tecnologías patentadas por los fabricantes.

#### **ANEXO B. STM32F4 Discovery**

Este dispositivo es un módulo embebido con un microcontrolador arm <<>> que permite a los usuarios fácilmente desarrollar aplicaciones de alta gama, este incluye todo lo que se requiere para empezar la experiencia de programar los stm.

En su interior posee un microcontrolador STM32F429ZIT6 con 2Mbytes de memoria Flash, 256 Kbytes de Ram en un paquete LQFP144, incorpora ST-LINK /V2, puerto de depuración, puerto com virtual, almacenamiento masivo, su alimentación es a través del bus usb o desde una tensión externa de 3 o 5VDC.



Figura: STM32F4 Discovery.

Elaborado por: Autor.

Además, incluye fácilmente una pantalla TFT LCD de 2.4" QVGA que en el proyecto propuesto permitirá el desarrollo de una interfaz visible que permita mostrar resultados para el usuario final.

Incluye también un giroscopio de salida digital de 3 ejes con sensor de movimiento ST-MEMS, dos pulsadores, usb OTG con conector micro-AB y una gama de software gratuitos proporcionados por el fabricante para el desarrollo de nuevas aplicaciones.

Entre los indicadores se tiene presente 6 leds el cual uno es de comunicación usb, el segundo es de energía 3.3v, dos para uso del usuario y por último dos para el usb OTG VBUS y OC.

### **ANEXO C. Sensores ambientales utilizados en el proyecto.**

Para medición de monóxido de carbono es necesario utilizar un tipo de sensor que permita la adquisición de datos digitales o analógicos y ser procesados para desplegar la información al usuario, para ello se utiliza el sensor Mq-07 (ver figura 3.13), ya que son electroquímicos y varían su resistencia cuando se exponen a determinados niveles de CO<sub>2</sub>. También, fue necesario incorporar al nodo secundario un sensor de control de calidad del aire, para lo cual fue necesario adquirir el módulo Mq-135, tal como se muestra en la figura 3.14. Finalmente, se incorpora un tercer sensor de temperatura, para lo cual se utiliza el LM35 (véase la figura 3.15).



contaminantes (calidad del aire) y ambos poseen un calentador que se encarga de aumentar la temperatura interna para poder reaccionar a los gases provocando la variación de la resistencia, este depende mucho del modelo ya que suele utilizar entre 5 y 2 voltios. El sensor Mq-135 se puede utilizar en equipos para control de calidad de aire de edificios y oficinas, además son adecuados para la detección de NH<sub>3</sub>, Alcohol, Benceno, Humo y CO<sub>2</sub>.

A continuación, se presenta varias especificaciones técnicas del sensor proporcionado por la hoja de datos técnicos del fabricante:

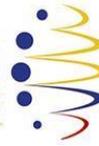
- Voltaje de operación de 5VDC
- Corriente de operación 150mA
- Potencia de consumo 800mW
- Tiempo de precalentamiento 20 segundos
- Resistencia de carga potenciómetro
- Detección de partes por millón de 10ppm a 1000ppm
- Concentración de oxígeno 2% a 21%
- Temperatura de operación -20°C a 70°C



**Presidencia  
de la República  
del Ecuador**



**Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes**



**SENESCYT**  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **González Romero Bill Gianni**, con C.C: # **0923776173** autor del trabajo de titulación: **Monitoreo ambiental con redes de sensores inalámbricos basados en microcontroladores de 32 bits y módulos RF, aplicado a un parqueadero cerrado**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 22 de marzo del 2019.

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **González Romero Bill Gianni**

C.C: 0923776173



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

**REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	Monitoreo ambiental con redes de sensores inalámbricos basados en microcontroladores de 32 bits y módulos RF, aplicado a un parqueadero cerrado.		
<b>AUTOR(ES)</b>	González Romero, Bill Gianni		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	22 de marzo del 2019	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	79
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Automatización, Redes inalámbricas, Control y Monitoreo.		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Red de sensores inalámbricos (WSN), microcontroladores, sensores ambientales, parqueadero cerrado, nodos secundarios o sensores, nodo principal, Xbee		

**RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):**

En el presente trabajo de titulación se explica el estudio y la implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de variables ambientales (CO<sub>2</sub>, temperatura, calidad del aire) aplicado en el parqueadero de la UCSG, esta red está basada en microcontroladores de 32 bits (STM32) todo esto mediante el desarrollo de nodos secundarios que serán los encargados de enviar la información a un nodo principal para que sea mostrada en un LCD. Para este sistema se realizó una investigación correlacional de tipo cuantitativo aplicando las fuentes de investigación bibliográficos y experimentales, con esto se pudo llegar a comprender sobre las WSN sus características más importantes y en este caso los estándares de comunicación que utilizan los XBee, por otra parte la investigación cuantitativa ayudó a poder evaluar los datos mediante pruebas de funcionamiento del sistema propuesto que sirvieron para la discusión y análisis del proyecto. Como resultado de este trabajo de titulación, se implementó una red de sensores inalámbrico, conformada por 3 nodos secundarios encargados de censar las variables ambientales mencionadas anteriormente y 1 nodo principal al cual estarán comunicados los nodos secundarios enviando los distintos tipos de información mediante las direcciones de los nodos previamente establecidas en su trama de red de datos y así conocer los niveles de contaminación ambiental que existen en el parqueadero de la UCSG.

<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593969233447	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:bill9@hotmail.es">bill9@hotmail.es</a>
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre: Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente. Mgs.</b>	
	<b>Teléfono:</b> +59385086815	
	<b>E-mail:</b> Eduardo.mendoza01@cu.ucsg.edu.ec	

**SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA**

<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>	
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>	
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>	