

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Proyecto técnico con enfoque general:

**“DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL
MONITOREO DEL TRÁNSITO VEHICULAR Y LA CONTAMINACIÓN
CO₂ DENTRO DE UN SECTOR URBANO”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

“INGENIERO ELECTRÓNICO”

Autores:

Byron Andrés Bravo Granda

Luis Alberto Belduma Belduma

Tutor:

Ing. Edwin Johnatan Coronel González

CUENCA, ABRIL DE 2017

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Byron Andrés Bravo Granda con documento de identificación N° 070534047-9 y Luis Alberto Belduma Belduma con documento de identificación N° 070586197-9, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado intitulado: “DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL MONITOREO DEL TRÁNSITO VEHICULAR Y LA CONTAMINACIÓN CO2 DENTRO DE UN SECTOR URBANO”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Byron Andrés Bravo G.
C.I. 070534047-9



Luis Alberto Belduma B.
C.I. 070586197-9

Cuenca, abril de 2017

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación **“DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL MONITOREO DEL TRÁNSITO VEHICULAR Y LA CONTAMINACIÓN CO2 DENTRO DE UN SECTOR URBANO”** realizado por los autores Byron Andrés Bravo Granda y Luis Alberto Belduma Belduma, obteniendo el proyecto técnico con enfoque general que cumple con los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, Abril del 2017



Ing. Edwin Johnatan Coronel González.
TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **BYRON ANDRES BRAVO GRANDA** con cedula número 070534047-9 y **LUIS ALBERTO BELDUMA BELDUMA** con cedula número 070586197-9, autores del trabajo de titulación “**DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL MONITOREO DEL TRÁNSITO VEHICULAR Y LA CONTAMINACIÓN CO2 DENTRO DE UN SECTOR URBANO**” certificamos que el contenido total del **PROYECTO TECNICO CON ENFOQUE GENERAL** es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, Abril del 2017



Byron Andres Bravo Granda
CI: 070534047-9



Luis Alberto Belduma Belduma
CI: 070586197-9

RESUMEN

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. La aplicación define el protocolo y topología que debe manejarse en el diseño de la red inalámbrica. Es por esta razón, que en este documento se realizó una investigación detallada acerca de los protocolos y topologías que pueden usarse dentro de este tipo de redes.

Este proyecto analiza el comportamiento vehicular a partir de mediciones de concentración de CO₂ (dióxido de carbono) y niveles de ruido, medidos en porcentaje por millón (ppm) y decibelios (dB) respectivamente. Tales mediciones son extraídas por una red de sensores inalámbrica montada en el sector Calle larga y Hermano Miguel de la ciudad de Cuenca.

La red inalámbrica basada en el estándar Zigbee, se compone de cuatro nodos sensores y un coordinador. Los nodos sensores envían los datos de forma inalámbrica hacia el coordinador, el mismo que a través de una interfaz gráfica desarrollada en JAVA, muestra el comportamiento que describen las curvas de medición y almacena la información en un servidor web vinculado a MySQL.

El análisis del comportamiento vehicular considera los niveles de ruido y concentración de CO₂ mayores a su valor de referencia base, medidos en un determinado lapso de tiempo. Gráficas comparativas e individuales de ruido y concentración de CO₂ tomadas en dos días de medición, pertenecientes a los nodos, muestran mayor actividad vehicular en horas pico que se reducen al término del día y llegada la media noche, además, del rendimiento individual de los nodos dentro de la red, que depende de la infraestructura del Sistema Integrado de Seguridad ECU911.

ÍNDICE GENERAL

Índice General.....	I
Índice de figuras.....	III
Índice de tablas.....	V
Agradecimientos.....	VI
Dedicatoria.....	VII
JUSTIFICACION.....	VIII
INTRODUCCIÓN	IX
1. ESTADO DEL ARTE.....	1
1.1. <i>Red de sensores inalámbricos (WSN)</i>	1
1.2. <i>Arquitectura de un nodo sensor</i>	2
1.3. <i>Tipos de topologías en WSN</i>	3
1.3.1. <i>Topología estrella</i>	3
1.3.2. <i>Topología mesh</i>	3
1.3.3. <i>Topología híbrida</i>	3
1.4. <i>Protocolos de enrutamiento en WSN</i>	4
1.4.1. <i>Protocolos centrados en los datos</i>	5
1.4.2. <i>Protocolos jerárquicos</i>	9
1.4.3. <i>Protocolos basados en la localización</i>	13
1.4.4. <i>Protocolos basados en la movilidad</i>	15
1.4.5. <i>Protocolos basados en QoS</i>	18
1.4.6. <i>Protocolos basados en el flujo de la red</i>	20
1.4.7. <i>Protocolos basados en Multi-trayecto</i>	20
1.4.8. <i>Protocolos basados en heterogeneidad</i>	21
1.5. <i>Aplicaciones de las WSN</i>	21
1.5.1. <i>Aplicaciones militares</i>	22
1.5.2. <i>Aplicaciones de monitoreo ambiental</i>	22
1.5.3. <i>Aplicaciones dentro de la salud</i>	22
1.5.4. <i>Aplicaciones en domótica</i>	23

2. IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO	24
2.1. <i>Diagramas de funcionamiento y de bloques del proyecto</i>	24
2.2. <i>Diseño y construcción de la red de sensores inalámbricos.....</i>	27
2.2.1. <i>Selección de los componentes para el diseño del proyecto.</i>	28
2.2.2. <i>Diseño y construcción del circuito y la placa.....</i>	34
2.2.3. <i>Diseño y construcción de la carcasa del proyecto “WiSeNet” ..</i>	37
2.2.4. <i>Funcionamiento de la red inalámbrica de sensores “WiSeNet”</i>	38
2.3. <i>Desarrollo de la aplicación para el monitoreo de la red en NetBeans</i>	39
2.3.1. <i>Desarrollo del archivo ejecutable de la aplicación gráfica</i>	39
2.3.2. <i>Diseño y funcionamiento de la interfaz grafica.....</i>	42
2.4. <i>Costo de desarrollo del proyecto.....</i>	44
2.4.1. <i>Costo de desarrollo de los dispositivos del proyecto “WiSeNet”</i>	44
2.4.2. <i>Costo de componentes y herramientas adicionales utilizados en el</i> <i>proyecto “WiSeNet”</i>	45
2.4.3. <i>Costo del desarrollo de la aplicación para el monitoreo “WiSeNet” y de</i> <i>programación de los microcontroladores.</i>	45
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
3.1. <i>Parámetros presentes en el monitoreo</i>	47
3.2. <i>Análisis de los niveles de Ruido y Contaminación Vehicular.....</i>	47
3.2.1. <i>Ruido</i>	48
3.2.2. <i>Contaminación de CO₂</i>	51
CONCLUSIONES.....	56
RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	59
APÉNDICES	61
<i>APÉNDICE A.....</i>	61
<i>APÉNDICE B.....</i>	62
<i>APÉNDICE C.....</i>	64
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Descripción general de una red de sensores inalámbricos	1
Figura 1.2: Componentes de un nodo sensor.....	2
Figura 1.3: Tipos de topologías: a) estrella, b) mesh, c) híbrida	4
Figura 1.4: Protocolo SPIN	7
Figura 1.5: Protocolo de difusión directa.....	8
Figura 1.6: Estructura de un protocolo LEACH.....	10
Figura 1.7: Estructura del protocolo PEGASIS.....	11
Figura 1.8: Estructura del protocolo TEEN	12
Figura 1.9: Estructura del protocolo GEAR.....	14
Figura 1.10: Arquitectura de tres niveles de los MULEs.....	17
Figura 1.11: Enrutamiento Consiente de Energía QoS	19
Figura 2.1: Diagrama de funcionamiento de los nodos sensores pertenecientes al sistema	25
Figura 2.2: Diagrama de funcionamiento del nodo coordinador perteneciente al sistema .	26
Figura 2.3: Diagrama de bloques del sistema	27
Figura 2.4: Módulo MG-811	28
Figura 2.5: Módulo de sonido Sparkfun	29
Figura 2.6: Módulo Lipo Rider Pro	29
Figura 2.7: Módulo del reloj de tiempo real DS-3231.....	30
Figura 2.8: Módulo del reloj de tiempo real DS-3231.....	31
Figura 2.9: Módulo XBee-PRO® 900 DigiMesh	31
Figura 2.10: Placa Raspberry pi 3B	33
Figura 2.11: Placa Arduino Mega	34
Figura 2.12: Módulo de USB a serial CH340.....	34
Figura 2.13: Esquema de conexión de los componentes electrónicos del nodo sensor de la red inalámbrica de sensores “WiSeNet”	35
Figura 2.14: Esquema de conexión de los componentes electrónicos del nodo coordinador de la red inalámbrica de sensores “WiSeNet”	35
Figura 2.15: Diagrama de las pistas realizadas en AutoCAD.....	36
Figura 2.16: PBC del proyecto “WiSeNet”	36
Figura 2.17: Diseño de la carcasa en 3D para el nodo sensor	37
Figura 2.18: Diseño de la carcasa en 3D para el nodo coordinador	37
Figura 2.19: Interfaz gráfica del proyecto en pleno funcionamiento.....	38
Figura 2.20: Generación del archivo ECU911.jar	39
Figura 2.21: Ubicación del archivo ECU911.jar para su posterior compilación	40

Figura 2.22: <i>Compilación del proyecto dentro del dispositivo Raspberry</i>	41
Figura 2.23: <i>Aplicación “MONITOREO DEL PROYECTO WISENET” y sus funciones principales</i>	43
Figura 2.24: <i>Base de datos en MySQL para el almacenamiento instalada en el dispositivo Raspberry</i>	44
Figura 3.1: <i>Disposición de la red de sensores dentro del sector Calle Larga y Hermano Miguel con distancia entre Nodo- Coordinador y altura de postes (P). Distancia entre nodos y coordinador</i>	46
Figura 3.2: <i>Valores extraídos de la base de datos a) Niveles de Ruido perteneciente al 8 de marzo del 2017 b) Niveles de Ruido perteneciente al 8 de marzo del 2017</i>	49
Figura 3.3: <i>Mediciones de Ruido tomadas por el primer Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo</i>	49
Figura 3.4: <i>Mediciones de Ruido tomadas por el segundo Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo</i>	50
Figura 3.5: <i>Mediciones de Ruido tomadas por el Nodo 3 desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo</i>	50
Figura 3.6: <i>Mediciones de Ruido tomadas por el cuarto Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo</i>	51
Figura 3.7: <i>Valores extraídos de la base de datos a) Niveles de Concentración de CO₂ perteneciente al 8 de marzo del 2017 b) Niveles de Concentración de CO₂ perteneciente al 8 de marzo del 2017</i>	52
Figura 3.8: <i>Mediciones de Concentración de CO₂ tomadas por el primer Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo</i>	53
Figura 3.9: <i>Mediciones de Concentración de CO₂ tomadas por el segundo Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo</i>	54
Figura 3.10: <i>Mediciones de Concentración de CO₂ tomadas por el tercer Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo</i>	54
Figura 3.11: <i>Mediciones de Concentración de CO₂ tomadas por el cuarto Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo</i>	55
Figura 3.12: <i>Cuadro comparativo del nivel de Ruido tomado por los cuatro nodos el jueves, 9 de marzo del 2017 desde las 8:50 hasta las 23:50 horas. El eje vertical muestra las variaciones de ruido en dB, mientras que el horizontal muestra las horas de medición</i>	56
Figura 3.13: <i>Cuadro comparativo del nivel de concentración de CO₂ tomado por los cuatro nodos el jueves, 9 de marzo del 2017 desde las 8:50 hasta las 23:50 horas. El eje vertical muestra las variaciones de CO₂ en ppm, mientras que el eje horizontal muestra las horas de medición</i>	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: <i>Tipos de enrutamiento para las redes de sensores inalámbricos</i>	5
Tabla 2.1: <i>Especificaciones del sensor MG-811</i>	28
Tabla 2.2: <i>Especificaciones del módulo Lipo Rider Pro</i>	30
Tabla 2.3: <i>Especificaciones del módulo XBee-PRO® 900 DigiMesh</i>	32
Tabla 2.4: <i>Costo de desarrollo de los dispositivos del proyecto “WiSeNet”</i>	44
Tabla 2.5: <i>Costo de componentes adicionales utilizados en el proyecto “WiSeNet”</i>	45
Tabla 2.6: <i>Costo del desarrollo de la aplicación para el monitoreo “WiSeNet” y de programación de los microcontroladores</i>	45

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana por habernos permitido formar parte de su seno académico-científico permitiéndonos estudiar la carrera que tanto nos apasiona y que, con la ayuda de su personal docente, quienes pusieron a nuestra disposición su tiempo, conocimientos y consejos nos sirvieron de apoyo para seguir adelante hasta culminar nuestros estudios.

De manera especial agradecemos también a nuestro Tutor de Tesis el Ing. Edwin Johnatan Coronel Gonzalez por habernos brindado la oportunidad de recurrir a sus conocimientos, sabiéndonos motivar y guiar pacientemente durante el desarrollo de nuestro proyecto de Tesis.

Nuestro agradecimiento también va dirigido al Ing. Juan Carlos Jiménez Coordinador Zonal-Zona 6 del Sistema Integrado de Seguridad ECU911 por permitirnos utilizar la infraestructura civil e informática perteneciente al ECU911. Además, extendemos nuestro agradecimiento también a los señores Diego Astudillo y Marcelo Barbecho ingenieros del departamento de Tecnología por brindarnos asesoramiento necesario para en el desarrollo, montaje y pruebas de nuestro proyecto. Al ingeniero Ángel Soto docente de la Universidad Politécnica Salesiana por facilitarnos los trámites correspondientes al convenio entre la universidad y el Sistema Integrado de Seguridad ECU911

Y para finalizar, a nuestros padres que le debemos el cumplimiento de todos nuestros logros incluyendo este. Nos forjaron en el transcurso de nuestras vidas hasta el día de hoy, convirtiéndonos en las personas que somos actualmente, siempre apoyándonos y motivándonos, para ellos un infinito agradecimiento.

LUIS BELDUMA – BYRON BRAVO

DEDICATORIA

A mi padre Abraham Belduma Vacacela y mi madre Eudalia Esperanza Belduma Leon quienes con su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años me han permitido llegar a esta instancia de mi vida. Su apoyo incondicional que siempre busco mi bienestar y felicidad, junto a sus consejos que se fortalecieron con el pasar de los años para evitar que cometa los errores que ellos ya superaron, me han permitido ser una mejor persona y superar aquellos momentos difíciles de mi vida. A mis hermanas Elva Johanna Belduma Belduma y Viviana Elizabeth Belduma Belduma que a pesar de la distancia y las pequeñas diferencias que nos distinguen como hermanos, los pocos momentos compartidos me hicieron sentir su apoyo y cariño. A toda mi familia y amigos, cuya sola presencia sirvió de soporte para seguir adelante día a día en el transcurso de mi carrera Universitaria.

LUIS BELDUMA BELDUMA

Dedico este trabajo primeramente a Dios porque me dio la sabiduría, el entendimiento y la paciencia para concluir con éxitos mis estudios profesionales. A mis tíos Cesar y Alberto que nunca perdieron la confianza en mí a pesar de todas las dificultades que se presentaron en todo este largo camino siempre supieron guiarme y aconsejarme para no rendirme ante las adversidades. En especial dedico este trabajo a mis madres, Ana Mercedes que a pesar de estar lejos de mí siempre supo cómo mantenerse cerca, supo cómo aconsejarme y como apoyarme, Eufemia Mercedes que con su personalidad fuerte supo inculcarme desde pequeño los buenos valores que a la larga me han convertido en la persona que soy, y a Cecilia Raquel que siempre me dio la confianza para yo poder apoyarme en ella en los momentos más difíciles de mi carrera. A todos mis amigos que supieron apoyarme siempre.

BYRON BRAVO GRANDA

JUSTIFICACION.

El presente proyecto, se muestra como solución a la congestión vehicular y emanación de CO₂ descontrolada, una red de monitoreo, de tal manera que ayude en la concientización de las personas, a través, de datos estadísticos de la contaminación ambiental provocada por los factores antes mencionados, producidos en grandes concentraciones de tránsito vehicular. De esto, se ha realizado varios estudios y utilizado varias herramientas, una de ellas es el procesamiento de imágenes que ayuda a monitorear la densidad vehicular mediante un proceso de identificación. Otra es la segmentación de imágenes que suele presentar problemas debido a las condiciones ambientales y climáticas (neblina, polución, baja iluminación) lo cual afectan a las capturas de las imágenes [1][4].

Otros sistemas más avanzados utilizan lógica difusa para monitoreo automatizado mediante procesamiento de imágenes [2][5] o redes de sensores en conjunto con una red vehicular ad-hoc (VANET), pero que a su vez presenta un gran problema al momento de trazar una ruta dentro de los escenarios debido a la movilidad de los nodos (vehículos) [3][6]. A nivel nacional se ha implementado proyectos que han seguido la línea de procesamiento de imágenes en su gran mayoría [4][7], pero también se ha logrado realizar la implementación de algunas nuevas alternativas como la utilización de aplicaciones de GPS en sistemas móviles celulares permitiendo ampliar el campo de estudio para el tema de monitoreo del tráfico vehicular [5][8].

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han ido desarrollado tecnologías inalámbricas que han facilitado la comunicación en diferentes sectores sin necesidad de conectar algún tipo de cable. Dentro de la implementación de estas nuevas tecnologías han destacado las redes inalámbricas de sensores que permiten desde analizar el comportamiento del ambiente hasta ser utilizadas para planes de estrategia militar. Una red de sensores está conformada por un grupo de nodos autónomos compuesto por diferentes componentes. Dentro de esto componente debe constar por lo menos un sensor. El objetivo de este tipo de red es reunir información del medio al que se encuentra rodeado. De esta forma se pueden desplegar una serie de aplicaciones dependiendo de lo que requiera medir con los sensores. Este trabajo está enfocado a realizar el sensado de un sector urbano para monitorear el nivel de tráfico y las emanaciones de CO₂ que se producen a la atmosfera por la contaminación vehicular.

En el año 2014, según datos estadísticos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) [8][1], a nivel Nacional existían 1'725,712 vehículos matriculados, que representó un aumento de 7,826 vehículos en comparación con el año 2013. Esto también presentó un incremento en las emisiones de CO₂, según datos de la Agencia internacional de Energía (AIE) [6][2], de 32134,37 millones de toneladas para el mismo año, con un incremento a futuro de alrededor de 3000 millones de toneladas anuales. Según la Organización Mundial de Meteorología (OMM) [7][3], el incremento del CO₂ que muestran las cifras anteriores es motivo más que suficiente para que Ecuador empiece a trabajar en la adaptación climática de su población a causa del cambio climático. Entonces, se pretende desarrollar un sistema de monitoreo para emisiones de CO₂ y contaminación auditiva producida por el tránsito vehicular. Ante todo, buscamos obtener un dispositivo portable y adaptable a la mayoría de sectores en la ciudad de Cuenca, sin la necesidad de instalar grandes infraestructuras. De este modo, podemos mejorar aportando a la sociedad para mantener el orden y monitoreando la cantidad de CO₂ que se emana en los distintos sectores.

El proyecto está compuesto por un sistema de sensores interconectados para la adquisición de datos, una red que permita enviar estos datos hasta el usuario o técnico y una interfaz que le facilite la interpretación de los mismos. Entonces, contará con sensores de CO₂ que permitirá capturar los datos del grado de contaminación que

existe dentro del área donde se encontrará instalada la red y sensores que permitan capturar información de la contaminación auditiva causada por los vehículos en la misma área.

Para la infraestructura de la red de sensores se analiza la factibilidad del uso de módulos Zigbee los cuales trabajan bajo la norma IEEE 802.15.4, pudiendo de esta manera crear una red inalámbrica. Esto nos permitirá enviar los datos recogidos a un servidor para luego procesarlos. Dichos datos podran ser visualizados en un programa con graficas lineales de forma que señalen el nivel acustico en forma de SPL y los niveles de CO₂ dentro del area en la que se encuentre implementada la red.

CAPÍTULO 1

1. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo describirá el funcionamiento de una red de sensores, las topologías que se pueden implementar dentro de estas y los algoritmos de enrutamiento que corresponden a la red. Se abordará los protocolos de enrutamiento más relevantes dentro del estudio del diseño de la red. Por último, se detallará las aplicaciones en las que se pueden aplicar las redes de sensores junto con una breve explicación en cada campo.

1.1. Red de sensores inalámbricos (WSN)

Una WSN está compuesta por dispositivos de dimensiones pequeñas, de bajo costo y de poco consumo de energía denominados como nodos. Algunas otras características importantes son su autonomía, su trabajo sin supervisión y la adaptabilidad que tienen para el ambiente en el cual se los utiliza [9]. Además, están conformados por sensores y también por una parte de procesamiento computacional realizado por un microcontrolador. Dentro de una red de sensores cada nodo puede hacer mediciones de lo que sucede alrededor de su entorno para compartir la información entre ellos por medio de un enlace inalámbrico (ver figura 1.1) [10].

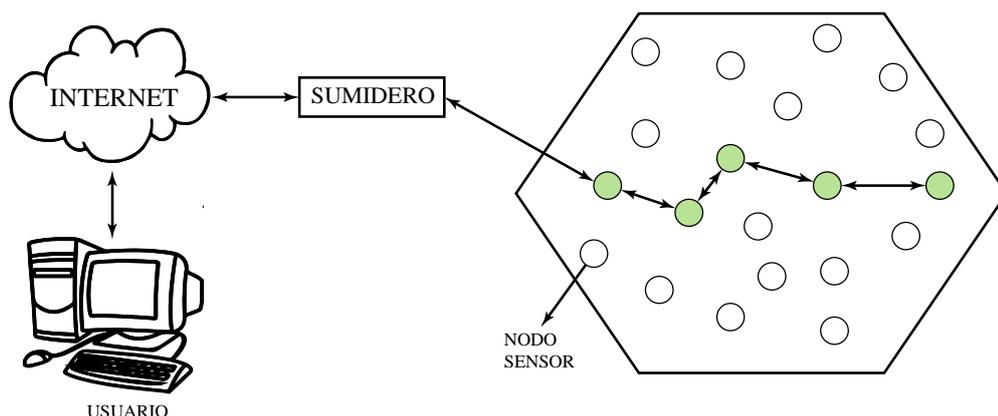


Figura 1.1: Descripción general de una red de sensores inalámbricos [9].

Como podemos observar en la figura 1.1 la WSN está compuesta por los nodos denominados sensores del cual hablaremos en la siguiente sección y también de un nodo denominado sumidero. Este es el encargado de la recolección de los datos de los sensores dentro de la red para luego reenviarlos hasta el sistema de gestión de

información por el medio inalámbrico. Este a diferencia del resto es una unidad inteligente que puede realizar tratamientos distintos a los datos recibidos. Estos van desde la compresión y agregación de datos hasta diagnosticar el estado de los sensores y aplicar mecanismos que sirvan de recuperación en caso de darse algún fallo [9].

1.2. Arquitectura de un nodo sensor

Los nodos sensores están compuestos básicamente por cuatro componentes importantes: la unidad de detección, la unidad de procesamiento, un transceiver y una unidad alimentación. Como se puede observar en la figura 1.2, dentro de la unidad de detección tenemos un sensor y un conversor analógico-digital para la medición y recolección de la información del entorno en señales analógicas y su conversión en señales digitales con un microcontrolador. Un segundo componente es la unidad de procesamiento que cuenta con una pequeña unidad de almacenamiento y es la encargada de gestionar los procesos para que los nodos sensores colaboren entre ellos llevando a cabo la asignación de tareas de detección. El tercer componente es un transceiver que combina las funciones de transmisión y recepción inalámbrica para el envío y recepción de la información con uno o varios nodos dentro de la red. Además, debe tener un balance adecuado para el bajo consumo de energía y una tasa de transmisión relativamente baja que permita que el dispositivo aumente su tiempo de vida útil. El último componente es una unidad de alimentación que es la unidad más importante dentro de un nodo sensor, es decir, es la unidad que se encarga de estimar el tiempo de vida de un nodo y de la red en general. Se puede utilizar el uso de celdas solares para aprovechar el recurso energético natural y prolongar el tiempo de vida de la red de los nodos sensores [10][11].

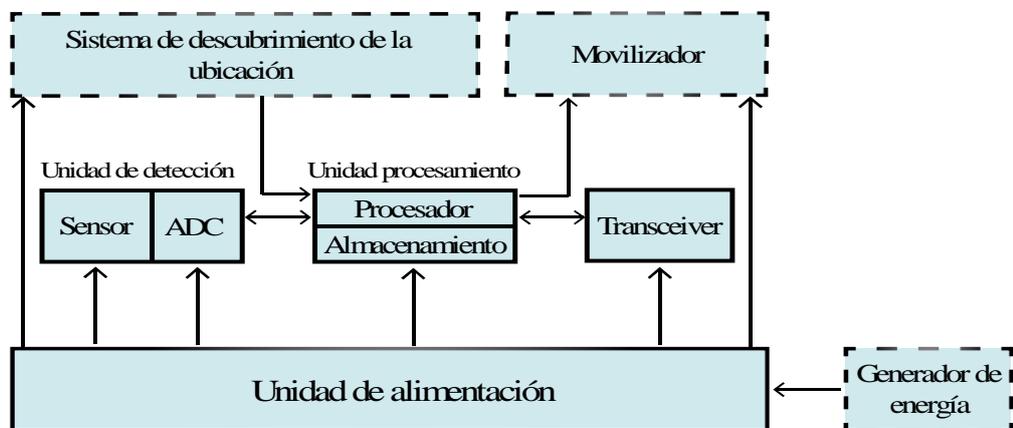


Figura 1.2: Componentes de un nodo sensor [11].

1.3. Tipos de topologías en WSN

La topología que suelen implementarse depende de la cantidad de nodos que existan, de la tasa de datos que van a ser enviados, de la distancia de transmisión y requerimientos de energía, lo cual nos deja tres posibilidades de topologías a aplicar [12].

1.3.1. Topología estrella

Esta topología es simple ya que tenemos un nodo que realiza la función de sumidero o coordinador que puede enviar y/o recibir los mensajes de los nodos restantes. Entonces, solo pueden comunicarse con el nodo sumidero mientras que entre ellos la comunicación nula (ver figura 1.3a). Este tipo de topología tiene la ventaja de mantener a los nodos remotos con un mínimo consumo de energía lo cual permite que existan comunicaciones de baja latencia. Los principales inconvenientes que existen en esta topología es la dependencia de un nodo para la gestión de la red y el rango del sumidero para mantenerse en comunicación con los sensores [12]-[14].

1.3.2. Topología mesh

Esta topología permite que cualquier nodo dentro de la red pueda transmitir a cualquier otro que este dentro de su rango de comunicación. Básicamente está compuesta por nodos multi-trayecto y de bajo consumo de energía. Los primeros son los encargados de retransmitir los mensajes de los de bajo consumo hacia otros nodos de la red. Además, si un nodo desea enviar un mensaje a otro que este fuera del rango de comunicación usara un nodo intermedio que le permita redirigir el mensaje hacia el nodo de destino (ver figura 1.3b). Las principales ventajas de esta red están ligadas a la escalabilidad y la redundancia. Mientras que la principal desventaja radica en el consumo de energía de los nodos debido a los multi-trayecto limitado el tiempo de vida de la batería. Además, como la comunicación hacia otro nodo depende de los saltos mientras mayor sea el número de saltos que realice hacia el destino mayor será el tiempo de entrega del mensaje [12]-[14].

1.3.3. Topología híbrida

Es una combinación de las redes mencionadas. Permite implementar una red más robusta y versátil que mantiene el consumo de energía de los nodos en el mínimo posible. Esta topología no permite que los nodos con menor consumo de energía estén en capacidad de enviar mensajes dejando la responsabilidad de transmitir a los nodos

multi-trayecto (ver figura 1.3c). Este estándar es utilizado en la topología de red mallada para la tecnología ZigBee [14].

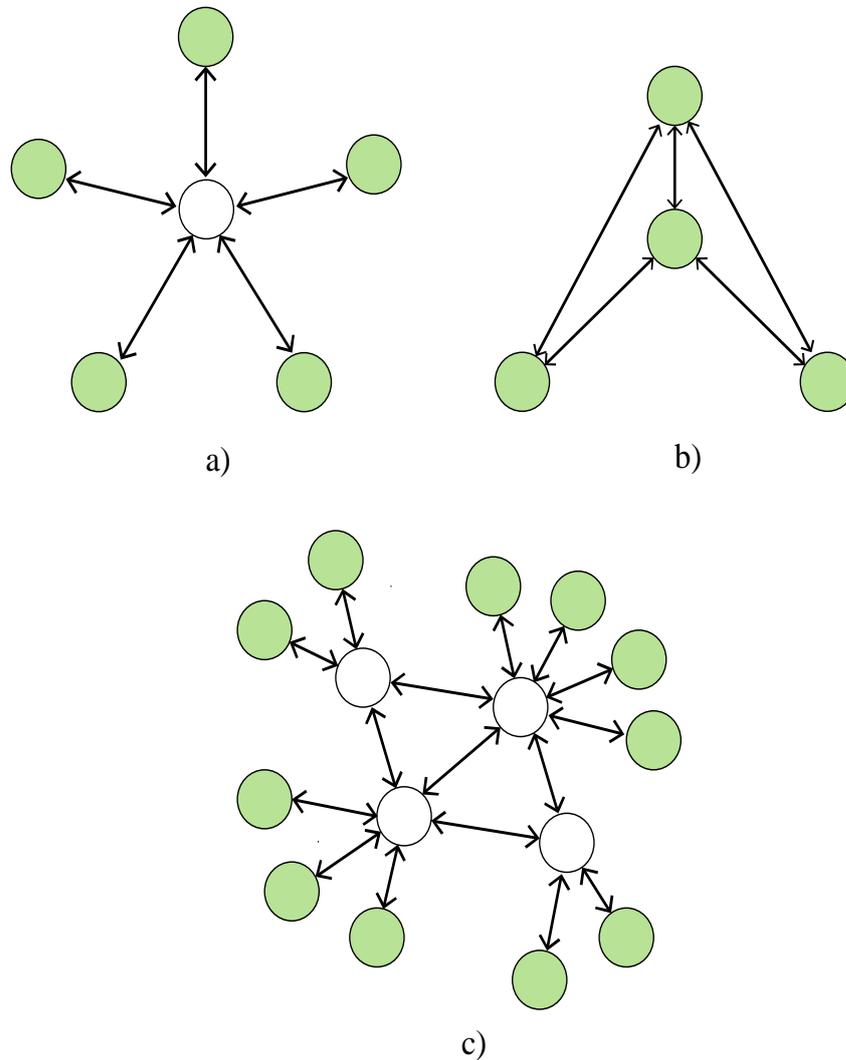


Figura 1.3: Tipos de topologías: a) estrella, b) mesh, c) híbrida [14].

1.4. Protocolos de enrutamiento en WSN

Los protocolos utilizados para WSN son diferentes a los protocolos para redes cableadas e inclusive muy diferente que en una red ad-hoc. Los protocolos de enrutamientos dentro de una red de sensores deben cumplir los estrictos requerimientos para el ahorro de energía. Se pueden dividir en ocho grupos que abarcan un abanico de posibilidades para la generación de las tablas de enrutamiento. Los protocolos son: centrados en datos, jerárquicos, basados en la localización, basados en la movilidad, calidad de servicio (QoS), flujo de red, basado en multi-trayecto y basados en la heterogeneidad (ver tabla 1). [15][16].

Tabla 1.1. *Tipos de enrutamiento para las redes de sensores inalámbricos [16].*

GRUPO	PROTOCOLOS
Centrado en los datos (Data-centric)	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor Protocol for Information via Negotiation (SPIN). - Por difusión directa. - Basado en gradientes
Jerárquico (Hierarchical)	<ul style="list-style-type: none"> - Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH). - Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PAGASIS). - Threshold-Sensitive Energy Efficient Protocols (TEEN).
Basado en la localización (Location-based)	<ul style="list-style-type: none"> - Geographic Adaptive Fidelity (GAF). - Geographic and Energy Aware Routing (GEAR). - Geographic Random Forwarding (GeRaF).
Basado en la movilidad (Mobility-based)	<ul style="list-style-type: none"> - Scalable Energy-efficient Asynchronous Dissemination (SEAD). - Movilidad común y enrutamiento - Data MULEs
QoS	<ul style="list-style-type: none"> - Sequential Assignment Routing (SAR). - Multi path and Multi SPEED (MMSPEED). - Enrutamiento Consiente de Energía QoS
Otros protocolos	<ul style="list-style-type: none"> - Flujo de la red(Network flow) - Basado en el multisalto (Multipath-based) - Basado en heterogeneidad (Heterogeneity-based)

1.4.1. Protocolos centrados en los datos

Los protocolos en este grupo tienen la característica de realizar solo la comunicación nodo a nodo. El protocolo empieza cuando un sumidero envía una solicitud de consulta

que pasa a través de toda la red hasta llegar a un sensor de origen, el cual se encarga de responder la consulta. Además, se puede permitir a los sensores intermedios agregar algún tipo de información que procedan de otros sensores de origen para mejorar la eficiencia de energía creando rutas dedicadas desde el origen al sumidero, estos protocolos no requieren de un reloj de sincronización global [15][16].

- **Sensor Protocol for Information via Negotiation (SPIN).**- Este protocolo incentiva a los sensores a negociar con los otros antes de que ocurra una diseminación de datos evitando la inserción de información inútil y redundante para la red. La negociación y la adaptación de los recursos lo cual resuelve las deficiencias de los protocolos de inundación logrando una mayor eficiencia energética. Las principales desventajas de los protocolos de inundación son la implosión y la superposición. La implosión sucede cuando un origen envía un mensaje por diferentes rutas, de forma que este mensaje llega al destino por las dos rutas. Mientras que la superposición sucede cuando distintos orígenes que cubren una misma zona envían la información, esto resulta en la duplicación de datos en el nodo vecino de estos dos nodos orígenes. Ambas desventajas consumen los recursos de la red haciendo que el tiempo de vida sea menor, además de que todos los nodos deben estar siempre activos. SPIN utiliza metadatos que describen que datos quiere difundir los sensores. Se utilizan tres tipos de mensajes para la comunicación (ADV, REQ y DATA). El protocolo empieza cuando un nodo SPIN tiene nuevos datos que están dispuestos a ser compartidos, entonces se realiza una difusión de un mensaje ADV que contiene metadatos. Si un vecino está interesado en esta información envía un mensaje REQ para que el nodo SPIN le pueda compartir el mensaje DATA con los datos respectivos, luego, este nodo se encarga de repetir el proceso con todos sus vecinos cubriendo de esta manera el área entera. En la figura 1.4a podemos ver el proceso de difusión de ADV desde el nodo A hacia el nodo B. En la figura 1.4b se puede observar el mensaje REQ que informa el deseo de recibir la información. En la figura 1.4c se envía el mensaje DATA con la información. Las figuras 1.4d-1.4f describen el mismo proceso para la difusión de la información a los nodos restantes (desde B hasta C, D, E, F y G). El protocolo tiene como ventaja que un cambio topológico puede ser localizado debido a

que cada nodo sabe la posición de sus vecinos que están a un solo salto [15]-[17].

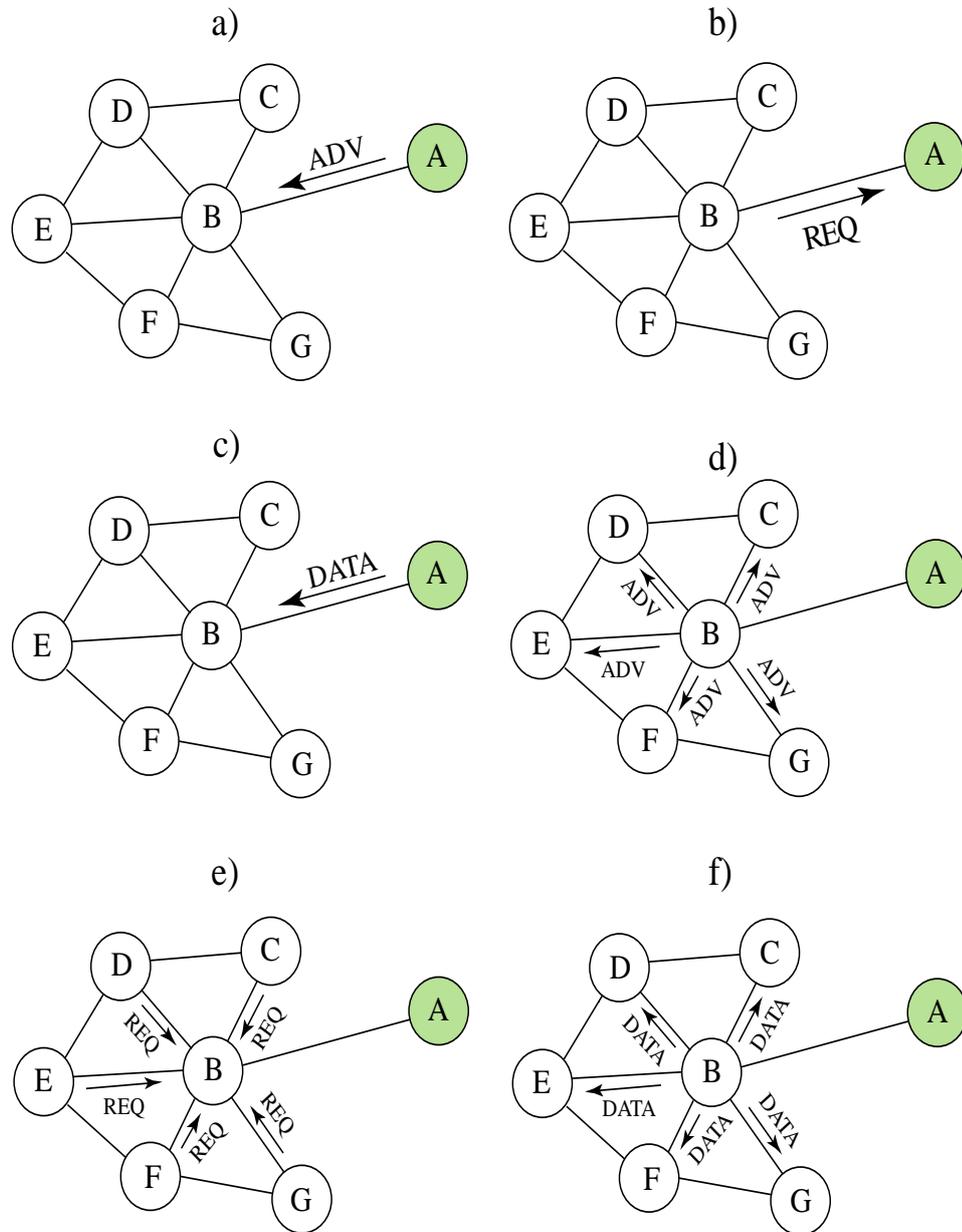


Figura 1.4: Protocolo SPIN [16].

- **Difusión directa.** - En este protocolo los sensores son los encargados de medir eventos y crear gradientes de información en sus alrededores. El nodo *sumidero* solicita los datos con la difusión de alguna tarea que se desea realizar dentro de la red definida como mensaje de interés. Este mensaje es difundido en la red salto a salto transmitiéndose también a los vecinos de cada nodo. El sumidero puede consultar los datos propagando el interés con la ayuda de los nodos intermedios hasta que llegue al nodo de origen. Cuando un nodo recibe el

mensaje de interés en ese instante configura un gradiente y lo reenvía hacia el nodo del cual recibió dicho mensaje. Los gradientes se encargan de extraer la información que solicite el sumidero. El proceso se repite hasta que los gradientes son configurados desde el origen hacia el sumidero. En la figura 1.5a podemos observar cómo se propaga el interés desde el sumidero hacia el nodo origen. En la figura 1.5b podemos observar la creación de los gradientes. Mientras que en 1.5c se escoge la mejor ruta (desde A hacia E) y se la refuerza para evitar una innecesaria nueva inundación lo cual reduce el costo de comunicación y ahorra los recursos energéticos de la red. La finalidad principal del protocolo es buscar un mejor árbol de agrupación para obtener la información desde el nodo origen hacia el sumidero [17].

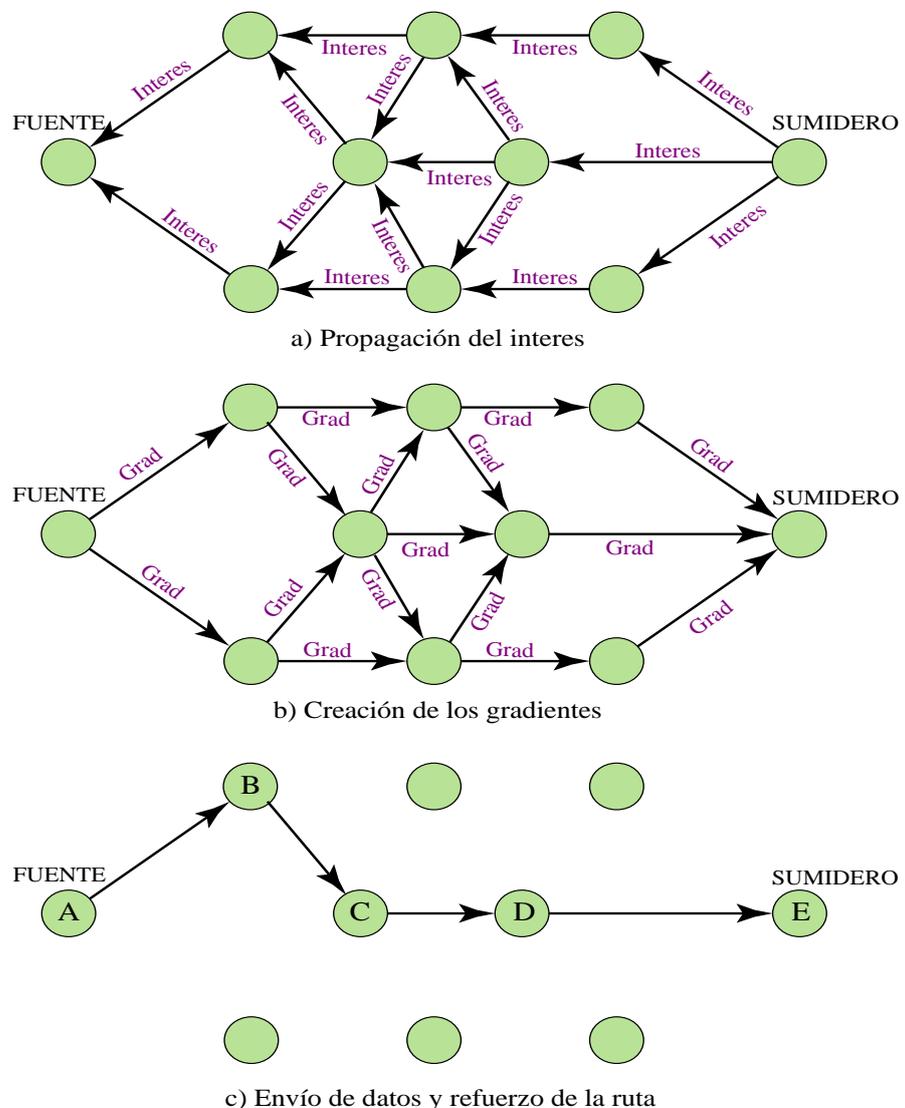


Figura 1.5: Protocolo de difusión directa [17].

- **Protocolo basado en gradientes.** - La idea principal de este protocolo es llevar el conteo del número de saltos cuando el interés es propagado en toda la red de forma que cada nodo calcule un parámetro denominado como altura del nodo, definido como el mínimo número de saltos desde el origen para llegar al sumidero. La diferencia entre la altura del nodo y su vecino es considerado como gradiente en el enlace. Los paquetes serán enviados por la trayectoria donde se encuentre el gradiente más grande. GBR es una arquitectura mejorada de la difusión directa la cual aumenta un 90 % el tiempo de vida de la red [16][17].

1.4.2. Protocolos jerárquicos

Los protocolos jerárquicos están diseñados para mantener de forma eficiente el consumo de energía de redes que son de gran tamaño. La organización de la red se la realiza mediante la agrupación de nodos dentro de algunos clústeres [17]. Los clústeres están compuestos por dos tipos de nodos: un nodo de mayor energía y los nodos de menor energía. Los nodos de mayor energía también conocidos como jefes de grupo (CH), serán los encargados de procesar y enviar la información. Además, estos pueden agregar o reducir datos con el fin de ahorrar energía. Los de bajo consumo de energía se encargarán de realizar las tareas de medición en su respectiva área de trabajo. Los nodos de cabecera de todos los clústeres de la red crean una comunicación inter-clúster mientras que la comunicación de estos con los de bajo consumo del clúster que lideran se denomina intra-clúster [16][18].

- **Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH).** - Este es uno de los primeros protocolos jerárquicos que fueron desarrollados para las WSN. La necesidad de implementar un protocolo de este tipo se debe al problema que se presenta cuando a un nodo de la red se le agota la batería dejando de ser útil. La organización en el protocolo se lleva a cabo cuando algunos nodos se agrupan dentro de un clúster y uno de ellos actúa como CH. La red esta subdividida en varios clústeres cada uno con un CH respectivamente, esto no solo para reducir el envío de datos sino, también para hacer el enrutamiento y la difusión de datos más robusta y escalable [15]. En la figura 1.6 se puede observar el principio descrito anteriormente, en donde tenemos que los nodos

A, B y C actúan como CH de cada clúster. El protocolo también utiliza una rotación aleatoria de los CH's con el fin de distribuir la carga energética entre todos los nodos de la red, de esta forma no se agota la energía de uno solo. Los nodos de sensores se eligen a sí mismos como CHs en un momento dado con una función de probabilidad en cierto intervalo de tiempo. Cada uno de los CHs no solo tiene la responsabilidad de recoger los datos del clúster que lideran sino que también pueden agregar o eliminar datos con el fin de reducir la información que será enviada al nodo sumidero. Los CH de la red utilizan una comunicación directa para enviar los datos al nodo sumidero [19][20].

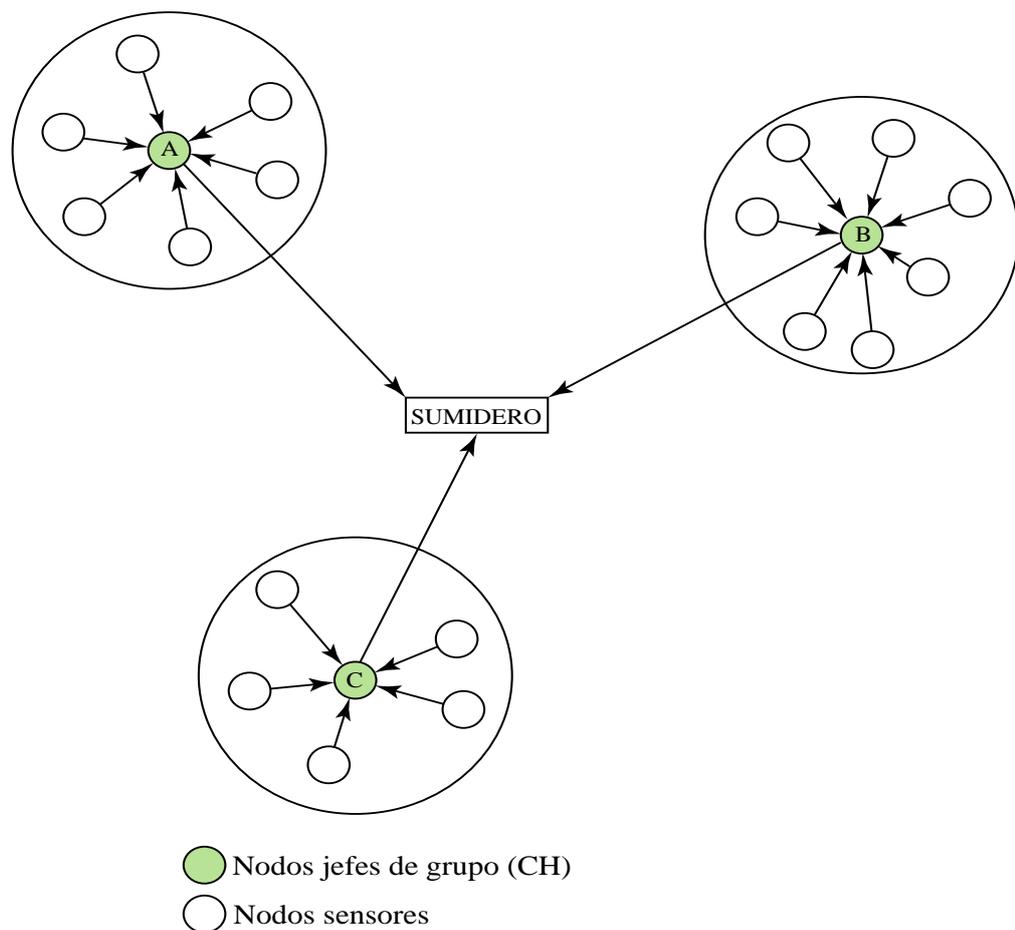


Figura 1.6: Estructura de un protocolo LEACH [20].

- **Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS).** - Es un protocolo basado en el uso de cadenas óptimas cercanas. Es decir, se forma una cadena de todos los nodos sensores desde el origen hacia el nodo sumidero, en donde cada nodo transmite y recibe la información de su vecino más cercano. Cada nodo de la red se turna en un instante de tiempo para

transmitir hacia el nodo sumidero. En la figura 1.7 observamos que el nodo A está transmitiendo la información hacia el sumidero en un instante de tiempo. Cuando todos los nodos vistos en la figura 1.7 se hayan comunicado con el sumidero se inicia una nueva ronda para la transmisión y así sucesivamente extendiendo la vida útil de la red[15]. En comparación con LEACH este protocolo utiliza solo un nodo para transmitir la información de los datos en vez de múltiples nodos CH. Lo que se gana con este algoritmo es que en cada ronda sea posible reducir la energía requerida para transmitir la información mientras el consumo de energía se distribuye uniformemente en todos los nodos [15][17]. La conservación de energía que ofrece PEGASIS se realiza de dos maneras. La primera se caracteriza en que el número de mensajes que recibe cada nodo es máximo de dos vecinos, mucho menor que la obtenida en LEACH debido a los nodos que hay en cada clúster. La segunda está en relación a la distancia en la que los datos se transmiten a un vecino que es de un salto, mucho menor en comparación con la transmisión a un nodo CH en LEACH [19].

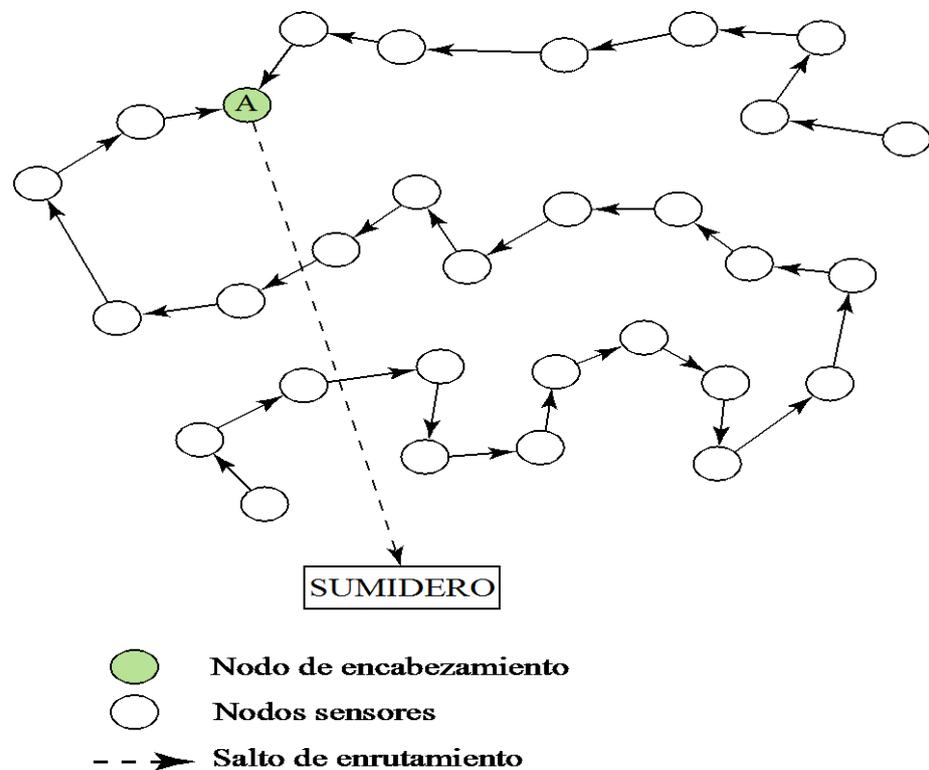


Figura 1.7: Estructura del protocolo PEGASIS [19].

- Threshold-Sensitive Energy Efficient Protocols (TEEN).** - En este protocolo los nodos se agrupan en clústeres jerárquicos de dos niveles. Al igual que LEACH, cada clúster, ya sea de primer o segundo nivel, tiene un CH. La información del CH del primer nivel pasa a uno de segundo nivel, si la distancia hacia el sumidero es bastante amplia [15][16]. Esto permite que el nodo CH de segundo nivel pueda transmitir la información total hacia el nodo sumidero. En la figura 1.8 podemos observar como los nodos A, B, C y D (jefes de grupo) se conectan al segundo nivel jerárquico a los nodos E y F, permitiendo de esta forma que todos los nodos estén recibiendo los datos. La característica que diferencia ese protocolo de los que hemos analizado hasta el momento es el uso de umbrales fuertes y suaves [15][16]. El primero define cuando es permitido que un nodo individual puede enviar sus atributos detectados (e.g. temperatura, ruido, corriente, etc) a su respectivo CH. Mientras que el segundo es una pequeña modificación al valor del atributo detectado que acciona al nodo. Cuando sucede la modificación los nodos alternan su respectivo transmisor, de esta forma, se transmite la información y se distribuye el consumo energético a todos los nodos de la zona [17][20].

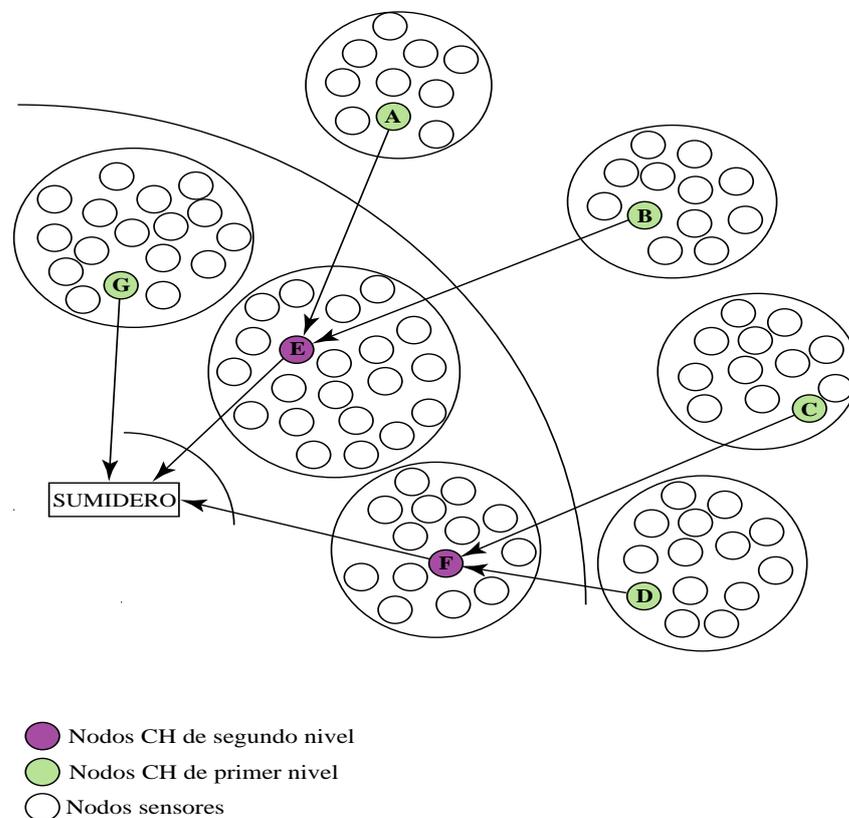


Figura 1.8: Estructura del protocolo TEEN [16].

1.4.3. Protocolos basados en la localización

Se basan en conocer la localización exacta de los nodos de la red para enrutar los paquetes. La localización de estos se puede conseguir sin necesidad de utilizar una alta capacidad energética. Esto se logra con la incorporación de receptores GPS, que mediante triangulación, determinan la posición cada nodo en la red [18][21]. La distancia que existe entre nodos se puede estimar gracias a la intensidad de la señal de cada mensaje recibido. Para poder ahorrar más energía estos protocolos siguen que los nodos deben estar en reposo si no están realizando ninguna actividad de envío de datos en la red. Mientras más nodos se encuentren en reposo dentro de la red se puede obtener un ahorro de energía considerable [17].

- **Geographic Adaptive Fidelity (GAF).**- Es un algoritmo basado en reconocer la ubicación de los nodos para el ahorro del consumo de energía. El área de la red está formada por una cuadrícula virtual compuesta por zonas fijas. Los nodos en esta arquitectura colaboran entre sí para desempeñar diferentes funciones. Por ejemplo, un nodo de la red será elegido para permanecer activo durante un periodo de tiempo establecido mientras que el resto de nodos deberán encontrarse en reposo. El nodo que se mantiene activo está encargado de supervisar y enviar los datos hacia el nodo sumidero en representación del resto de nodos inactivos. De esta forma, se consigue una alta conservación de energía. La localización GPS en cada nodo indica que puntos de la red virtual se encuentran asociados [17]. La ventaja de usar puntos asociados es que los nodos que se encuentran dentro del mismo sector de la red se consideran equivalentes en términos de costos para el enrutamiento de paquetes. Los nodos dentro de esta red pueden obtener tres estados distintos. El primero es el estado de descubrimiento que es utilizado para determinar cuántos vecinos se encuentran dentro de la red. El segundo es el estado activo en el cual se realiza la actividad de enrutamiento con el nodo sumidero. Y por último tenemos el estado de inactividad o de reposo, que es cuando el nodo se encuentra apagado [17][21].
- **Geographic and Energy Aware Routing (GEAR).** - Es un protocolo de bajo consumo energético que utiliza una selección heurística de la información geográfica de los vecinos para enrutar los paquetes hacia la región de destino

(sumidero). Para que un nodo proporcione su ubicación debe disponer o estar equipado con un hardware de localización (e.g un GPS) que pueda ser capaz de especificar la ubicación de este en cualquier momento. En este protocolo, cada nodo tiene la información sobre su capacidad energética y la de sus vecinos [15]. De cierta manera, es similar al protocolo de difusión directa, considerando que el mensaje de interés solo es enviado hacia una región específica y no a toda la red. En figura 1.9 podemos observar como el nodo de origen el cual está mandando el mensaje de interés a las cuatro regiones hasta llegar a los sumideros de cada región gracias a sus vecinos. Esto se traduce en conservación de energía mucho más alta que en la difusión directa. Cada nodo en GEAR mantiene un costo estimado y uno de aprendizaje hasta alcanzar el destino a través de sus vecinos [15][16]. El primero es una combinación de la energía residual y de la distancia hacia el destino. El segundo es un ajuste del primero que explica el enrutamiento cuando existen agujeros en la red. Los agujeros de la red se producen cuando un nodo no tiene un vecino cercano para llegar hacia el destino [15]-[17].

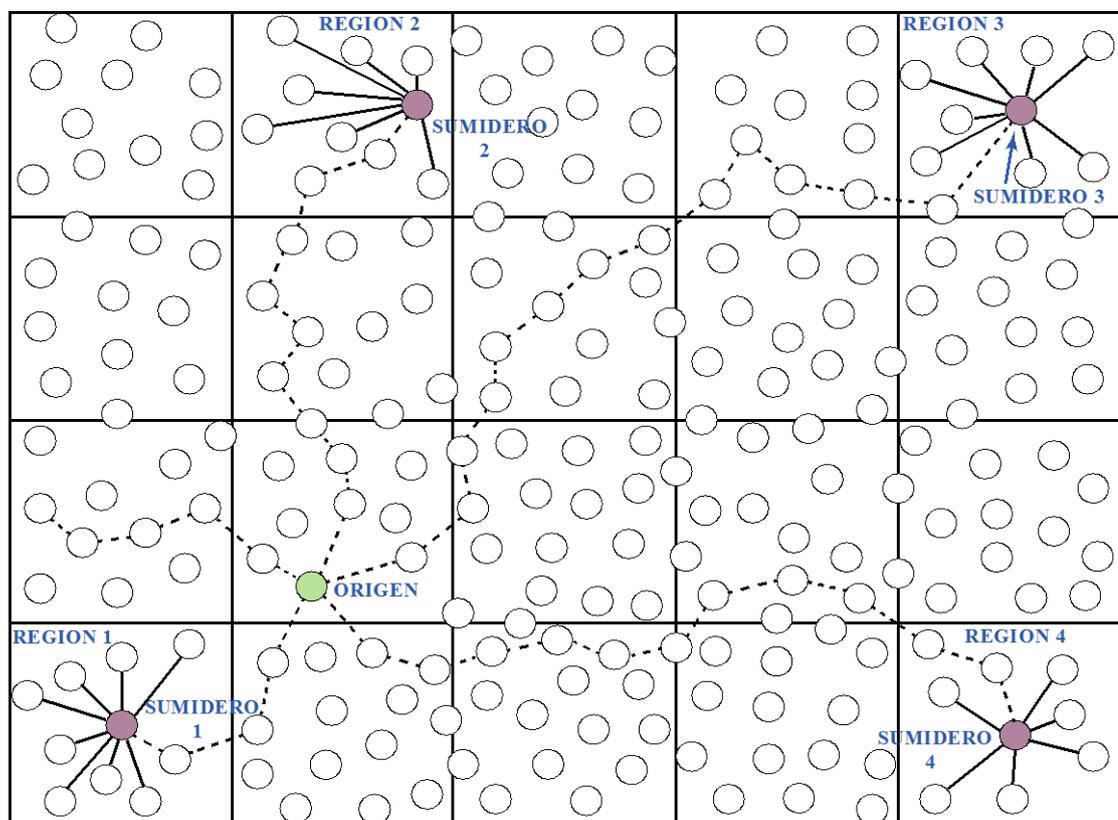


Figura 1.9: Estructura del protocolo GEAR [16].

- **Geographic Random Forwarding (GeRaF).** – Es un protocolo de enrutamiento geográfico que utiliza un nodo para la retransmisión de datos. Este nodo es seleccionado al azar de la región más cercana al sumidero y de esta forma poder encaminar los datos. GeRaF supone que todos los sensores conocen su ubicación física y la de su nodo sumidero. Además de integrar un algoritmo de enrutamiento geográfico, este cuenta con un algoritmo de programación de activado-desactivado [15][16]. Cuando un sensor origen tiene datos para enviar, primero se asegura que el canal se encuentre libre antes de enviar hacia el sumidero con el fin de evitar colisiones. El protocolo da inicio cuando el nodo de origen envía un mensaje RST (request-for-send) a todos los que se encuentran en la región de mayor prioridad. Las regiones están formadas por todos los nodos vecinos de los cuales el nodo origen conoce su ubicación. Si el nodo de origen no recibe un mensaje CST (clear-to-send) desde la región de mayor prioridad, este envía un RST hacia el que le sigue en prioridad [15][16]. El proceso se repite hasta que este reciba el mensaje CST, caso contrario el nodo de origen se da por vencido y se declara el paquete como no entregado. Pero si el CST es recibido en el nodo origen entonces este retransmite el paquete de datos hacia el nodo que le envió el mensaje CST. La transacción termina cuando el nodo de origen recibe la confirmación de haber entregado el paquete de datos. Cuando existe múltiples respuestas de CST de varios nodos se realiza un algoritmo de resolución de contención que permite que solo un nodo de estos escogido al azar transmita el mensaje [15][16].

1.4.4. Protocolos basados en la movilidad

Los protocolos que están basados en la movilidad suponen que uno de los nodos (origen, sumidero, intermedios) de la red cambia su posición en cierto periodo de tiempo. Los protocolos para una WSN donde los nodos son movibles presentan un gran inconveniente al hablar del consumo de energía, el cual es exageradamente alto. De esta manera, se trata de limitar las arquitecturas de los nodos movibles dentro de una red estacionaria. Este enfoque es coherente debido a que la mayoría de aplicaciones tienen arquitecturas con nodos fijos y solo esperan que exista el movimiento en un solo nodo (origen o sumidero) [22].

- **Scalable Energy-efficient Asynchronous Dissemination (SEAD).**- Es un protocolo de disseminación de datos. Busca crear una estructura de

comunicación en forma de árbol y mantenerla; una función similar a la que realizan los protocolos centrados en datos, con la variante de que el nodo sumidero en este caso se mueve todo el tiempo. En este protocolo, el nodo sumidero no forma parte del árbol de disseminación de datos, pero puede relacionarse con aquellos nodos que sí y que se encuentren más cercanos a él, convirtiéndolos en nodos de acceso. Este proceso se realiza con el fin de recolectar todos los datos de la red [15]. SEAD es un protocolo flexible debido a que el nodo sumidero en movimiento puede cambiar su nodo de acceso cada vez que se alcance el umbral de distancia permitido. En la red pueden existir varios árboles de disseminación que dependerán de cuantos nodos de origen existan. SEAD intenta obtener las compensaciones concernientes a la latencia de datos y a la energía necesaria que permitan reconfigurar el árbol de disseminación de forma que los nodos de acceso se encuentren más cerca de la posición actual del sumidero. En este protocolo es posible reducir el tráfico limitado de la red gracias a la posibilidad de enviar los datos a múltiples nodos sumidero [15][16][23].

- **Movilidad común y enrutamiento.** – En este protocolo los nodos que se encuentran más cercanos al nodo sumidero son quienes agotan su energía más rápidamente. Esto se debe a que los nodos que se encuentran a mayor distancia enrutan sus datos a través de los que se encuentran en una posición más cercana al sumidero. La vida de la red puede prolongarse cuando el nodo sumidero cambia constantemente de posición lo que obliga a la red a rotar la conexión del sumidero con los nodos cercanos. De esta forma se el consumo de energía se divide en partes iguales a todos los nodos de la red. Es posible reducir la carga promedio del enrutamiento de datos cuando la trayectoria de un sumidero móvil corresponde a un círculo concéntrico o a un anillo. De esta forma el consumo de energía sería equitativo para los nodos cercanos a esta región circular, que es otro mecanismo para prologar el tiempo de vida de la red [15][16].
- **Data MULES Based Protocol.-** Este protocolo tiene una arquitectura de tres niveles y propone el uso de nodos móviles especiales llamados MULEs (Mobile Ubiquitous LAN Extensions). Como se puede observar en la figura

1.10 la capa inferior es donde se encuentran los nodos inalámbricos estáticos que se encargan del sensado del entorno. En la capa superior se encuentran los dispositivos que están conectados a una WAN o Access point, los cuales se encargaran de realizar el análisis correspondiente de los datos recogidos. Mientras que la capa intermedia consta de nodos especiales (MULEs) que se mueven en toda el área de la red y van recogiendo los datos de los nodos que se encuentran próximos a ellos [23]. El ahorro de energía es considerable debido a que los sensores se conectan a las MULEs en rangos de corto alcance. De esta forma, el agotamiento de la energía se produce lentamente y de manera uniforme. No existe sobrecarga de enrutamiento que limitaría el tiempo de vida de la red debido a que la comunicación es directa entre los sensores de origen y las MULEs. La arquitectura produce una alta latencia de datos porque los nodos sumidero deben esperar que los nodos de origen descarguen primero los datos hacia las MULEs. Después deben esperar otra instancia de tiempo hasta que se puedan comunicar con dichas MULEs para la trasferencia de datos [16][23].

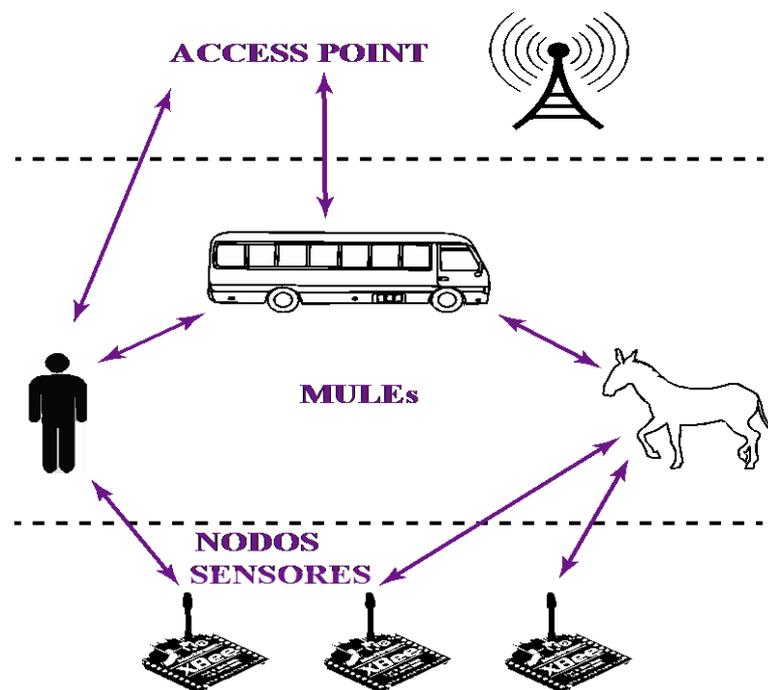


Figura 1.10. *Arquitectura de tres niveles de los MULEs [16].*

1.4.5. *Protocolos basados en QoS*

Los factores de calidad de servicio son esenciales a la hora de montar un sistema de sensores, para garantizar la calidad, fiabilidad y robustez en lo que a fallos se refiere. La QoS (Calidad de Servicio) estudia el mejoramiento de los parámetros mencionados anteriormente, a continuación, se muestran algunas arquitecturas que utilizan este protocolo para su desarrollo:

- **SAR.** - La asignación secuencial de ruta (SAR), selecciona una ruta basándose en los recursos energéticos y la calidad de servicio. A partir de esto, da un nivel de prioridad del paquete. Las rutas o árbol de trayectoria múltiple se crean evitando los nodos con baja energía o baja calidad de servicio (QoS) hacia a fuera, desde el nodo de origen. Estas múltiples trayectorias están dispuestas en una tabla creada por la EAR (Enrutamiento Consiente de Ruta), la misma que le da sobrecarga cuando se actualiza o se mantiene. El algoritmo EAR soporta la interconexión mutua entre dispositivos móviles y utiliza un sistema de mensajes de invitación para comunicarse con los nodos estacionarios vecinos. Los objetivos principales en la creación de una ruta para el algoritmo SAR son, estimar los recursos energéticos a través del número de paquetes que el nodo puede enviar, la calidad de servicio generada QoS y estimar el tipo de tráfico a través de un mecanismo de prioridad. A partir de esto también se genera la ruta de regreso hacia el nodo origen. Tanto las trayectorias múltiples como la comunicación entre vecinos que permiten una restauración localizada por los mensajes enviados constantemente hacia los vecinos, brindan mayor fiabilidad a este tipo de algoritmo [15][16][21].
- **MMSPEED.** - En el protocolo de enrutamiento multi-trayecto y multi-velocidad (MMSPEED), al igual que SAR también utiliza trayectorias múltiples para solventar problemas de fiabilidad. Aquellas trayectorias múltiples dependen del grado de fiabilidad requerido para el flujo de paquetes o flujo de tráfico, mientras que a través de un sistema dinámico que garantiza la entrega de paquetes se da más exactitud al proceso. A través de la estimación actual de la velocidad de un paquete necesaria para la entrega del mismo, los nodos intermedios tienen la capacidad de aumentar la velocidad de transmisión del paquete para que cumpla con mayor exactitud su tiempo de entrega.

Además de esto MMSPEED establece un protocolo MAC que prioriza la velocidad asignada en capa MAC, resolviendo problemas de tráfico en tiempo real [16].

- **Enrutamiento Consiente de Energía QoS.** - Esta arquitectura de enrutamiento consiste básicamente en un nodo de control y un grupo sensores, agrupados de tal manera que los nodos de control establecen comunicación a corta distancia, sondeando el objetivo en un determinado radio. El nodo central gestiona a los sensores del clúster, tomando en cuenta su rango de comunicación, la cantidad, el tipo y su ubicación dentro del área de red [24]. Esta arquitectura es de bajo coste, además de proporcionar enrutamiento para aplicaciones en tiempo real, eficiencia energética y QoS en el enrutamiento de video e imágenes [16].

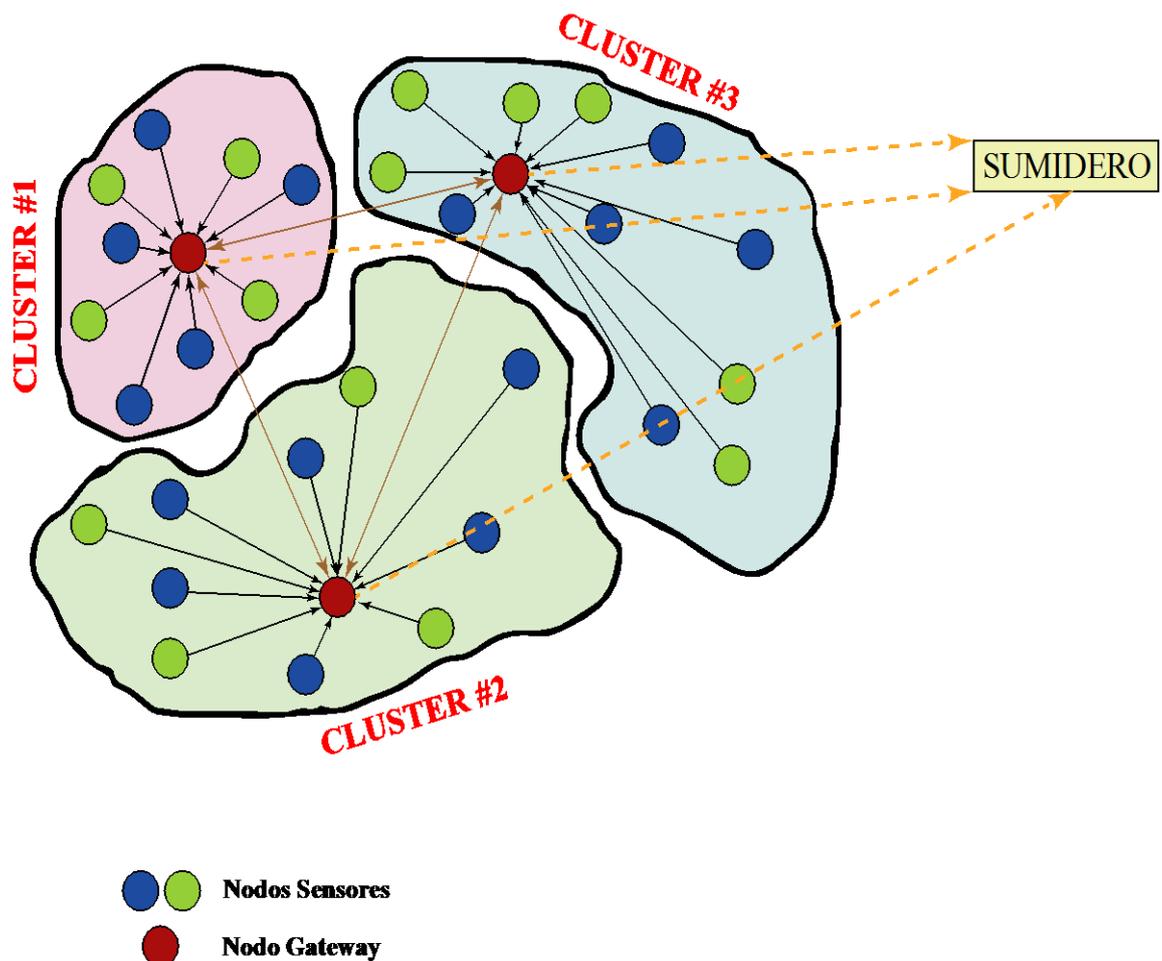


Figura 1.11. Enrutamiento Consiente de Energía QoS [16].

1.4.6. Protocolos basados en el flujo de la red

Este tipo de arquitecturas se desarrollan esencialmente con la finalidad de incrementar la vida útil de la red, su rendimiento y su coste a través del trato de los datos que se manejan dentro de la red de sensores. Esta optimización se realiza a través de los enlaces entre nodos, en donde se definen ciertos parámetros de coste, capacidad de transferencia de datos y retardos en la transferencia de datos necesario para la comunicación entre los nodos [16][26]. Resumiendo, la arquitectura encuentra un camino óptimo para orientar el mensaje regido por mínimos costos, mejor rendimiento de la red (manejo de datos y mejor enrutamiento) y máximo tiempo de vida de la misma, entre el nodo fuente y el nodo destino.

1.4.7. Protocolos basados en Multi-trayecto

La arquitectura multi-trayecto enlaza al nodo fuente con el nodo destino a través de múltiples rutas, repartiendo energía en estas múltiples trayectorias y por consiguiente brindándole una mayor eficiencia de energía. Está enfocada a la distribución de carga útil de datos que distribuye en las trayectorias o rutas, dando soporte para aplicaciones en tiempo real [15][16].

Dentro de esta arquitectura se emplean otros protocolos que ayudan a encontrar un mejor camino de enrutamiento o caminos alternativos, tomando en cuenta los nodos vecinos. Otros calculan primero una ruta principal de la que se parte para el cálculo de las demás hacia los vecinos o por desbordamientos de las trayectorias, en donde después de conocer en donde se genera este desbordamiento se generan las otras trayectorias [15][16][27]. En todos estos tipos de trayectorias está siempre presente la latencia, la que es alta para caminos poco deseables o alternativos y baja para los caminos principales o más cortos.

SEEM (Secure and energy-efficient multipath) [25] es una arquitectura que emplea el multi-trayecto, teniendo como resultado gran eficiencia energética y seguridad. Las ventajas más puntuales son la seguridad contra posibles ataques a la red, reducción de tiempo en la transferencia de datos, mejoramiento de la vida útil de la red y reducción de carga en los nodos, todo esto gracias a la aplicación de trayectorias múltiples.

1.4.8. Protocolos basados en heterogeneidad

Se denomina una WSN heterogénea cuando más de un tipo de nodo integra la red. Las razones de incorporar una red heterogénea surgen de algunas necesidades que aún en las redes homogéneas (red con un solo tipo de nodo) no se pueden suplir por completo. El mejoramiento de la escalabilidad en WSN, afrontar el problema del agotamiento de energía no uniforme y la reducción de los requisitos energéticos sin sacrificar el rendimiento de la red son algunos de los problemas que se buscan solucionar con la heterogeneidad de la red [16][28]. Para resolver estas problemáticas, hay tres tipos de recursos de heterogeneidad que se les puede asignar a los nodos. La primera es la heterogeneidad computacional, esto quiere decir que el nodo heterogéneo consta de un microprocesador y una memoria de mejor rendimiento que un nodo normal. Con estas mejores características el nodo puede realizar procesos computacionales complejos y un almacenamiento a largo plazo. El segundo es la heterogeneidad en el enlace, lo cual significa que el nodo tiene un gran ancho de banda y una red con el transceiver de mayor distancia que un nodo normal. El último es la heterogeneidad energética, que significa que el nodo se alimenta de la línea de energía directamente o simplemente que la batería con la que trabaja puede ser reemplazable. La colocación de uno de estos nodos heterogéneos dentro de la red puede traer algunos beneficios a la red. Dentro de estos beneficios se encuentran el prolongamiento de vida de la red, La mejora de la fiabilidad de la transmisión de datos y la disminución de la latencia en el transporte de datos [29].

1.5. Aplicaciones de las WSN

En una red de sensores las aplicaciones que pueden ser descritas resultan ser ilimitadas. Estas redes son capaces de monitorear una amplia variedad de ambientes. Los cuales pueden ser los siguientes [30]:

- Temperatura
- Humedad
- Movimientos vehiculares
- Niveles de ruido
- las características de un objeto como velocidad, dirección y tamaño

Las aplicaciones antes mencionadas son una pequeña muestra de lo que una WSN puede ofrecer. La elección de la aplicación que se le va dar a la red permite la elección

de la tecnología inalámbrica que será utilizada por los sensores. Las aplicaciones en WSN que son ya conocidas se pueden clasificar en: militares, monitoreo ambiental, salud, domótica y otras aplicaciones comerciales [31][32].

1.5.1. Aplicaciones militares

Se puede decir que las WSN nacieron de las necesidades militares y de la defensa aérea. Las principales áreas de interés tienen relación con recolectar la mayor información que se pueda del enemigo, tener vigilado el campo de batalla en alerta de los intrusos, monitoreo de las municiones y equipos, evaluación de los daños causados en combate y la detección de armas de destrucción masiva. Además, el despliegue de los nodos en una red no afecta la operación militar si algunos de estos son destruidos por las acciones hostiles. Esto se debe a que los nodos implementados son de bajo costo y considerados desechables en comparación con la instalación de sensores tradicionales [31][32].

1.5.2. Aplicaciones de monitoreo ambiental

Los profesionales enfocados en las ciencias naturales buscan medir siempre de mejor manera el impacto que causan los seres humanos tanto a las plantas como a los animales. Algunas de las acciones humanas pueden causar el cambio de hábitat y por ende una modificación al medio ambiente. Es por esta razón que algunas aplicaciones dentro del monitoreo ambiental están destinadas al seguimiento de animales que pueden estar en peligro de extinción (aves, animales terrestres e insectos). No obstante, también pueden ser de gran utilidad para monitorear las condiciones ambientales óptimas en donde no se vea afectado el cultivo y el ganado. Se puede implementar también aplicaciones para el monitoreo de la contaminación que emanan algunos gases tóxicos. Siendo estas unas cuantas de las muchas aplicaciones que se les puede dar a las WSN dentro del medio ambiente [31]-[33].

1.5.3. Aplicaciones dentro de la salud

Las aplicaciones de las WSN pueden también usarse en la salud de personas enfermas. Dentro de esta tenemos el monitoreo de pacientes, administración de fármacos de acuerdo a el seguimiento del paciente, tele-vigilancia de los datos de terapias físicas y los trastornos cognitivos que conducen al Alzheimer. Los adultos mayores son los más beneficiados con estas aplicaciones, debido a que los nodos de la red pueden advertir a estas personas la hora a la que deben tomar sus medicinas, horarios

de visitas familiares entre otros. También es posible monitorear el comportamiento de los niños, como por ejemplo, el uso de sus juguetes favoritos para determinar los daños psicológicos que ellos presentan [31][32].

1.5.4. Aplicaciones en domótica

Con el avance de la tecnología los sensores pueden ser asociados a los electrodomésticos. Lo cual permite que puedan interactuar con los dispositivos externos entre sí, ya sea vía satélite o por internet. Con lo cual, se puede gestionar de los electrodomésticos de forma remota desde cualquier lugar accediendo a la red. Con la agrupación de las casas inteligentes dentro de las redes de sensores, estas pueden estar centradas bien sea en las personas o en la tecnología. Si hablamos de la primera la red debería estar dispuesta a suplir las necesidades de los usuarios finales. Mientras que el segundo hace referencia el nivel de tecnología que tendría en este caso la casa, que puede ser la compra de alimentos en caso de que este programado de esta forma o inclusive solicitudes de aseo en áreas determinadas, entre otras aplicaciones [31].

CAPÍTULO 2

2. IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO

En el presente capítulo se detallará el desarrollo del proyecto en general. Además, se explicará cada parte y etapa del proyecto hasta el diseño de la red inalámbrica. En la primera parte de este capítulo describiremos acerca de la arquitectura de los nodos inalámbricos y del coordinador. En esta parte presentaremos los diagramas correspondientes al proyecto que especifique el funcionamiento de cada uno de los elementos que lo componen. En la segunda parte se va a especificar que materiales fueron utilizados para el diseño del hardware. Junto con esto se mostrarán diagramas esquemáticos de cómo se realizaron las conexiones para el proyecto. También en esta parte se presentará una descripción rápida de cada uno de los componentes utilizados en el desarrollo del proyecto. Como última parte se va a describir el desarrollo del software. Se explicará el desarrollo de la aplicación realizada en Java dejando como parte final el costo total del proyecto.

2.1. Diagramas de funcionamiento y de bloques del proyecto

En la figura 2.1 se puede apreciar el diagrama de funcionamiento de los nodos sensores. Como elemento principal tenemos el uso de un Arduino nano, el cual tiene la función de recoger los datos medidos por los sensores de CO₂ y de sonido. El microcontrolador es el encargado de procesar los datos que luego serán enviados a través de una comunicación serial hacia los módulos Xbee. Estos módulos son los encargados de armar la red inalámbrica para la comunicación de los nodos sensores hacia el nodo sumidero o nodo coordinador. En el nodo sensor también tenemos la conexión de un reloj de tiempo real, el cual tiene como propósito proporcionarnos información del instante de tiempo en el cual fueron tomadas las mediciones de ruido y CO₂ del ambiente. Por último, el bloque de alimentación consta de un módulo que permite la conexión de una batería de polímero de litio recargable y un panel solar. Este sistema permite que el proyecto sea auto-sostenible con la capacidad de recargar la batería aprovechando los recursos de la energía solar cuando la alimentación por defecto llegue a fallar o se produzca un corte de energía.

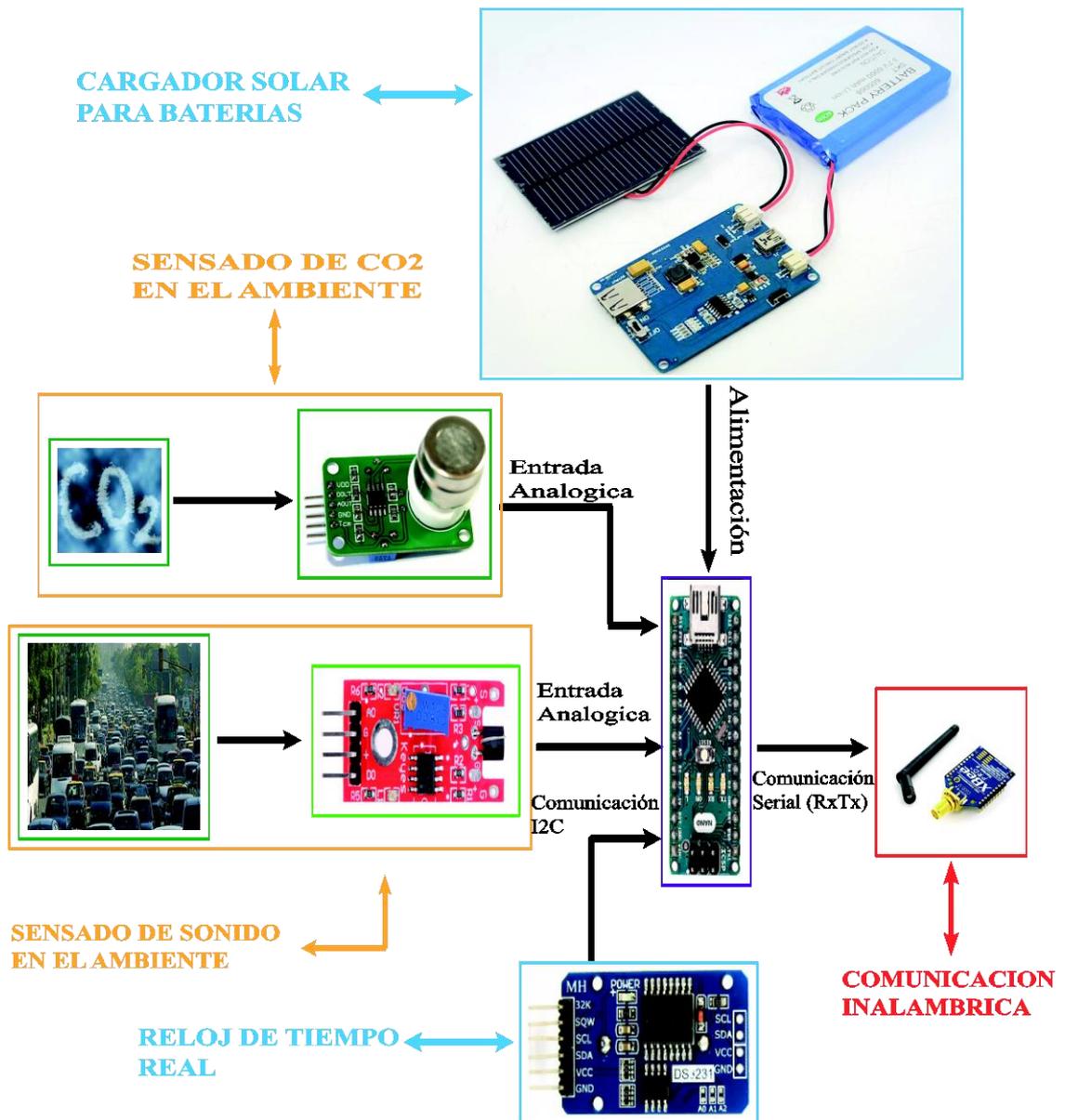


Figura 2.1. Diagrama de funcionamiento de los nodos sensores pertenecientes al sistema

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

En la figura 2.2 se muestra el diagrama de funcionamiento del nodo coordinador junto con sus partes fundamentales. El coordinador recibe los datos enviados desde los nodos sensores los cuales llegan a un módulo Arduino mega. Debido a las múltiples comunicaciones seriales utilizadas en este nodo se escogió el uso de esta placa Arduino ya que consta de cuatro puertos seriales. Este dispositivo se encuentra conectado directo a una Raspberry Pi. En esta minicomputadora se encuentra la aplicación desarrollada en Java (NetBeans). Los datos medidos de los nodos serán almacenados y mostrado mediante graficas a medida que los nodos sensores realicen el envío de forma inalámbrica. Como último punto la Raspberry pi se encontrará en una red local

la cual permita la conexión por medio de escritorio remoto. Esta opción va a permitir al usuario revisar el monitoreo de la red y observar las graficas de los datos que se ira tomando del ambiente conforme transcurra el día.

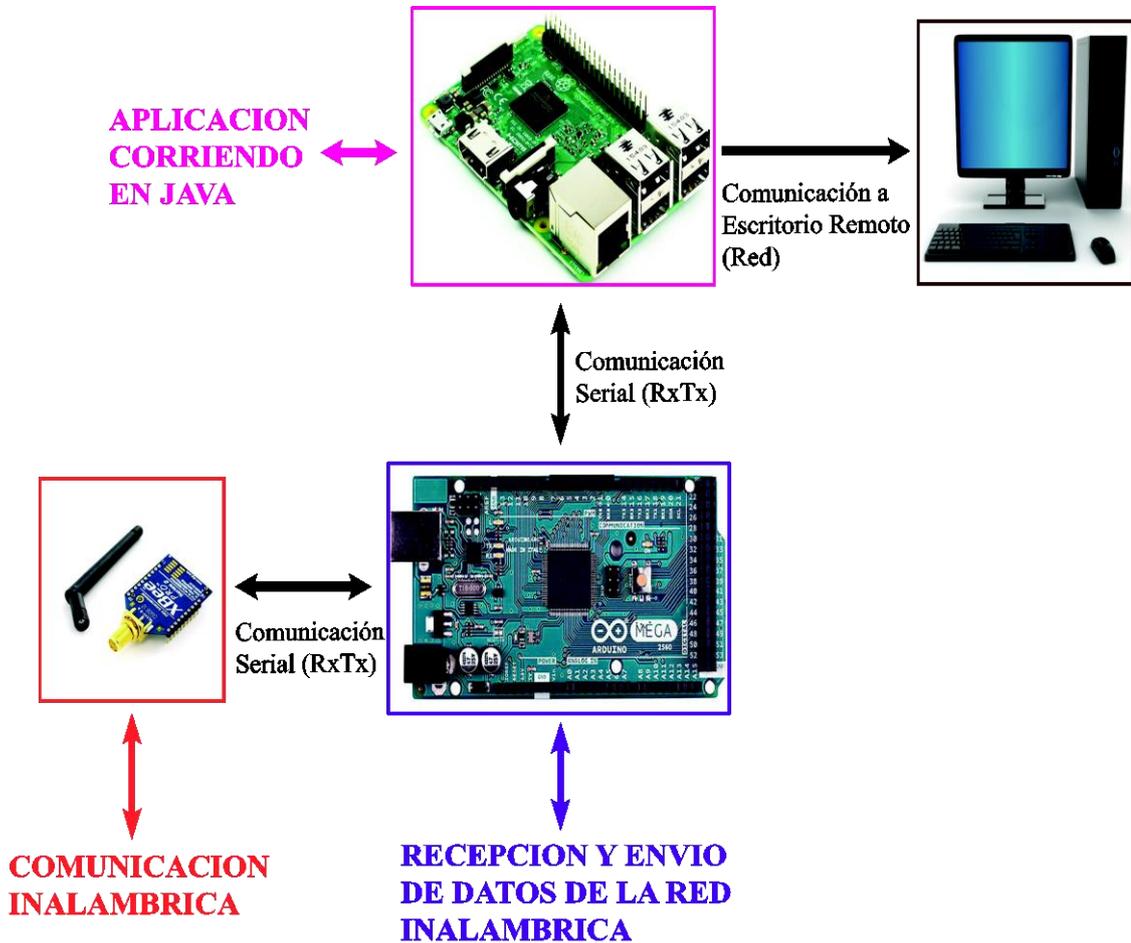


Figura 2.2. Diagrama de funcionamiento del nodo coordinador perteneciente al sistema
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

En la figura 2.3 se muestra el diagrama de bloques del proyecto en general. El sistema según el diagrama consta de dos bloques principales. El primero hace referencia al nodo sensor mientras que el segundo se refiere a la parte del nodo coordinador en donde se encuentra desarrollada nuestra aplicación en java. En esta aplicación se visualizará las medidas (sonido y CO₂) de cada uno de los nodos. Todas las funciones que cumplen cada bloque se describen en detalle en las secciones posteriores de este capítulo.

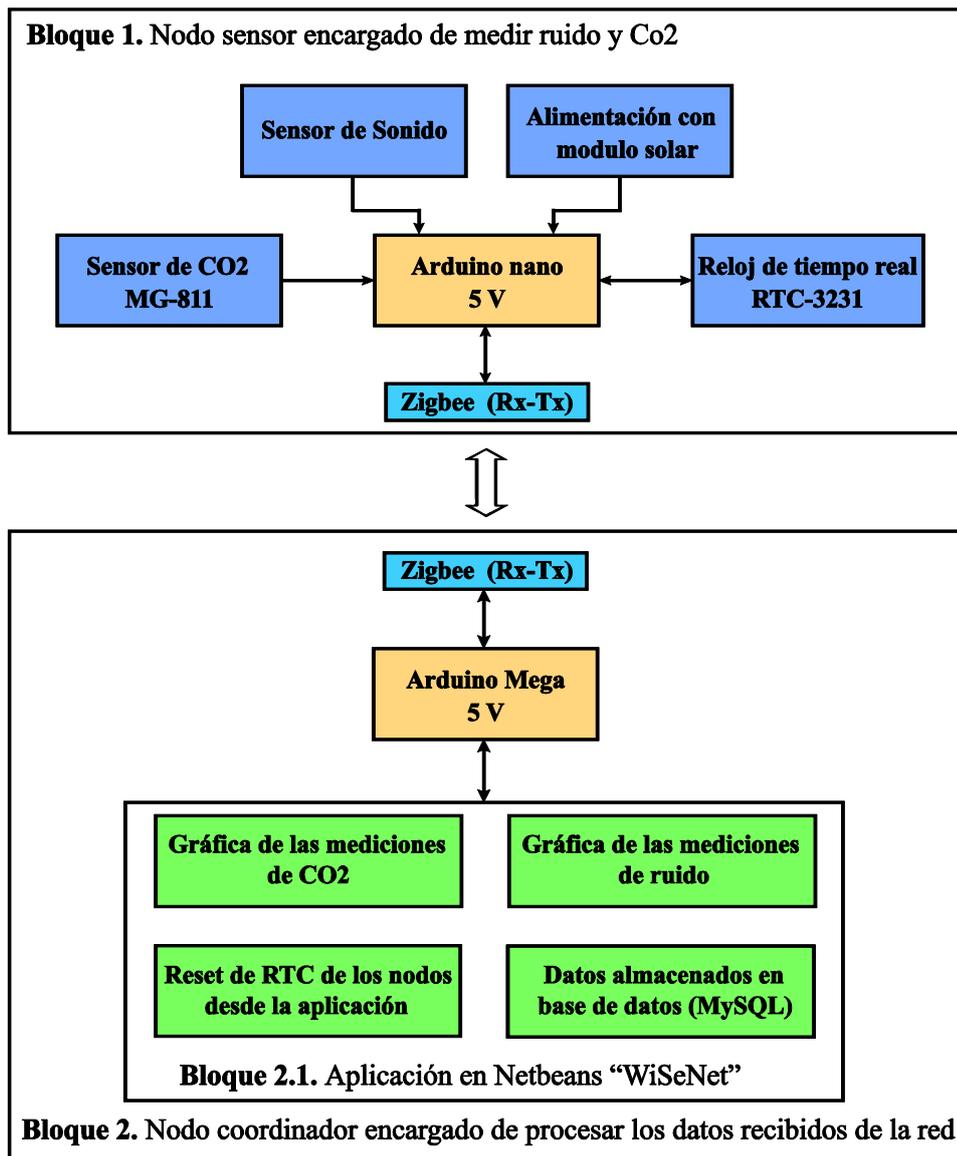


Figura 2.3. Diagrama de bloques del sistema
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

2.2. Diseño y construcción de la red de sensores inalámbricos

En esta sección se describirá más a fondo la sección y selección del hardware del proyecto. Algunas de estas partes pueden ser vistas en la figura 2.3 donde se especifica en bloques cada uno de los elementos tanto de hardware como de software del proyecto. Además, se especificará los detalles de cada componente electrónico junto con sus características más importantes.

2.2.1. Selección de los componentes para el diseño del proyecto.

La elección de los componentes electrónicos se realizó de acuerdo a los requerimientos del proyecto para alcanzar los objetivos establecidos. El diseño de la aplicación fue realizado en software libre, en este caso en el lenguaje de programación de Java (en el entorno de programación de Netbeans). La elección de los dispositivos para el hardware también se realizó teniendo en consideración que sean de uso libre sin ningún tipo de licencias. A continuación, se presentarán las principales características de cada uno de los componentes seleccionados.

- **Modulo sensor medidor de CO2 MG-811.-** Este módulo tiene incorporado un MG-811 que es altamente sensible para detectar el dióxido de carbono (CO₂). La tensión de salida del módulo disminuye a medida que aumenta la concentración de CO₂. Además, consta de un circuito amplificador para la señal de salida. Este módulo es ideal para el control de la calidad del aire y procesos de fermentación [34]. En la tabla 2.1 se muestran las especificaciones del módulo.

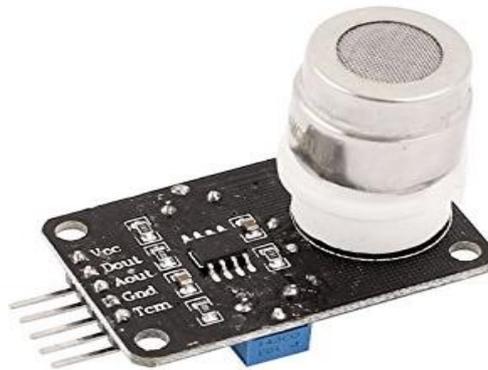


Figura 2.4. *Modulo MG-811.*
Fuente: *B. Bravo, L. Belduma.*

Tabla 2.1. *Especificaciones del sensor MG-811[34]*

Parámetros	Valores	Observaciones
Tensión de calentamiento	6.0±0.1V	AC o DC
Resistencia de calefacción	~30.0 Ω	Temperatura Ambiente
Corriente de calentamiento	~200mA	
Potencia de calentamiento	~1200mW	
Temperatura de funcionamiento	-20 – 50°C	
Temperatura de almacenamiento	-20 – 70°C	
Salida	100-600mV	400-10000ppm CO ₂

- **Módulo detector de sonido Sparkfun.** - Es una tarjeta de detección de audio muy fácil de utilizar que consta de tres salidas diferentes. La primera es una salida de detección de sonido, la segunda es una salida binaria ante la presencia de sonido y la última es una representación analógica de la amplitud. Las tres salidas son simultáneas y cada una puede ser utilizada de forma independiente [35].

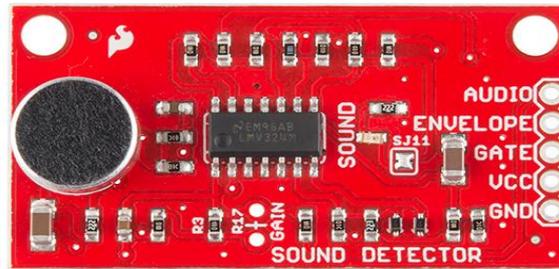


Figura 2.5. *Módulo de sonido Sparkfun [35].*

- **Módulo de alimentación solar Lipo Rider Pro.** - Este módulo es ideal para las soluciones energéticas de proyectos que estén a la intemperie. Lipo Rider Pro tiene la capacidad de trabajar con la energía del sol ya que cuenta con una etapa de alimentación por medio de paneles solares. Esta etapa también funciona como un cargador de baterías de Li-Po o Li-Ion. Estas características garantizan que el proyecto sea auto sostenible y capaz de aprovechar los recursos energéticos para mejorar la vida útil de los dispositivos alimentados [36]. En la tabla 2.2 se muestran las especificaciones del módulo.

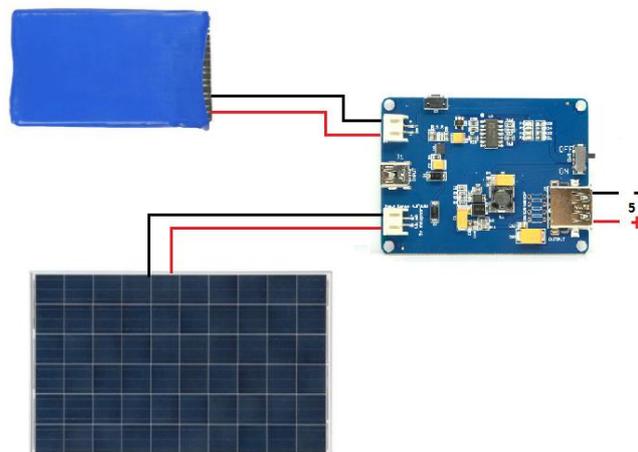


Figura 2.6. *Módulo Lipo Rider Pro*
Fuente B. Bravo, L. Belduma.

Tabla 2.2. Especificaciones del módulo Lipo Rider Pro [36].

Parámetros	Min	Normal	Max
V_{in} Solar	4.8V	5.0V	6.5V (10s)
I_{charge} ($R_{lset} = 3.9\text{ k}\Omega$)	400mA	500mA	600mA
I_{load}	0mA		1000mA
V_{batt} ($R_x = 0\Omega$)		4.2V	
V_{source} USB		5.0V	
$V_{destination}$ USB		5.0V	

- **Módulo del reloj de tiempo real DS-3231.** - Es un módulo de bajo costo y preciso debido al oscilador de cristal con el que cuenta. Además, cuenta con una entrada de pila adicional para cuando sucede una interrupción de la alimentación principal. Este reloj proporciona la información de segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año. La fecha al final del mes se ajusta automáticamente para los meses con menos de 31 días, incluyendo correcciones para el año bisiesto. El reloj funciona en el formato de 24 horas o 12 horas con un indicador de AM / PM [37].

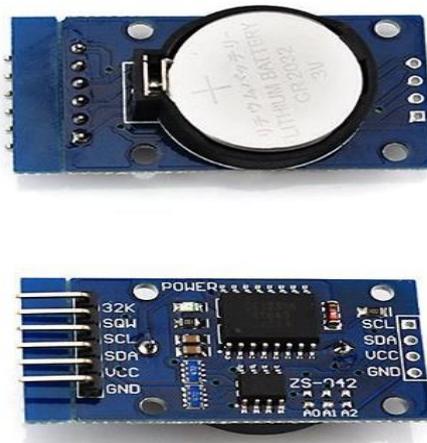


Figura 2.7. Módulo del reloj de tiempo real DS-3231 [37].

- **Placa Arduino Nano.** - Se basa en un microcontrolador ATmega328. El nano puede ser alimentado con 5V a través de una conexión USB-Mini o de forma externa a través del pin 30. El Nano tiene una serie de opciones para la comunicación con un ordenador, otro Arduino, u otras placas de

microcontroladores similares. Los ATmega328 proporcionan comunicación serial UART, I2C (TWI) y SPI

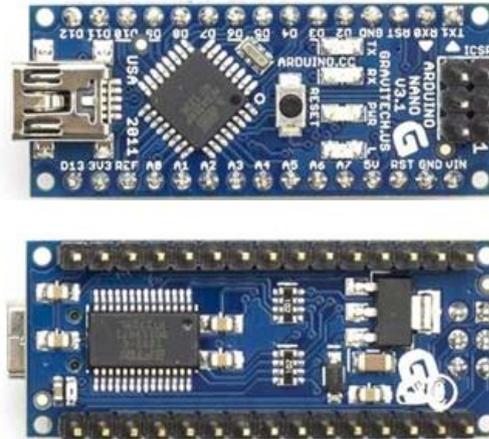


Figura 2.8. Módulo del reloj de tiempo real DS-3231 [38].

- **Módulo XBee-PRO® 900 DigiMesh.** - Este módulo fue diseñado para soportar las necesidades únicas de las redes de sensores inalámbricos que son el bajo costo y bajo consumo. Los módulos requieren una potencia mínima y proporcionan una entrega confiable de datos entre dispositivos remotos. Los módulos funcionan dentro de la banda de frecuencia ISM 900 MHz. Proporciona también una fácil construcción de redes de hasta 128 nodos. La comunicación del módulo se la realiza de forma serial. Una vez que recibe los datos seriales el modulo es capaz de convertirlos a datos de RF que pueden ser enviados a cualquier dispositivo XBee que forme parte de la red [39]. En la tabla 2.3 se muestran las especificaciones del módulo.



Figura 2.9. Módulo XBee-PRO® 900 DigiMesh [39].

Tabla 2.3. Especificaciones del módulo XBee-PRO® 900 DigiMesh [39].

Especificaciones		XBee-PRO
Desempeño		
Indoor / Rango Urbano	hasta 450 pies (140 m)	
Outdoor RF rango de línea de vista	hasta 1.8 milla (3 km) hasta 6 millas (10 km) con antena de alta ganancia	
Potencia de transmisión de salida	+17 dBm (50 mW)	
Interfaz de tasa de datos	hasta 230 kb/s seleccionable en software	
Tasa de datos RF	156.25 kb/s	
Rendimiento de datos	hasta 87000 b/s	
Sensibilidad del receptor	-100 dBm (1% tasa de error de paquete)	
Requerimientos de energía		
Tensión de alimentación	3.0 a 3.6 VDC	
Corriente transmitida	210 mA (@ 3.3 V)	
Idle / corriente recibida	80 mA (@ 3.3 V)	
Corriente en Sleep (asíncrona)	48 µA típico @ 3.3 V	
Corriente en Sleep (síncrona)	60 µA típico @ 3.3 V	
General		
Frecuencia de operación	Estándar variante: 902-928 MHz (ISM) Variante internacional: 916-928 MHz	
Dimensiones	0.960" x 1.297" (2.438 cm x 3.294 cm)	
Temperatura de operación	-40 a 85°C (industrial), 0 a 95% sin condensación	
Opciones de antena	Antena de 1/4 de onda, Conector RPSMA RF, Conector U.FI RF	
I/O Digitales	13 líneas de I/O	
ADC	Seis entradas analógicas de 10 bits	
Redes y seguridad		
Topologías de red compatibles	Mesh, Punto a punto, Punto a multipunto, peer-to-peer	
Número de canales (seleccionable por software)	Ocho patrones de salto en 12 canales (variante estándar), cuatro patrones de salto en cinco canales (variante internacional)	
Opciones de direccionamiento	PAN ID, Channel y 64-bit addresses	
Cifrado	128 bit AES	

- **Placa Raspberry pi 3 B.** - Esta placa parece idéntica a la Pi 2 B a primera vista. Tiene el mismo tamaño y comparte muchos componentes comunes en la placa. La Pi 3 aporta una mayor potencia de procesamiento y conectividad en

placa, por lo que podrá ahorrar tiempo en el desarrollo de sus aplicaciones. Perfecta para sus diseños de IoT. La Raspberry Pi es una placa de ordenador simple; se ha desarrollado para fomentar y ayudar en la enseñanza de la programación y la informática. El bajo coste y la naturaleza "plug-and-play" de la Pi ofrece como resultado una placa accesible para todos y con numerosas opciones de conectividad. La CPU de la Pi 3 es una vez y media más rápida, con 1,2 GHz. Así, la placa Pi tiene un mayor rendimiento [40].



Figura 2.10. Placa Raspberry pi 3B [40].

- **Arduino Mega.** - Es una placa electrónica basada en el ATmega1280. El ATmega1280 tiene 128 KB de memoria flash para almacenamiento de código (de los cuales se utiliza 4 KB para el gestor de arranque), 8 KB de SRAM y 4 KB de EEPROM. Cuenta con 54 pines I/O digitales (de los cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie por hardware). La tarjeta puede funcionar con un suministro externo de 6 a 20 voltios. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios. El ATmega1280 también tiene incorporado las comunicaciones con I2C (TWI) y SPI [41].

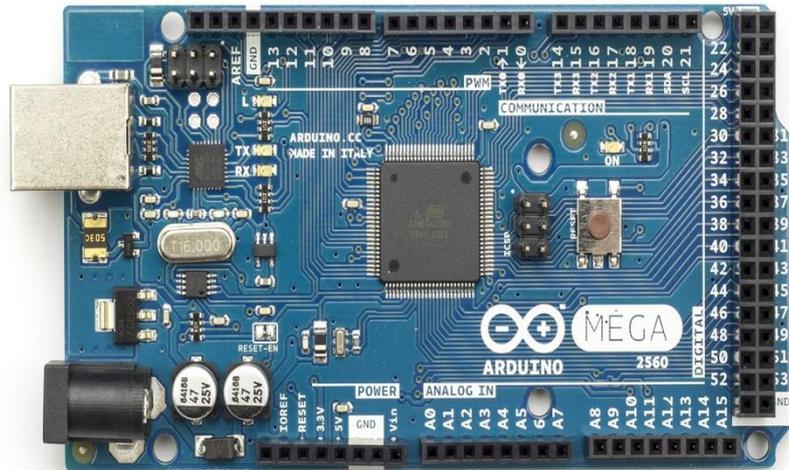


Figura 2.11. Placa Arduino Mega [41].

- **Módulo de USB a serial CH340.** - CH340 es un chip que puede realizar conversión de USB a interfaz serial. En el modo de interfaz serie, el CH340 suministra una señal de enlace MODEM común, utilizada para ampliar la interfaz serie asíncrona del ordenador o actualizar el dispositivo serie común al bus USB directamente [42].

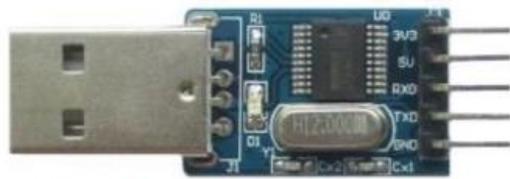


Figura 2.12. Módulo de USB a serial CH340 [42].

2.2.2. Diseño y construcción del circuito y la placa

En esta sección se detallará como fue la construcción física del proyecto. Se mostrará el esquema de conexiones y el diseño de la pista de PBC para la red inalámbrica de sensores.

- **Esquema de conexiones.** - Una vez escogidos los elementos que serán parte del hardware de nuestro proyecto (sección 2.2.1) se procede a mostrar el esquema de conexiones. Primeramente, se mostrará en la figura 2.13 el esquema de los nodos sensores y luego en la figura 2.14 se mostrará el esquema del nodo coordinador.

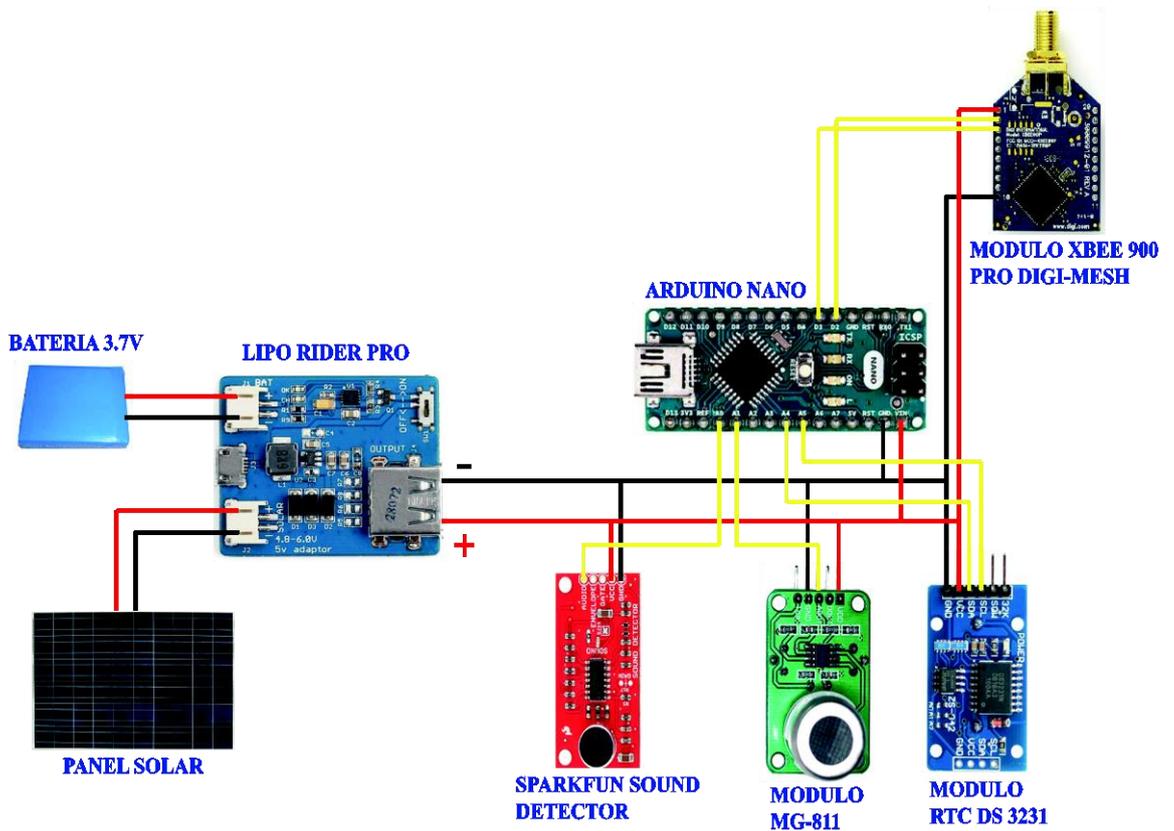


Figura 2.13. Esquema de conexión de los componentes electrónicos del nodo sensor de la red inalámbrica de sensores “WiSeNet”.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

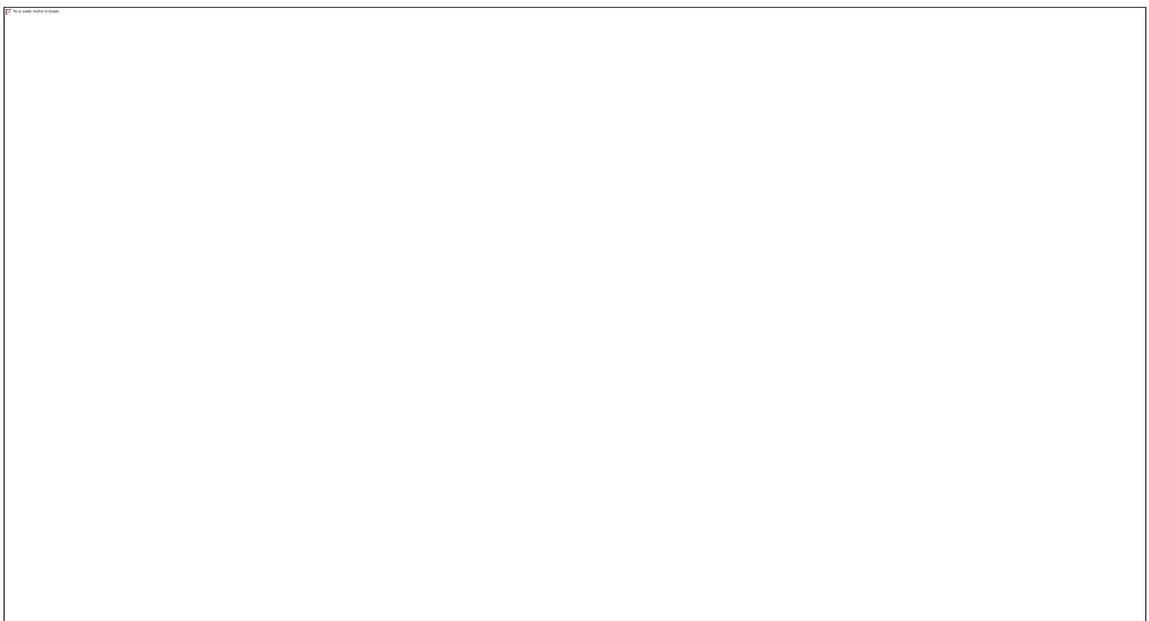


Figura 2.14. Esquema de conexión de los componentes electrónicos del nodo coordinador de la red inalámbrica de sensores “WiSeNet”.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

- **Diseño del circuito impreso en AutoCAD.** - Una vez especificadas y mostradas las conexiones que se realizarán con los diferentes dispositivos se procede a la construcción de la placa de PCB (*Print Circuit Board*). Para realizar este proceso se necesita dibujar las pistas que conecten los elementos utilizados. El diseño de las pistas se realizó mediante el uso del software AutoCAD y se puede visualizar las pistas del proyecto en la figura 2.15.

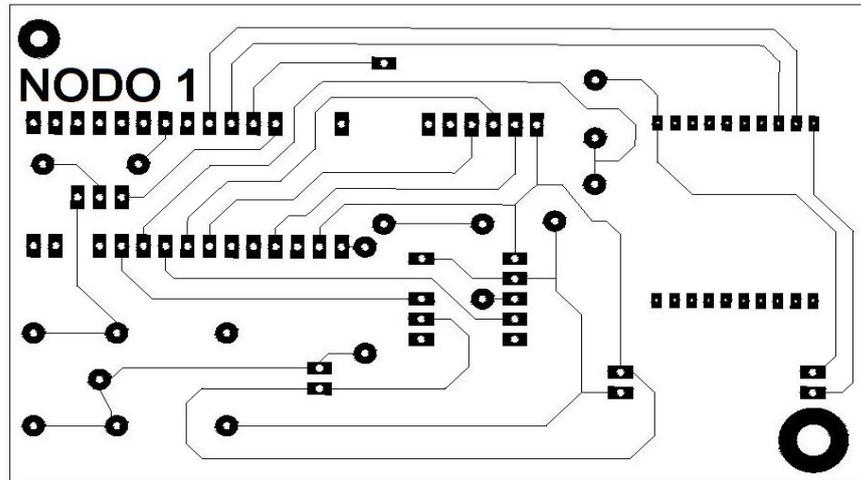


Figura 2.15. Diagrama de las pistas realizadas en AutoCAD.
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

El proceso de montaje y soldadura de los elementos se lo realizó de manera manual. El resultado final de la PCB junto con los elementos se puede observar en la figura 2.16.

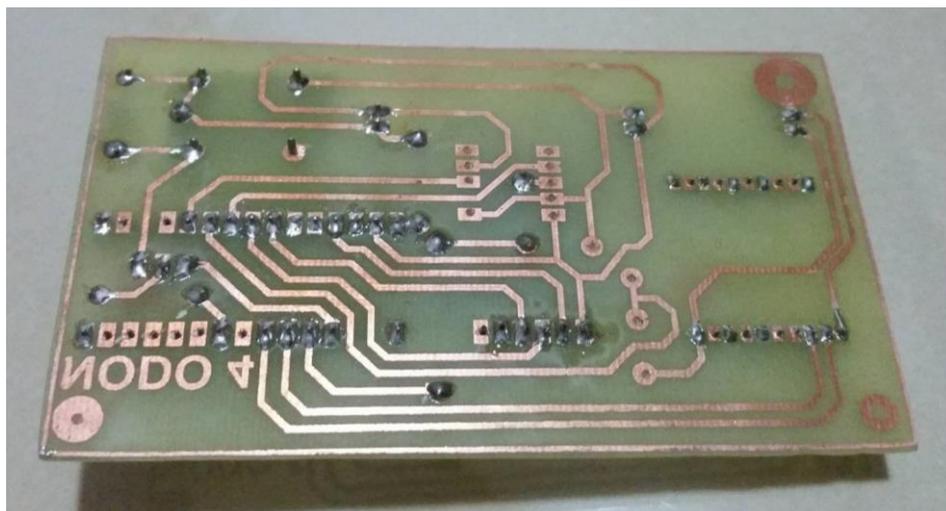


Figura 2.16. PBC del proyecto "WiSeNet".
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

2.2.3. Diseño y construcción de la carcasa del proyecto “WiSeNet”

Primeramente, debe tenerse en consideración que se realizara dos carcasas. La primera para los nodos que medirán el nivel de ruido y de CO2 en el aire y la segunda para el nodo coordinador. En esta sección se mostrará el diseño de ambas que fue realizado en el programa FreeCAD. El diseño de la caja para el nodo sensor se puede observar en la figura 2.17 y el del nodo coordinador en la figura 2.18.

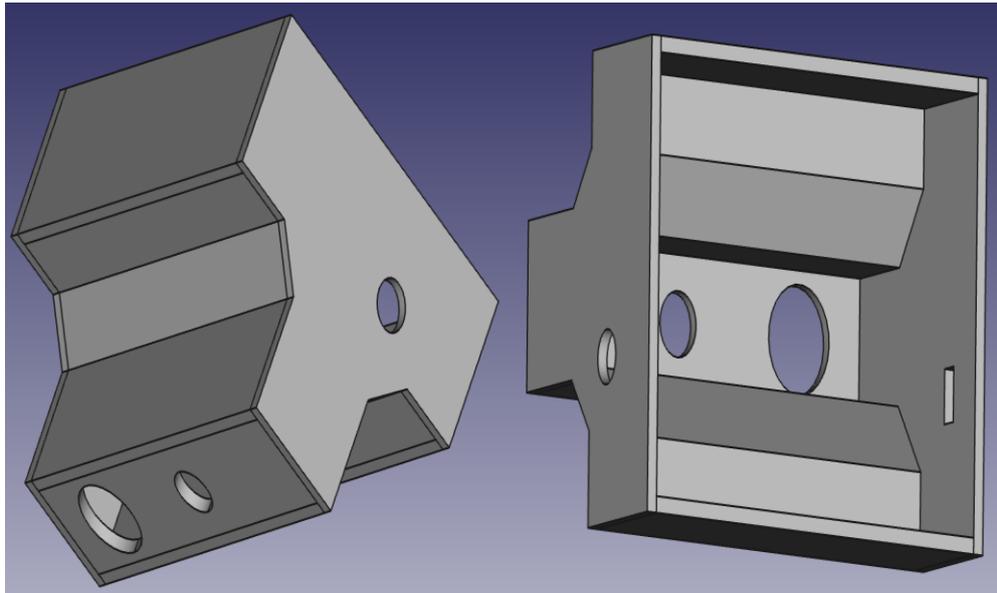


Figura 2.17. *Diseño de la carcasa en 3D para el nodo sensor.*
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

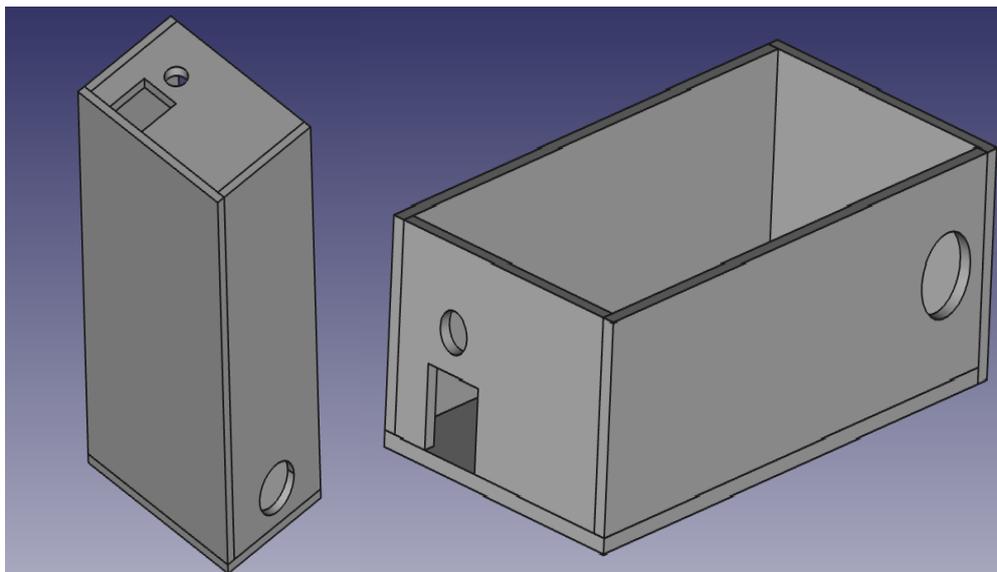


Figura 2.18. *Diseño de la carcasa en 3D para el nodo coordinador.*
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

2.2.4. Funcionamiento de la red inalámbrica de sensores "WiSeNet"

Los sensores MG-811 y Sparkfun Sound Detector son los encargados de medir las variaciones de CO₂ y de sonido en el ambiente. Además, cuenta con un reloj de tiempo real que permite saber el tiempo y fecha exacta de la medición del sensor. Todos estos datos son procesados y acomodados en el Arduino Nano, una vez que son acomodados se coloca una cabecera con el número correspondiente del nodo para facilitar el reconocimiento en el coordinador. Estos datos son enviados de manera serial al módulo Xbee del nodo sensor.

Los módulos Xbee de los nodos sensores están conectados en una red tipo estrella al Xbee del coordinador el cual recibe una por una las tramas de los datos que envían cada uno de los nodos en las diferentes zonas. El Xbee coordinador está conectado de forma serial a un Arduino Mega, el cual se encarga de recibir los datos y ordenarlos con un algoritmo para después ser enviados de manera serial a la minicomputadora Raspberry Pi 3B. En esta minicomputadora se encontrará instalada la aplicación desarrollada en java para mostrar las gráficas de los datos recogidos, cabe recalcar que las mediciones se las realizara cada diez minutos. Además, la aplicación tendrá la opción de resetear todos los relojes de los nodos para mantener la red en sincronía.

En la figura 2.19 se muestra un ejemplo de las gráficas que se obtienen después de pasar por el proceso antes mencionado, estas graficas fueron tomadas cuando se realizaron las pruebas de validez de la red.

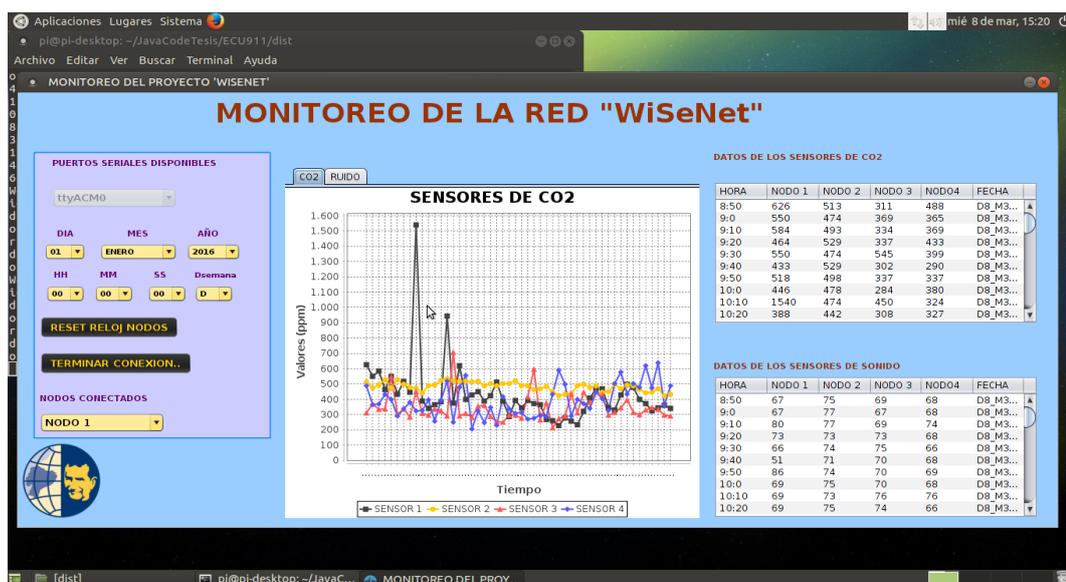


Figura 2.19. Interfaz gráfica del proyecto en pleno funcionamiento.
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

2.3. Desarrollo de la aplicación para el monitoreo de la red en NetBeans

2.3.1. Desarrollo del archivo ejecutable de la aplicación gráfica

El desarrollo de la aplicación gráfica para el manejo de los datos recibidos fue realizado en Java. Se decidió realizarlo en Java por el manejo de software libre y por el lenguaje de programación conocido por los autores y que resulta más sencillo para los programadores de aplicaciones de escritorio.

La interfaz gráfica “MONITOREO DEL PROYECTO WISENET” fue desarrollada por el IDE NetBeans 8.2. El cual nos permite crear un ejecutable del proyecto creado para compilarlo dentro del dispositivo Raspberry pi, de esta forma no se saturan los recursos del dispositivo y no corre el riesgo de colgarse o en el peor de los casos reiniciarse. Primeramente, debe realizarse un ejecutable .jar del proyecto realizado en NetBeans, este proceso se puede visualizar en la figura 2.20.

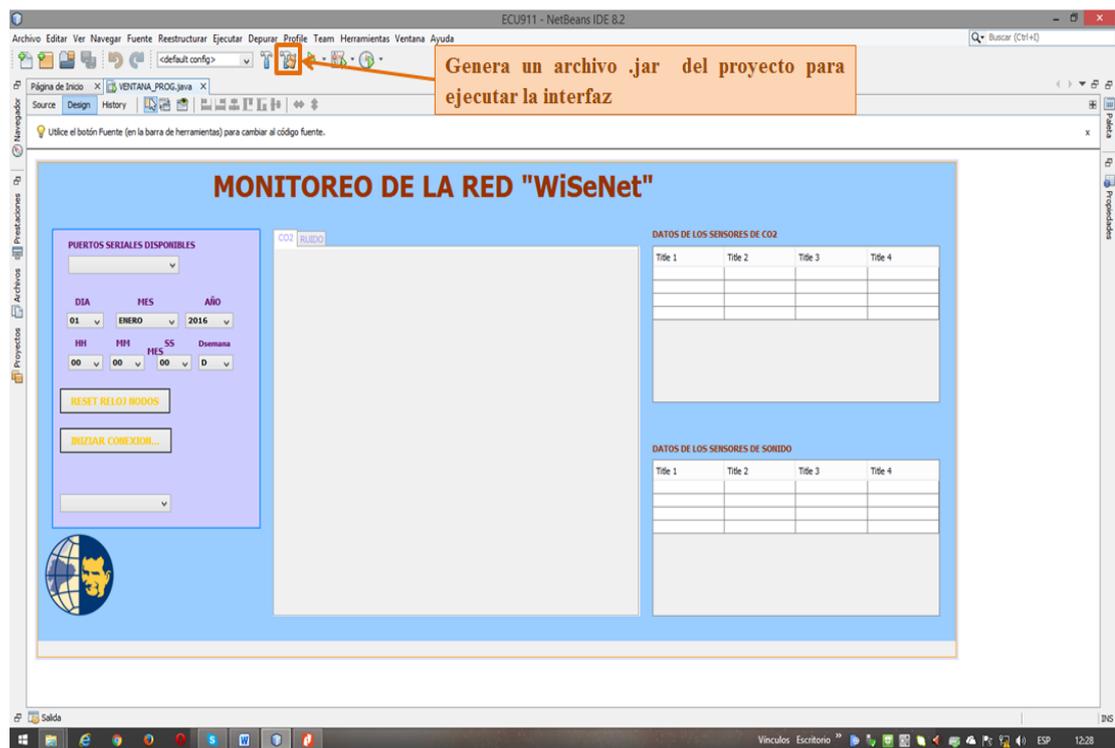


Figura 2.20. Generación del archivo ECU911.jar.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

El archivo ECU911.jar se creará dentro de la carpeta del proyecto, justamente en la subcarpeta dist. En los sistemas operativos de Windows se puede ejecutar el archivo dando doble click, mientras que en los sistemas operativos Linux se necesita realizar

la ejecución de este mediante el terminal. En la figura 2.21 se muestra la ubicación del archivo ECU911.jar del proyecto.

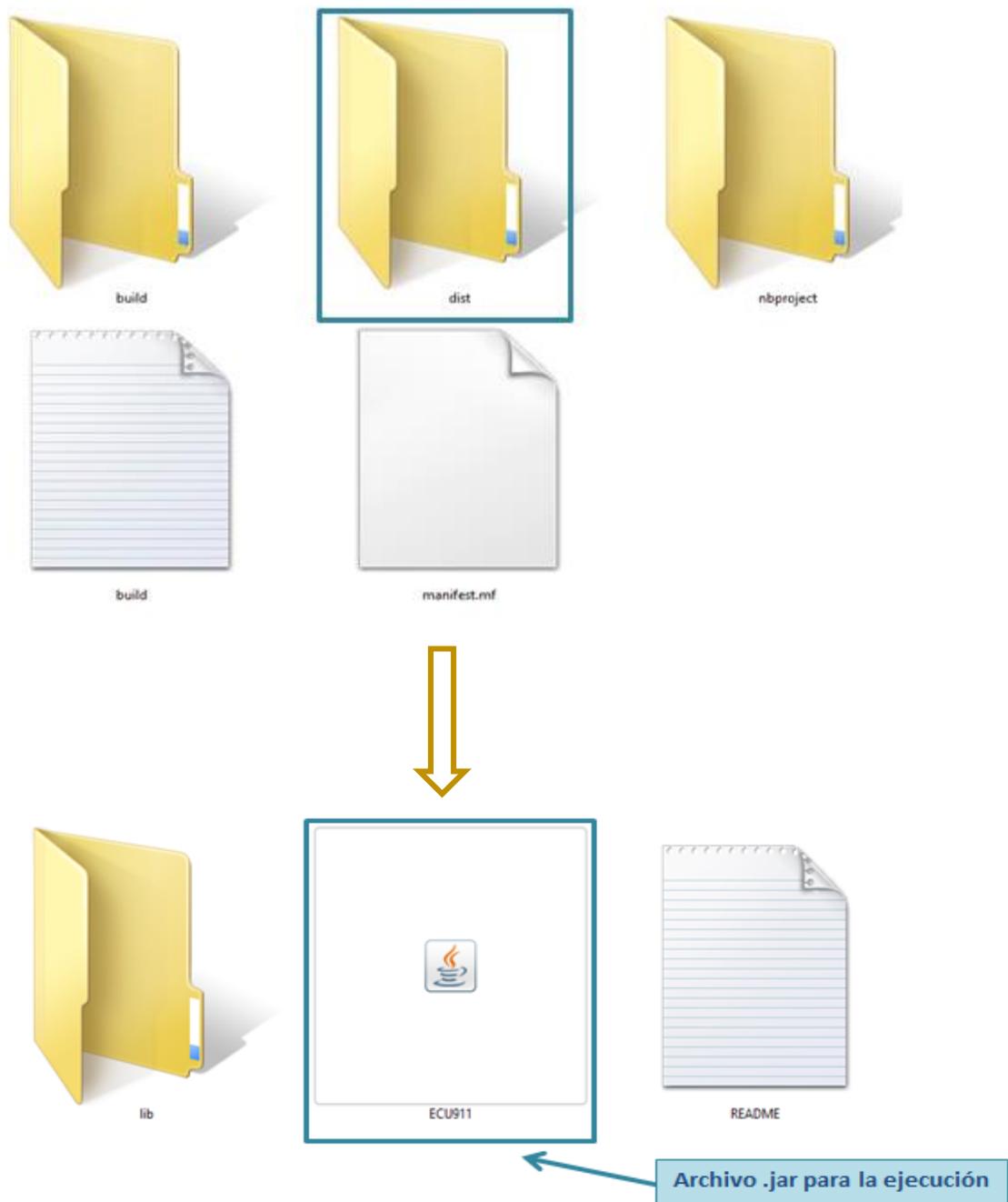


Figura 2.21. Ubicación del archivo ECU911.jar para su posterior compilación.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

Una vez creado este archivo se debe transferir la carpeta del proyecto a la Raspberry. Como el dispositivo se encuentra enlazado en la red de ECU911, la transferencia del archivo se la puede realizar mediante la red. En nuestro caso hemos utilizado el software Filezilla que es perfecto para transferir archivos dentro de una misma red. Se

debe tener en consideración que el sistema operativo instalado en el dispositivo es el Ubuntu Mate, el cual es un derivado de Linux. Una vez se transfiera estos archivos se debe realizar la digitación del comando `java -jar ECU911.jar` dentro de la consola y en la dirección en donde se encuentra el archivo ECU911.jar, tal y como se puede observar en la figura 2.22.

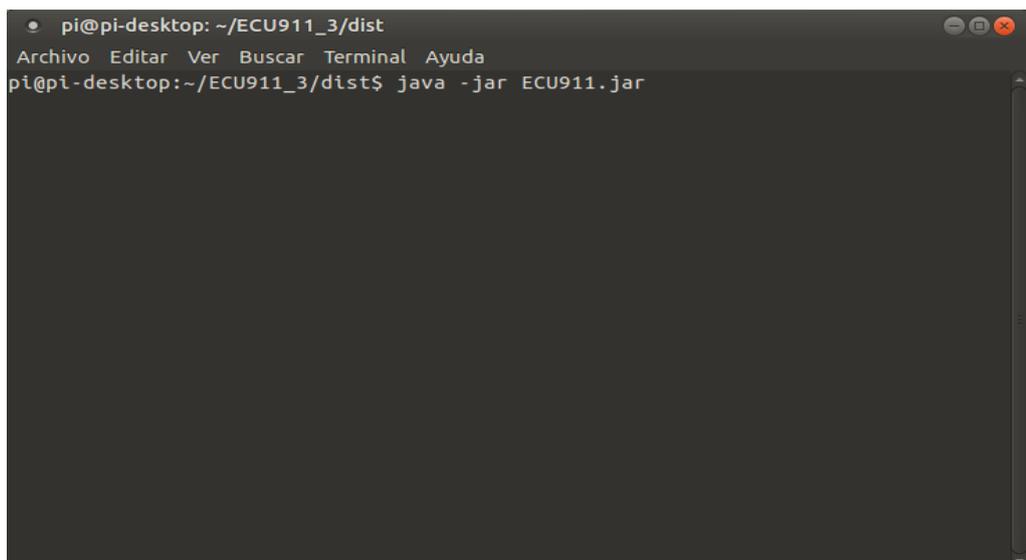
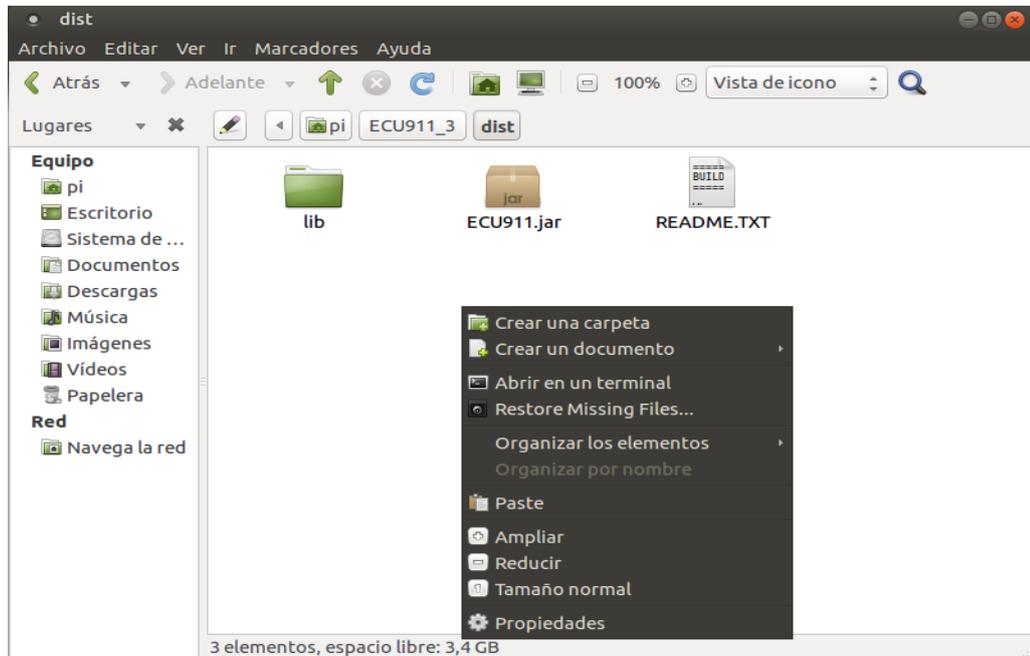


Figura 2.22. *Compilación del proyecto dentro del dispositivo Raspberry.*
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

2.3.2. Diseño y funcionamiento de la interfaz grafica

La aplicación diseñada consta de cuatro partes para su funcionamiento (ver figura 2.3 bloque 2.1). La primera parte consiste en establecer la conexión entre los dispositivos Arduino Mega y Raspberry Pi. La comunicación entre estos se realiza de manera serial, es por esto que para realizar la aplicación se contó con la librería JSerialcomm de Java. Con sistemas operativos Linux en ocasiones no suele existir la comunicación debido a conflictos con esta librería, es por esta razón que es aconsejable digitar algunos comandos en la terminal antes de la ejecución de la aplicación para no tener ningún tipo de inconvenientes al momento de establecer la conexión. Los comandos a digitar son los siguientes [43]:

- sudo usermod -a -G uucp username
- sudo usermod -a -G dialout username
- sudo usermod -a -G lock username
- sudo usermod -a -G tty username

En el campo username se debe reemplazar por el nombre de usuario del equipo, en nuestro caso fue asignado el nombre de *pi* en el sistema operativo. Alguno de estos comandos llega a fallar y esto dependerá de la derivación de Linux que se utiliza, en tal caso no hay problema si falla alguno. Dentro del desarrollo de la aplicación podemos establecer la conexión pulsando el botón que tiene el mismo nombre como se puede observar en la figura 2.23, en esta el cuadro de color negro especifica que puertos se encuentran conectados a la Raspberry pi, se debe escogerla opción ttyACM0 ya que es el puerto al que esta conectado nuestro Arduino. Mientras que el cuadro rojo especifica el establecimiento de la conexión y debe pulsarse para iniciar el enlace entre los dispositivos. La segunda parte consiste en mantener la sincronía de la red, es decir mantener las mediciones en tiempo real en cada uno de los nodos sensores dentro de la red, es por esta razón que se colocó en cada uno un RTC3231 como ya se mencionó anteriormente. En la aplicación se añadió la opción de *reset* del tiempo y la fecha, esta información será enviada a cada nodo para que este realice un *set* a su respectivo RTC. El formato que maneja esta función dentro de la aplicación es *dd-mm-aa* para la fecha mientras que para el tiempo es *hh-mm-ss* con opción de elegir el día de la semana correspondiente tal y como podemos observar el cuadro amarillo de la figura 2.23.



Figura 2.23. Aplicación “MONITOREO DEL PROYECTO WISENET” y sus funciones principales.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

La tercera parte se encarga de ir visualizando los datos medido de cada uno de los nodos tal como se puede observar en el cuadro azul de la figura 2.23, esta grafica es de tipo char-line y se va realizando conforme pasa el tiempo. Para la aplicación se utilizó las librerías JFreeChart y JCommon de Java. La última parte es la encargada del almacenamiento de los datos dentro de MySQL. En el cuadro de color morado de la figura 2.23 se visualizan los datos medidos tanto de CO₂ (rpm) como de sonido (dB) en dos tablas distintas. Dentro de MySQL es necesario crear las bases de datos en donde se almacenarán estos datos (ver figura 2.24). En nuestro caso la base de datos se encuentra instalada dentro del mismo dispositivo Raspberry. Debido a que el dispositivo se encuentra conectado en la red de área local es posible acceder a la base de datos digitando la dirección ip. En el explorador se digita lo siguiente **10.2.110.35/phpmyadmin**, inmediatamente si el dispositivo se encuentra conectado de forma correcta en la red aparece un capo de logueo que exige el usuario y contraseña de la base de datos. Las bases de datos que se crearon para el almacenamiento se pueden observar en la figura 2.24

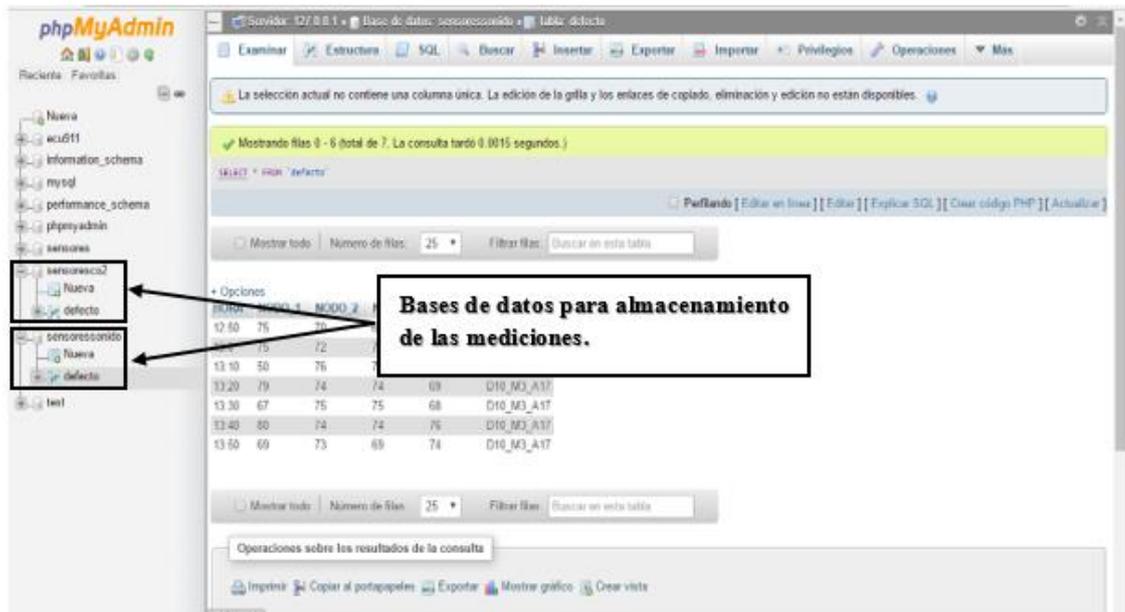


Figura 2.24. Base de datos en MySQL para el almacenamiento instalada en el dispositivo Raspberry.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

2.4. Costo de desarrollo del proyecto

2.4.1. Costo de desarrollo de los dispositivos del proyecto “WiSeNet”

Tabla 2.4. Costo de desarrollo de los dispositivos del proyecto “WiSeNet”

Cantidad	Descripción	Precio(USD)	
		Unidad	Total
1	Raspberry Pi 3B	74,40	74,40
1	Arduino Mega 2560	57,50	57,50
1	Módulo CH340	3,25	3,25
1	Switch Ethernet 5 Port Metal Switch B Link 10/100	14	14
4	Arduino Nano	20	80
4	RTC 3231	7,50	30
4	Módulos Mg811	90	360
4	Módulos Sparkfun Sound	10	40
4	Módulos Lipo Rider Pro	22,90	91,60
4	Baterias de Polimero de Litio-3,7V-1050MA	12,35	49,40
4	Paneles Solares 5V- 1W	7,65	30,60
4	Reguladores de 5 a 3.3 V	1	4
4	Reles para 5 V	0,60	2,40
5	Módulo XBee-PRO® 900 DigiMesh	110	550
5	Cargadores de 5 V	6	30
5	Carcasas de acrílico	30	150
COSTO TOTAL			1567,15

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

2.4.2. Costo de componentes y herramientas adicionales utilizados en el proyecto “WiSeNet”

Tabla 2.5. Costo de componentes adicionales utilizados en el proyecto “WiSeNet”

Componente	Descripción	Precio(USD)	
		Unidad	Total
24 (metros)	Cable flexible AWG 14	0,28	6,72
8 (metros)	Cable Ethernet	0,8	6,40
Transporte	Transporte de escalera (6 veces)	10	60
4	Extensiones eléctricas	1,50	6
1	Kit cable puente hembra-hembra para Arduino	3,75	3,75
4	Kit cable puente hembra-macho para Arduino	3,75	3,75
COSTO TOTAL		\$ 86,62	

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

2.4.3. Costo del desarrollo de la aplicación para el monitoreo “WiSeNet” y de programación de los microcontroladores.

Tabla 2.6. Costo del desarrollo de la aplicación para el monitoreo “WiSeNet” y de programación de los microcontroladores.

Horas de programación	Costo por hora(USD)	Total
240	8	\$1.920,00

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo muestra los resultados obtenidos de las mediciones de CO₂ y Ruido en cada Nodo, además describe un análisis del efecto producido por el tránsito vehicular sobre los niveles medidos en cada sector de monitoreo. Dichos análisis son realizados gracias a las gráficas que se pueden obtener con los datos almacenados en la base de datos MySQL.

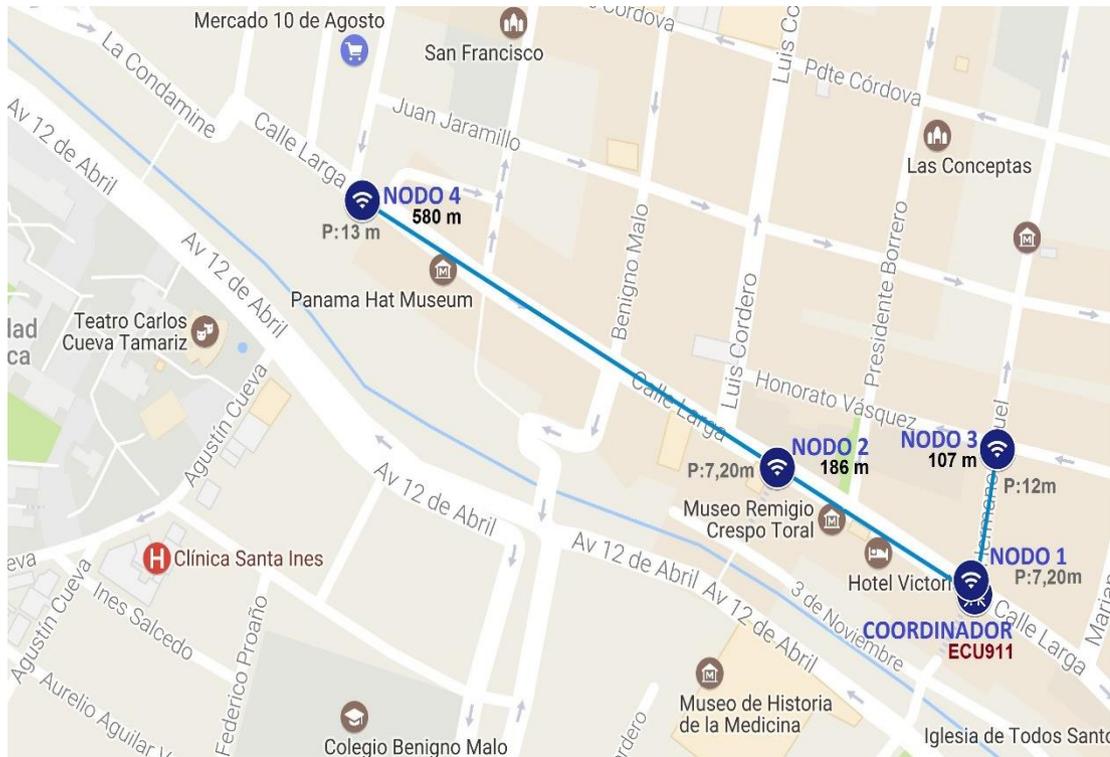


Figura 3.1. Disposición de la red de sensores dentro del sector Calle Larga y Hermano Miguel con distancia entre Nodo- Coordinador y altura de postes (P).

Distancia entre nodos y coordinador.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

El objetivo del estudio es comprobar el funcionamiento y fiabilidad de montar una red de sensores para monitoreo, en este caso de CO₂ (ppm) y Ruido (dB) en un sector urbano. Para el cumplimiento de este fin se disponen cuatro nodos sensores y un coordinador a lo largo de la Calle Larga y Hermano Miguel en la ciudad de Cuenca, formando una red de sensores inalámbrica punto-multipunto tal como se muestra en la figura 3.1.

Tanto la ubicación como la disposición de cada nodo dentro de la red se rigen a la arquitectura física del sistema de cámaras de seguridad pertenecientes al ECU911, institución pública para la cual se desarrolla el proyecto. Los parámetros considerados para el análisis de las mediciones obtenidas son: Nivel de Ruido tranquilo, moderado y elevado, mientras que para CO₂ un nivel de concentración típica.

3.1. Parámetros presentes en el monitoreo

Las mediciones tomadas por los nodos tienen como base niveles de referencia en su algoritmo necesarios para que los datos obtenidos puedan ser comparados con trabajos relacionados y equipos de medición existentes. Aquellos parámetros de referencia nos permitirán hacer el análisis de acuerdo al grado de tránsito vehicular existente en el instante de medición de los nodos sensores y son los siguientes:

- **Nivel tranquilo de ruido:** Se considera al nivel de ruido al aire libre para valores menores a los 50 dB.
- **Nivel moderado de ruido:** Se considera al nivel de ruido que presenta una conversación con valores mayores de 50 dB y menores a 80 dB.
- **Nivel elevado de ruido:** Nivel que presenta el tránsito vehicular constante con valores superiores a los 80 dB.
- **Concentración típica de CO₂:** Es considerada la concentración atmosférica típica de CO₂ a niveles menores de 450 ppm (percent per million).

No obstante, factores como la altura y ubicación de cada nodo también intervienen en el umbral de medición de los sensores.

3.2. Análisis de los niveles de Ruido y Contaminación Vehicular

La tabla de valores pertenecientes a las mediciones de CO₂ y Ruido con hora y fecha de medición fueron extraídos de la base de datos y posteriormente graficados en Excel. El estudio considerara primero la gráfica de la base de datos con las mediciones de los cuatro Nodos y posteriormente los Nodos por separado de los dos días de monitoreo.

El análisis de los resultados obtenidos debe tener en cuenta las siguientes consideraciones que son dependientes de la ubicación de cada Nodo y el Coordinador:

- **COORDINADOR:** Esta ubicado en la Calle Larga y Hermano Miguel, a una altura de 7,2 metros junto al Nono 1.

- **NODO 1:** Esta ubicado en la Calle Larga y Hermano Miguel, a una altura de 7,2 metros junto al Coordinador.
- **NODO 2:** Esta ubicado en la Calle Larga-Hotel Crespo esquina, a una altura de 7,2 metros y 186 metros de distancia respecto a la ubicación del Coordinador con línea de vista directa.
- **NODO 3:** Esta ubicado en la calle Hermano Miguel y Honorato Vásquez esquina, a una altura cercana a los 9 metros y 107 metros de distancia respecto a la ubicación del Coordinador con línea de vista directa.
- **NODO 4:** Esta ubicado en la calle larga diagonal al Mercado 10 de agosto, a una altura de 13 metros y 580 metros respecto al Coordinador con línea de vista directa.
- Se tomaron datos extraídos del 8 y 9 de marzo desde aproximadamente las 9 de la mañana hasta la media noche.

Tanto los nodos como el coordinador están instalados en postes, junto a las cámaras de seguridad del Sistema Integrado ECU911 quien nos proporcionó la información necesaria para enlistar las consideraciones antes mencionadas.

3.2.1. Ruido

En La figura 3.2, a y b contiene las mediciones de Ruido del miércoles 8 y jueves 9 de marzo respectivamente del presente año. Se puede observar claramente que los nodos uno y tres son más susceptibles a los cambios de niveles de ruido en comparación a los nodos dos y cuatro que contemplan menor variación en sus mediciones tomando en cuenta el primero no está ubicado en una parada y el ultimo está en una altura bastante elevada a diferencia de los demás, por lo que el umbral de medición se ve afectado. A pesar de este inconveniente los valores en horas pico se encuentran por encima de los 75dB aclarándonos que existe una mayor actividad vehicular en esas horas y disminuyendo considerablemente a medida que se acerca la media noche. Niveles constantes por encima de los 75 dB indican un tránsito vehicular constante y posible congestionamiento.

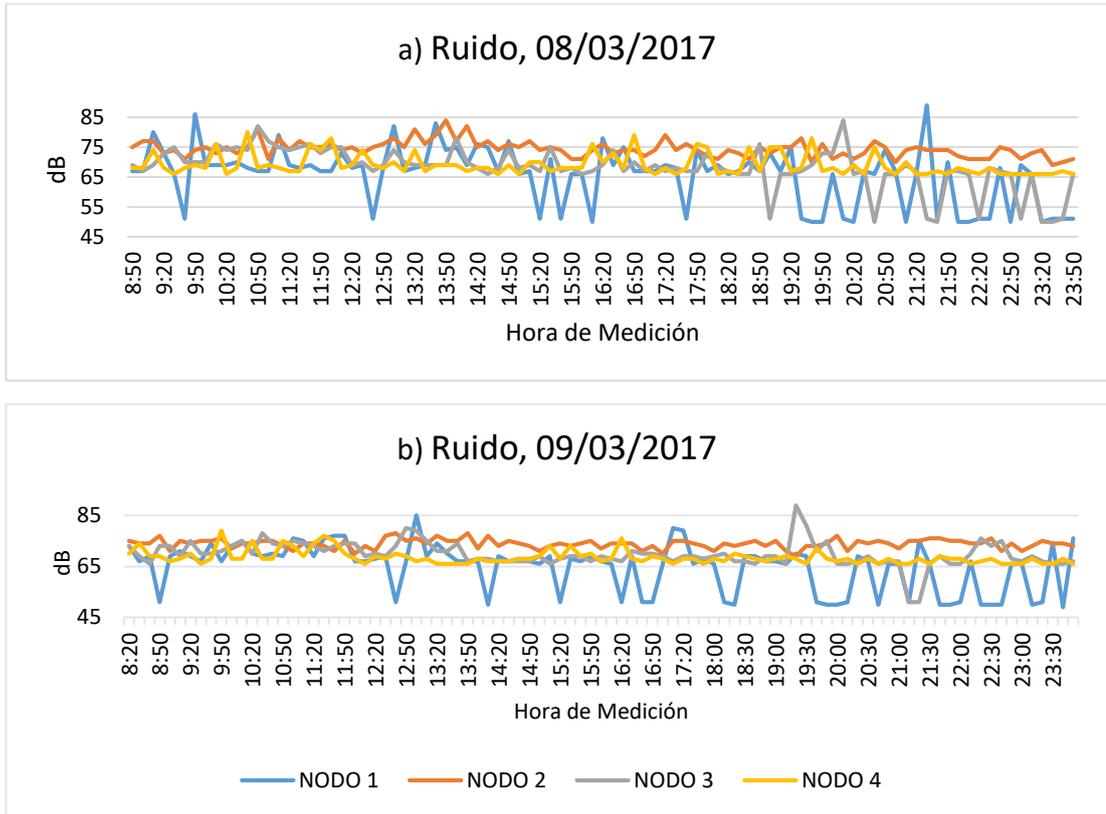


Figura 3.2. Valores extraídos de la base de datos a) Niveles de Ruido perteneciente al 8 de marzo del 2017 b) Niveles de Ruido perteneciente al 9 de marzo del 2017.
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

Para mayor entendimiento analizaremos el comportamiento de los niveles de ruido por nodo entre los dos días de monitoreo.

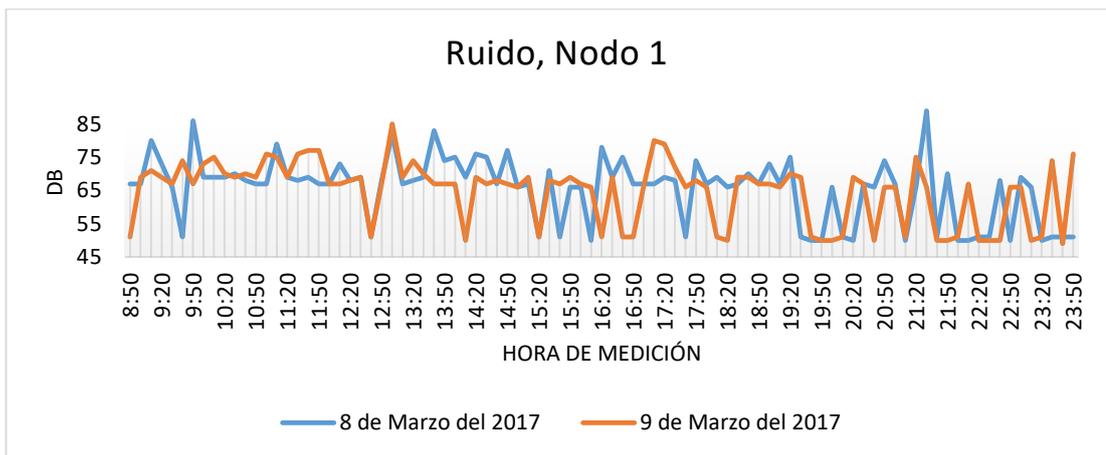


Figura 3.3. Mediciones de Ruido tomadas por el primer Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo.
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

Las mediciones mostradas en la figura 3.3. pertenecientes al Nodo 1 son de las más variantes en el tiempo, al ser el uno de los nodos más bajos y estar instalado en una parada de buses. Nos indica claramente que la actividad durante el día es elevada y

tiende a disminuir durante la noche del día miércoles, sin embargo, el jueves pasadas las 20:00 horas existe aún actividad que a pesar de no ser constante está por encima de los 75 dB indicando movimiento vehicular.

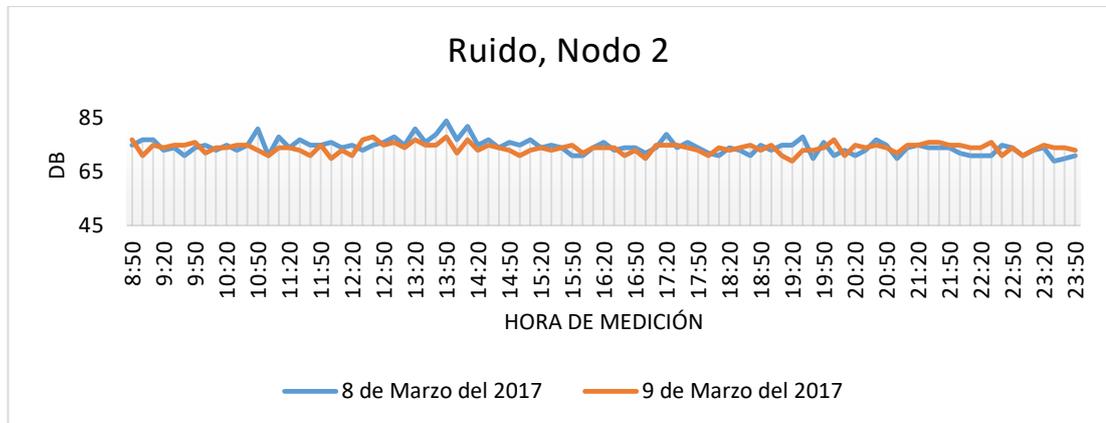


Figura 3.4. Mediciones de Ruido tomadas por el segundo Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo.
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

En la figura 3.4 se muestra la gráfica de los datos obtenidos por el Nodo 2 durante los dos días de medición. Ubicado en la esquina del Hotel Crespo y no ser parada de buses presenta niveles por de los 75dB entre las 13:00 y 14:00 horas de la tarde que concuerda con mediciones tomadas del primer nodo he indican un posible congestionamiento o embotellamiento vehicular dentro de lapso de tiempo.

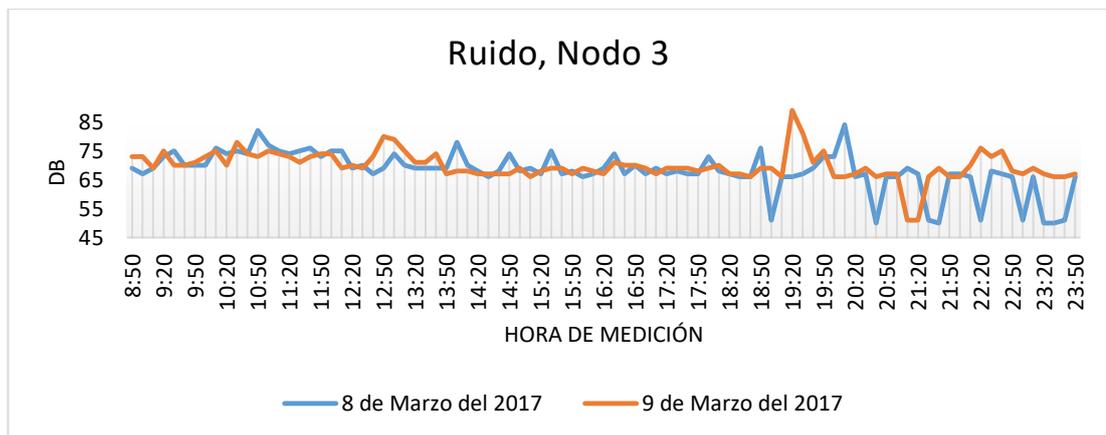


Figura 3.5. Mediciones de Ruido tomadas por el Nodo 3 desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo.
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

El Nodo 3 al estar ubicado a una altura de 9 metros, pero dentro de una intersección es relativamente sensible a las mediciones de ruido, se puede observar claramente en la figura 3.5 como sus niveles se reducen llegada las 20:00 horas de la noche y sus mediciones dejan de ser constantes. A pesar de que la gráfica nos da una idea general

de la actividad vehicular generada en el día y noche, la altura a la que el nodo realiza las mediciones le impide captar los niveles de ruido aceptables para determinar que en esa intersección exista algún tipo de congestión vehicular.

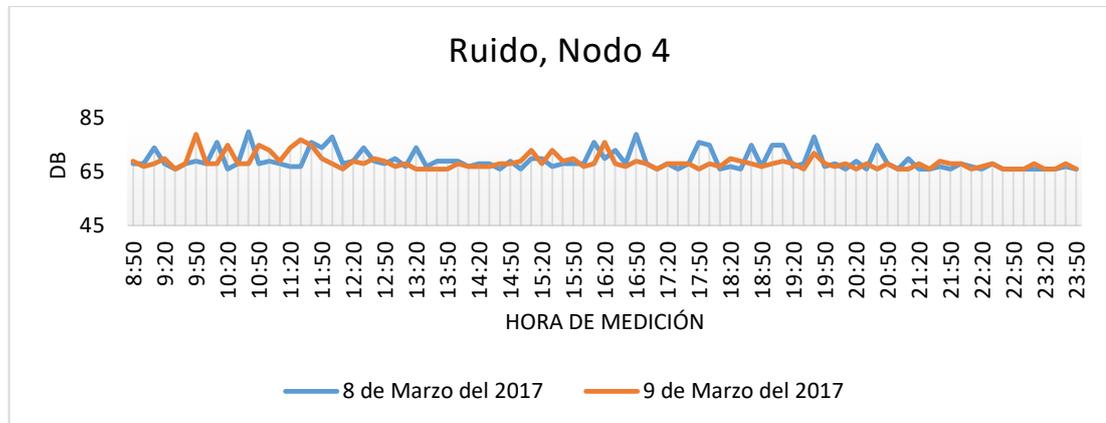


Figura 3.6. Mediciones de Ruido tomadas por el cuarto Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo.
Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

El Nodo 4 al estar ubicado a 13 metros de altura es el nodo que se encuentra más alejado de la zona de generación de ruido. A pesar de encontrarse cerca de una parada de buses los niveles captados son bajos pero aceptables, de manera que en la figura 3.6 se observa claramente la relación existente entre los dos días de medición, en donde al estar cerca del mercado 10 de agosto presenta mayor actividad desde 9:00 de la mañana hasta aproximadamente las 13:00 horas de la tarde y luego solo el miércoles desde las 16:00 hasta las 19:50 horas de la noche.

3.2.2. Contaminación de CO₂

La diferencia entre las mediciones de los niveles de Ruido y de Contaminación por CO₂ es notable al utilizar para este último en su representación valores más elevados. Las mediciones fueron tomadas miércoles 8 y jueves 9 de marzo del presente año, desde las 9 de la mañana hasta las 0:00 horas de media noche.

La figura 3.7 muestra las mediciones obtenidas de los cuatro nodos en una sola grafica combinada de cada día de monitoreo, en donde es clara la relevancia que tienen las mediciones obtenidas por el primer nodo sensor, que a diferencia de los demás presenta un comportamiento claro de la contaminación CO₂ del tránsito vehicular dentro del área de monitoreo. Como era de esperarse los demás Nodos al no estar dispuestos igual o más eficientemente con respecto al primer nodo son menos susceptibles a las variaciones de los niveles de CO₂.

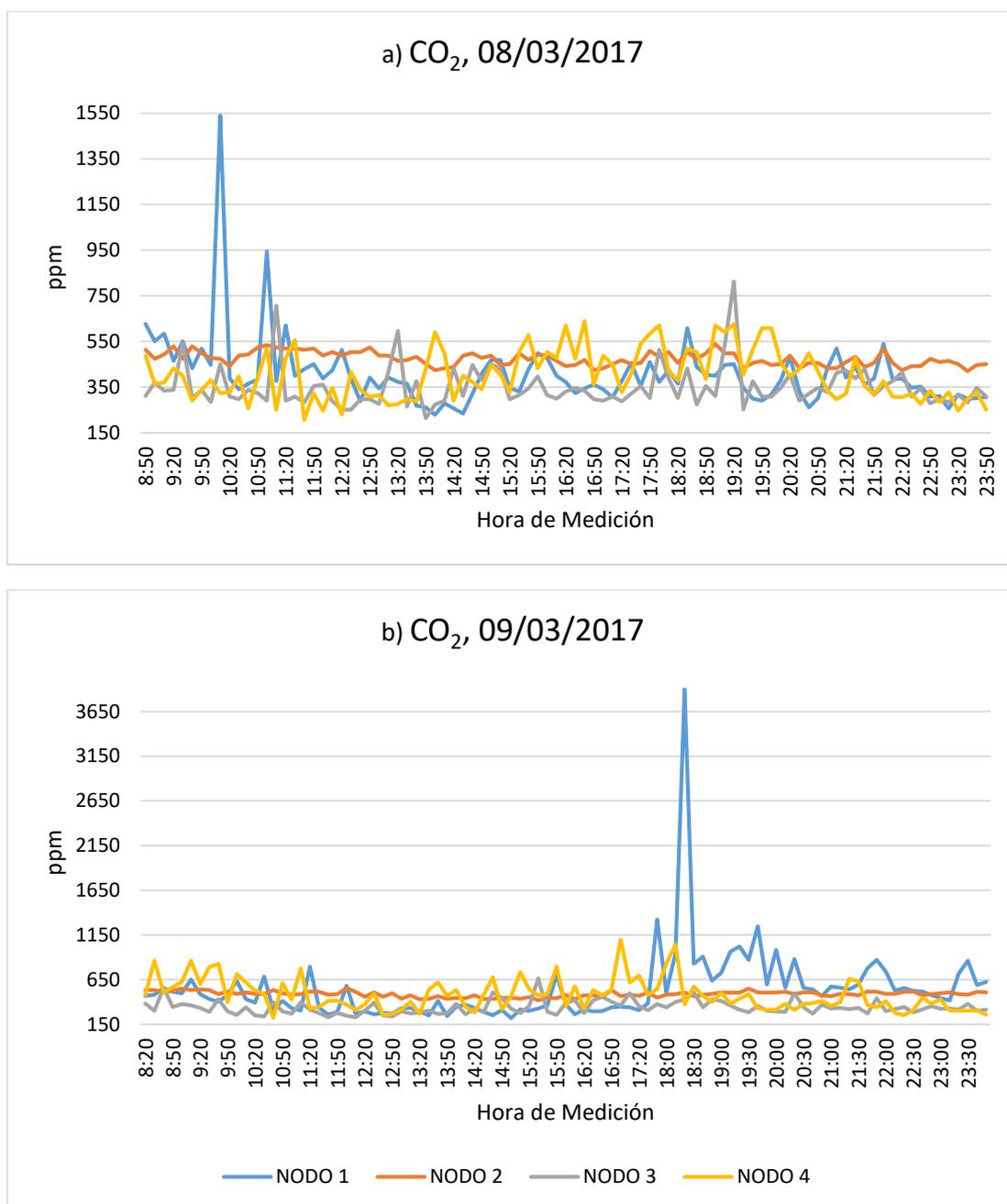


Figura 3.7. Valores extraídos de la base de datos a) Niveles de Concentración de CO₂ perteneciente al 8 de marzo del 2017 b) Niveles de Concentración de CO₂ perteneciente al 8 de marzo del 2017.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

A continuación, las mediciones de cada nodo se analizan por separado en los dos días de monitoreo.

La figura 3.8 perteneciente a las mediciones de CO₂ obtenidas por el primer Nodo presentan el mismo patrón de comportamiento mostrado en la figura 3.2.1.2, con niveles elevados de CO₂ durante el día y presentando un leve decaimiento a partir de

las 19:00 horas del miércoles por la noche, mientras que el siguiente día presenta concentraciones más prolongadas entre las 17:30 hasta las 20:00 horas de la noche y posterior a esto presenta mediciones elevadas de concentración de CO₂ pero que ya no son constantes hasta las 0:00 a diferencia del día anterior.

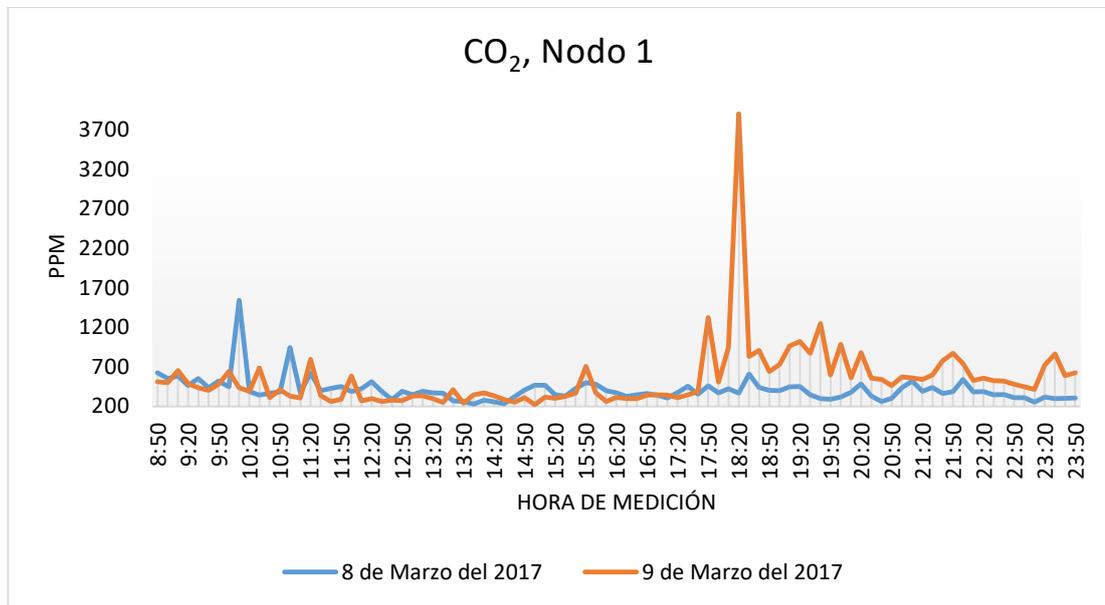


Figura 3.8. Mediciones de Concentración de CO₂ tomadas por el primer Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

Las mediciones son válidas considerando que el jueves a partir de las 17:00 horas de la tarde existe una mayor afluencia de gente dada por la apertura de bares, restaurantes y discotecas, lo que conlleva a una mayor actividad vehicular. Que no son sustentadas por el pico más elevado de concentración, sino por un nivel relativamente constante en un determinado lapso de tiempo.

Los dos picos elevados de la figura 3.8 están a 1540ppm y 3898ppm, que son niveles de concentración de CO₂ bastante elevados detectados en un instante de tiempo determinado, pero no se prolongan en el tiempo. Lo que nos indica un posible vehículo averiado o algún tipo de accidente industrial que tuvo como consecuencia una liberación elevada de CO₂ a esa hora o alguna situación de otra índole. Esto se debe a que los sensores miden los niveles de concentración sin importar la fuente.

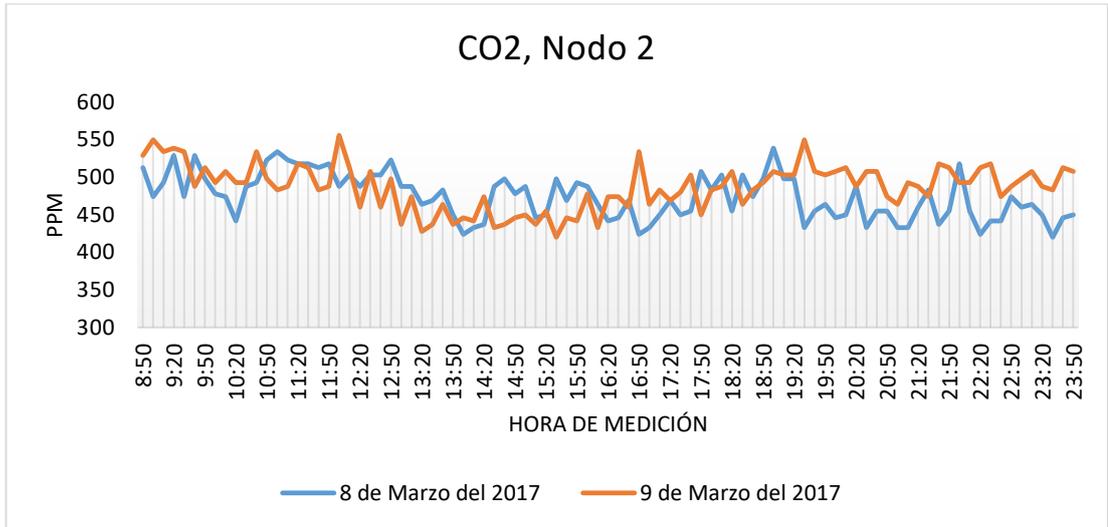


Figura 3.9. Mediciones de Concentración de CO₂ tomadas por el segundo Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo.

Fuente B. Bravo, L. Belduma.

La figura 3.9 muestra la concentración de CO₂ medida por el Nodo 2. El comportamiento de la curva de medición es claro dándonos a conocer que entre las 9:00 y 14:00 horas de la tarde existe una mayor concentración de CO₂ con niveles superiores a los 450ppm, la misma que pasadas las 19:00 horas se reduce.

En esta ocasión a diferencia de los niveles de ruido observados en la figura 3.2.1.3 los niveles de CO₂ nos da una idea más clara del comportamiento del tránsito vehicular, a pesar de que el Nodo 2 no esté ubicado exactamente en una parada de Bus o intersección como lo está el Nodo 1 o el 3.

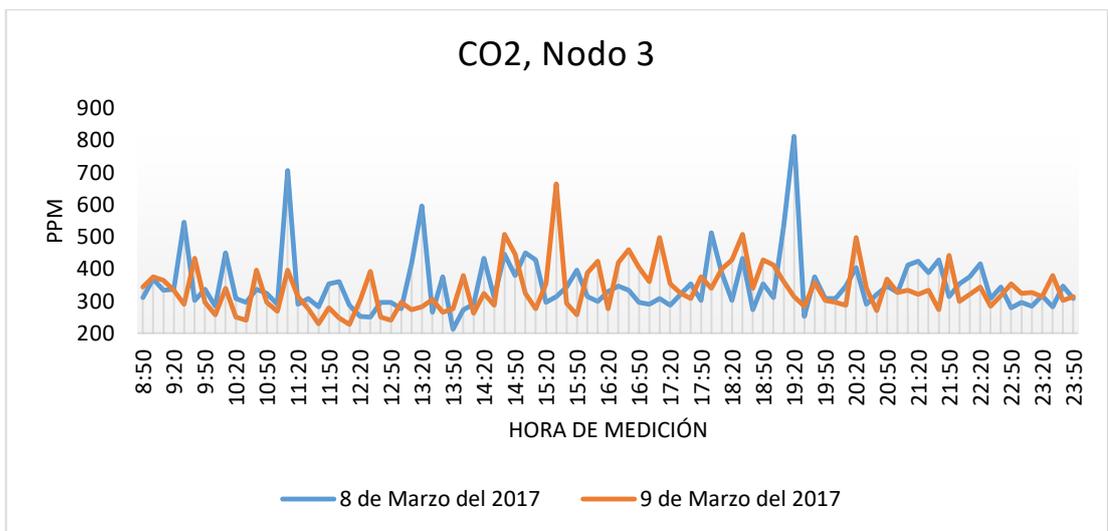


Figura 3.10. Mediciones de Concentración de CO₂ tomadas por el tercer Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

Los datos obtenidos por el Nodo 3 ilustrados en la figura 3.10 son bajos en comparación a los dos primeros Nodos y no presenta niveles elevados y constantes de concentración de CO₂ comportamiento que es atribuido a los 9 metros de altura en donde está instalado. A pesar de encontrarse en una intersección las mediciones no son lo suficientemente claras para determinar la existencia de un posible embotellamiento o congestión vehicular si no se sustenta con los niveles de ruido tomados a la misma hora. La concentración de CO₂ durante los dos días de monitoreo se encuentra entre los 450 y 500 ppm, que son bajos en comparación a los niveles mostrados por el primer nodo y es aceptable considerando que los vehículos de transporte urbano son los que emanan mayores niveles de concentración de CO₂.

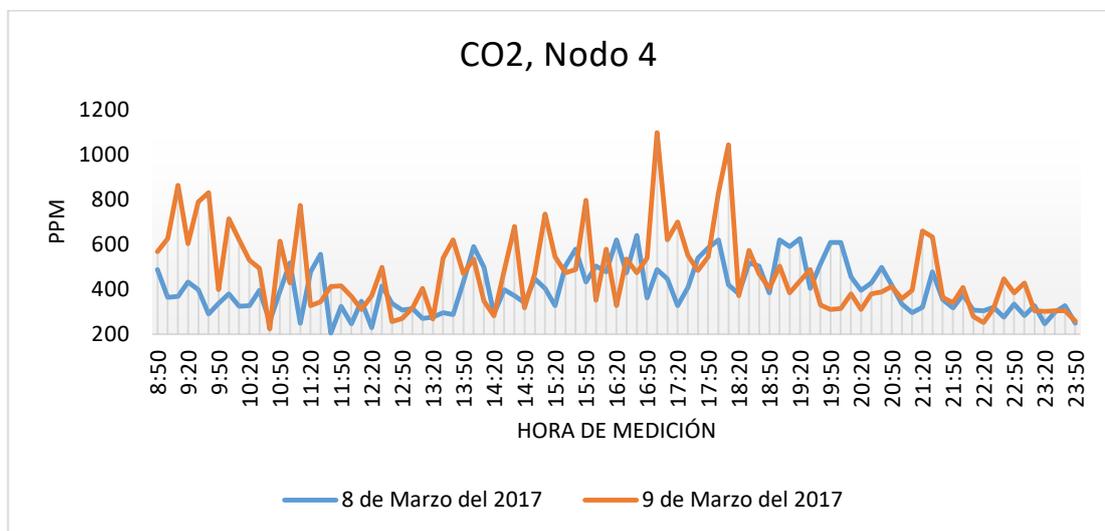


Figura 3.11. Mediciones de Concentración de CO₂ tomadas por el cuarto Nodo desde las 8:50 hasta las 23:50 en dos días de monitoreo.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

La figura 3.11 perteneciente a las concentraciones de CO₂ obtenidas por el cuarto Nodo muestra claramente que en las horas pico de tránsito vehicular se incrementan las concentraciones de CO₂, exponiendo sus niveles más altos a las 17:00 y 18:00 horas de la tarde con 1096 y 1043ppm respectivamente. Al estar ubicado a 13 metros de altura con respecto al foco emisor de CO₂ los niveles medidos son bajos en comparación al primer Nodo, por esto el patrón que identifica el comportamiento vehicular se muestra claramente en la gráfica, pero con valores relativamente bajos.

CONCLUSIONES

La red de sensores inalámbrica montada a partir de los módulos XBee es completamente confiable, ya que no presento interferencia ni pérdida de información teniendo a consideración tanto la distancia máxima enlace y condiciones de línea de vista, mientras se realizaron las pruebas conjuntamente con el Sistema Integrado de Seguridad ECU911.

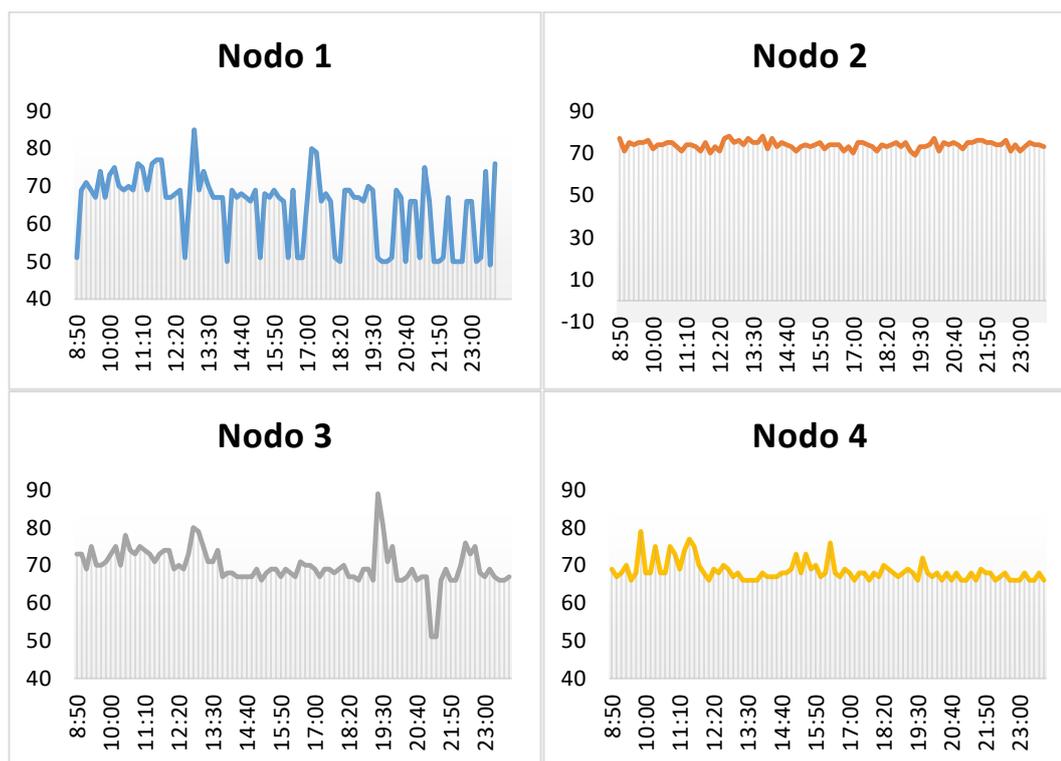


Figura 3.12. Cuadro comparativo del nivel de Ruido tomado por los cuatro nodos el jueves, 9 de marzo del 2017 desde las 8:50 hasta las 23:50 horas. El eje vertical muestra las variaciones de ruido en dB, mientras que el eje horizontal muestra las horas de medición.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

Del cuadro comparativo mostrado en la Figura 3.12 concluimos que, el comportamiento mostrado por las curvas de ruido pertenecientes al primer, tercer y cuarto Nodo presentan un mejor rendimiento en cuanto a las mediciones obtenidas si consideramos que tanto la altura como la sensibilidad de los sensores se ve afectada en cada caso. Tanto así que el segundo Nodo no presenta variaciones en sus mediciones debido a que no existe ningún tipo de intersección o parada de buses en donde está instalado, que le permitan tomar una medición prolongada del ruido emitido. A diferencia de las concentraciones de CO₂, el sonido luego de ser emitido

no se disipa lentamente en el ambiente, lo que genera la necesidad de medir y posteriormente almacenar el nivel de ruido inmediatamente después de que se genera.

El Nodo 1 presenta un escenario con las mejores condiciones para el monitoreo de Ruido y concentración de CO₂. Los comportamientos de las curvas en ambos casos están relacionados de manera que brindan la información necesaria para determinar el incremento y decremento del tránsito vehicular en horas específicas. Tanto la altura como su ubicación cercana a una parada de transporte urbano reducen el umbral de medición con respecto al foco de estudio, permitiéndole al nodo tomar mediciones más cercanas a las que emite la fuente en el instante justo en el que se producen.

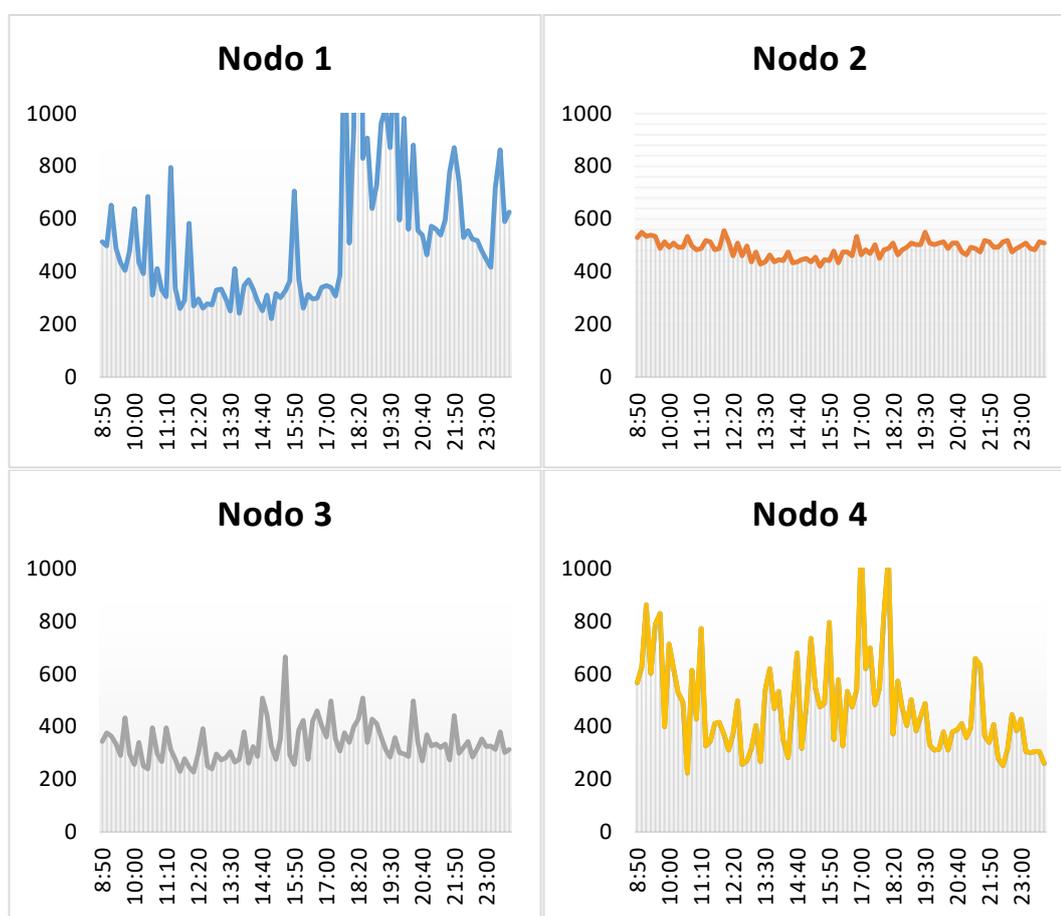


Figura 3.13. Cuadro comparativo del nivel de concentración de CO₂ tomado por los cuatro nodos el jueves, 9 de marzo del 2017 desde las 8:50 hasta las 23:50 horas. El eje vertical muestra las variaciones de CO₂ en ppm, mientras que el eje horizontal muestra las horas de medición.

Fuente: B. Bravo, L. Belduma.

Del cuadro comparativo de la figura 3.13, concluimos que el comportamiento de la curva descrita por los niveles de concentración de CO₂ en los 4 Nodos muestran claramente la actividad vehicular en el transcurso del día y noche. Sin considerar la

altura a la que se encuentran, el primero, tercero y cuarto Nodo presentan picos más elevados de concentración de CO₂, consecuencia directa de su ubicación mostrada en la Figura 3.1.

La eficiencia de los Nodos 3 y 4 se ve reducida al estar ubicados a una altura mayor con respecto a los dos primeros Nodos. Este factor incrementa el umbral de medición, de tal manera que la señal generada por el foco emisor se atenúa levemente hasta llegar a los sensores, por esta razón los nodos envían niveles bajos de Ruido y Concentración de CO₂ que a pesar de todo mantiene el patrón de comportamiento en las mediciones, mostrando concentraciones elevadas de CO₂ y niveles altos de Ruido en horas pico.

Los cuatro Nodos monitorean constantemente las 24 horas del día sin importar el foco o fuente de emisión ya sea de Ruido o de concentración de CO₂. Esto le permite al sistema tomar mediciones justo en el instante de tiempo en el que ocurra alguna situación ajena a nuestro análisis tal como se muestra en la figura 3.8 con dos picos elevados de concentración de CO₂ que al no ser constantes en el tiempo no brinda mayor información sobre a actividad vehicular a esa hora. A pesar de esto el Sistema de Seguridad Integrado ECU911 muestra gran interés en este tipo de mediciones, ya que manejados logísticamente pueden ayudar a resolver problemas relacionados a este comportamiento. En este punto la base de datos es fundamental al tener la posibilidad de realizar análisis entre días, semanas o meses de monitoreo.

Las mediciones obtenidas por la red de sensores, le permiten al Sistema Integrado de Seguridad ECU911, en una hora y ubicación determinada darle prioridad a una cámara para identificar el foco de concentración de CO₂ o emisión de Ruido. De esta manera, si existe un problema ya sea por congestión vehicular u otro factor, pueda ser asistido inmediatamente.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda extender la red con por lo menos dos nodos sensores más, de tal manera que cubran las intersecciones de dos manzanas completas y no solo de una calle, para luego de haber identificado la existencia del embotellamiento o congestión vehicular elevado también reconocer el sector idóneo por el cual se pueda desviar el tráfico.

Si se desea extender la red de sensores a varias intersecciones se puede considerar el cambio de topología de red PTM a MESH eliminando la necesidad de la existencia de una línea de vista directa entre los Nodos y el Coordinador, respetando la distancia máxima permitida para el enlace de 1 kilómetro para los módulos XBee Pro 900.

Al momento el prototipo cuenta en su Coordinador con una Raspberry como Servidor para la base de datos generada por la red. Si bien la Raspberry es suficiente para satisfacer las necesidades de nuestro sistema, al incrementar el número de nodos sensores se puede reemplazar por una computadora fija dentro del Sistema de Seguridad Integrada ECU911 con más capacidad de memoria y almacenamiento que le permita mantenerse estable ante una posible saturación de memoria.

Tomando en cuenta que los Nodos miden niveles tanto de CO₂ como de Ruido sin importar la fuente que los produzca, los datos podrían ser utilizados logísticamente. En el caso de concentraciones de CO₂ se podrían identificar líneas de Bus en mal estado, accidentes industriales que liberen altas concentraciones de CO₂, causas de enfermedades, etc. En el caso del Ruido al trabajar conjuntamente con el Sistema de Seguridad Integrado ECU911 los datos podrían ayudar a identificar un posible grito de auxilio ya sea producido por un robo o algún accidente.

Se puede considerar la reubicación de los Nodos 3 y 4 a 7,2 metros de altura para que los focos de estudio estén dentro del umbral de medición aceptable, teniendo lecturas más claras y evitando que los equipos puedan ser sustraídos sin consentimiento de los postes.

A pesar de que las mediciones son tomadas constantemente por los sensores, solamente cada 10 minutos un nivel de ruido y concentración de CO₂ es enviado al coordinador y posteriormente se guarda en la base de datos, lo que podría ocasionar la pérdida de algún dato importante que se diera en este lapso de tiempo. El algoritmo de

envió de datos puede ser mejorado de manera que se pueda obtener una lectura más exacta, enviando una media cada 10 minutos de los valores medidos durante este lapso de tiempo. Esto mejoraría la calidad de las mediciones de ruido tomadas, ya que si el ruido se genera un segundo antes de tomar el dato para ser enviado este se perdería, pero la mediana si mostraría esa variación.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Certificado de las pruebas realizadas

REPÚBLICA DEL ECUADOR



**SERVICIO INTEGRADO
DE SEGURIDAD ECU 911**



CERTIFICADO

Ing. Juan Carlos Jiménez, en calidad de Coordinador Zonal - Zona 6 Servicio Integrado de Seguridad ECU 911; certifica que infraestructura civil (Postes metálicos) e informática (plataforma de transmisión de datos) perteneciente al ECU 911, fue utilizado por los estudiantes LUIS ALBERTO BELDUMA BELDUMA, con C. I. 0705861879 y BYRON ANDRES BRAVO GRANDA, con C.I. 0705340479, con el objetivo de desarrollar, empotrar y probar el proyecto investigativo de nombre "DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALAMBRICOS PARA EL MONITOREO DE TRANSITO VEHICULAR Y LA CONTAMINACION CO2 DENTRO DEL UN SECTOR URBANO". Los estudiantes recibieron asesoramiento del área de tecnología del ECU 911, desde el 24 de Noviembre de 2016, hasta el 17 de Marzo de 2017.

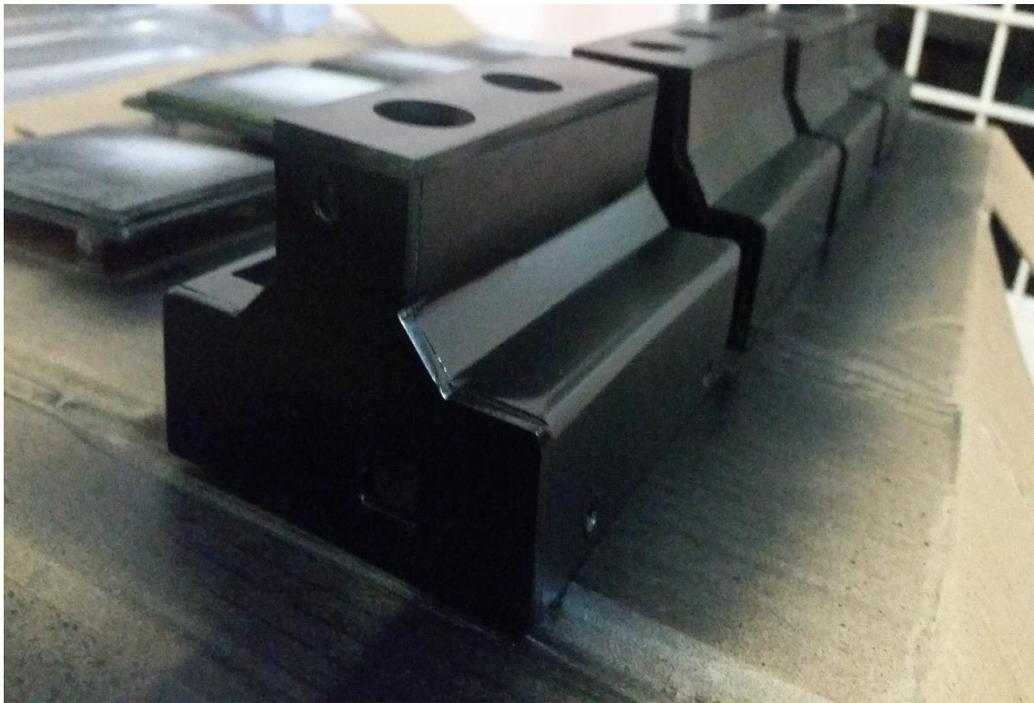
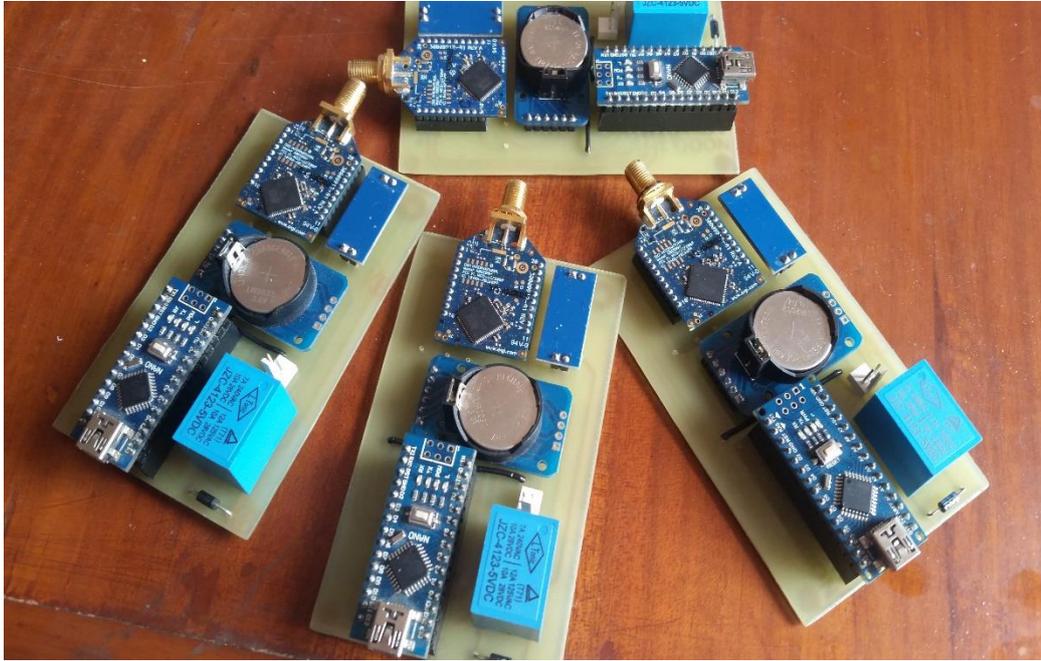
Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, el interesado puede hacer uso del presente certificado cuando creyere conveniente.

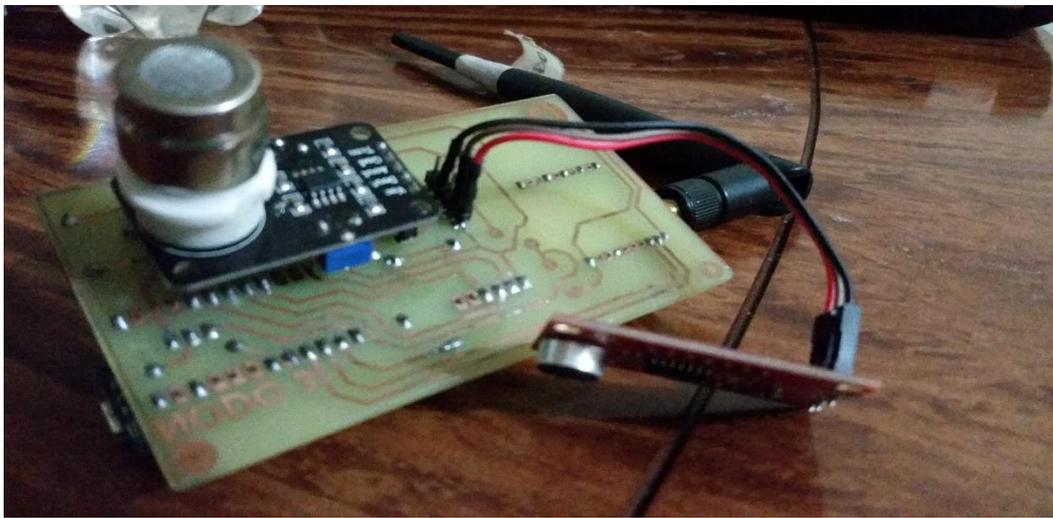
Cuenca, 5 de abril de 2017.

Ing. Juan Carlos Jiménez
Coordinador Zonal – Zona 6
Servicio Integrado de Seguridad ECU 911

APÉNDICE B

Montaje de los elementos de cada nodo en las carcasas de acrílico





APÉNDICE C

Instalación de los nodos en los postes de las cámaras del ECU911



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Censos, I. (2016). Instituto Nacional de Estadística y Censos. [online] Instituto Nacional de Estadística y Censos. Available at: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/>. [Accessed 20 April. 2016].
- [2] Lahora.com.ec. (2016). Las emisiones de CO2 se encuentran estables: Planeta: La Hora Noticias de Ecuador, sus provincias y el mundo. [online] Available at: http://lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101926298/-1/Las_emisiones_de_CO2_se_encuentran_estables.html#.VxXXYaR97IX [Accessed 19 Jul. 2016].
- [3] expreso.ec. (2016). OMM propone a Ecuador urgente reducción de emisiones de CO2. [online] Available at: http://expreso.ec/actualidad/omm-propone-urgente-reduccion-emisiones-co2-y-JDGR_4030558 [Accessed 20 April. 2016].
- [4] Branch, J. W. Sistemas de monitoreo de tránsito vehicular basados en técnicas de segmentación de imágenes. Avances en Sistemas e Informática; Vol. 7, núm. 3 (2010); 75-86 Avances en Sistemas e Informática; Vol. 7, núm. 3 (2010); 75-86 1909-0056 1657-7663.
- [5] Ruiz de Somocurcio Salas, A. E. (2008). Control de Tráfico Vehicular Automatizado Utilizando Lógica Difusa.
- [6] Angeles, M. E. R., Reyna, M. A. R., & Jimenez, I. V. (2014). Monitoreo de tráfico vehicular en sistemas V2I mediante el uso de una red inalámbrica de sensores. Revista Facultad de Ingeniería, 71(71), 115-124.
- [7] Faytong Durango, J., Moggia, G. J., & Vintimilla, B. X. (2009). Monitoreo automático de carreteras mediante el uso de un sistema de detección, seguimiento y extracción de características básicas de vehículos con técnicas de visión por computador.
- [8] Mendoza Solórzano, P. D., & Villacis Vargas, C. Á. (2014). Análisis y solución al congestionamiento vehicular en horas pico utilizando una aplicación móvil con GPS.
- [9] Hernández, C., & Vicente, J. (2010). Redes inalámbricas de sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos (Doctoral dissertation, Editorial Universitat Politècnica de València).

- [10] Yoneki, E., & Bacon, J. (2005). A survey of Wireless Sensor Network technologies: research trends and middleware's role. University of Cambridge TR, 646.
- [11] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks", *IEEE Commun. Mag.*, no. 8, pp. 102-114, 2002.
- [12] Hasan, S., Hussain, M. Z., & Singh, R. K. (2013). A Survey of Wireless Sensor Network. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website: www.ijetae.com* (ISSN 2250-2459, ISO 9001: 2008 Certified Journal, Volume 3, Issue 3.
- [13] Abd-El-Barr, M. I., Youssef, M. A., & Al-Otaibi, M. M. (2005, May). Wireless sensor networks-part I: topology and design issues. In *Electrical and Computer Engineering, 2005. Canadian Conference on* (pp. 1165-1168). IEEE.
- [14] C. P. Townsend, S. W. Arms, "Wireless Sensor Networks: Principles and Applications", *Sensor Technology Handbook*, pp. 439-449, 2004.
- [15] M. P. Singh and D. K. Singh, "Routing Protocols in Wireless Sensor Networks –," vol. 1, no. 2, pp. 63–83, 2010.
- [16] Davis, A., & Chang, H. (2012). A Survey of wireless sensor network architectures. *International Journal of Computer Science and Engineering Survey*, 3(6), 1.
- [17] Al-Karaki, J. N., & Kamal, A. E. (2004). Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *Wireless communications, IEEE*, 11(6), 6-28.
- [18] K. Pavai, A. Sivagami, and D. Sridharan, "Study of routing protocols in wireless sensor networks, " in *Advances in Computing, Control, Telecommunication Technologies, 2009. ACT '09. International Conference on*, Dec., pp. 522-525.
- [19] LOTF, Jalil Jabari; HOSSEINZADEH, Mehran; ALGULIEV, Rasim M. Hierarchical routing in wireless sensor networks: a survey. En *Computer Engineering and Technology (ICCET), 2010 2nd International Conference on*. IEEE, 2010. p. V3-650-V3-654.
- [20] AL-FARES, Mohammad S.; SUN, Zhili; CRUICKSHANK, Haitham. A hierarchical routing protocol for survivability in wireless sensor network (WSN). En *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. 2009. p. 1406-1410.
- [21] PATIL, Mallanagouda; BIRADAR, Rajashekhar C. A survey on routing protocols in Wireless Sensor Networks. En *2012 18th IEEE International Conference on Networks (ICON)*. IEEE, 2012. p. 86-91.

- [22] KARL, Holger; WILLIG, Andreas. Protocols and architectures for wireless sensor networks. John Wiley & Sons, 2007.
- [23] SYROTIUK, Violet R.; LI, Bing; MIELKE, Angela M. Mobility in Wireless Sensor Networks. Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks, 2009, p. 267
- [24] AKKAYA, Kemal; YOUNIS, Mohamed. An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks. En Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on. IEEE, 2003. p. 710-715.
- [25] NASSER, Nidal; CHEN, Yunfeng. SEEM: Secure and energy-efficient multipath routing protocol for wireless sensor networks. Computer Communications, 2007, vol. 30, no 11, p. 2401-2412.
- [26] PARK, Joongseok; SAHNI, Sartaj. Maximum Lifetime Routing In Wireless Sensor Networks. Computer & Information Science & Engineering, University of Florida, 2005.
- [27] GOYAL, Deepak; TRIPATHY, Malay Ranjan. Routing protocols in wireless sensor networks: a survey. En 2012 Second International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies. IEEE, 2012. p. 474-480.
- [28] SYROTIUK, Violet R.; LI, Bing; MIELKE, Angela M. Heterogeneous Wireless Sensor Networks. Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks, 2009, p. 21
- [29] D. Kumar, T. C. Aseri and R. B. Patel, "EEHC: energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks", Computer Commun., vol. 32, no. 4, pp. 662-667, 2009
- [30] C. Buratti, A. Conti, D. Davide, and R. Verdone, "An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution." in Sensors, vol. 9, no. 9, pp. 6869-6896. August 2009.
- [31] Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey", Comput. Networks J., vol. 38, no. 4, pp. 393-422, 2002
- [32] T. Arampatzis, J. Lygeros and S. Maesis, "A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks", IEEE Intelligent Control, pp. 719-24, 2005
- [33] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring," in Proc. of the 1st ACM WSNA, 2002.

- [34] Sandboxelectronics.com. (2017). MG-811 CO2 Sensor Module | Sandbox Electronics. [online] Available at: <http://sandboxelectronics.com/?p=147> [Accessed 4 Jan. 2017].
- [35] Detector, S., Shield, E., (ADMP401), S., Microphone, E., Arduino, S., (White), B., Straight, B., total), R., Knob, T., Photocell, M. and Square, M. (2017). SparkFun Sound Detector - SEN-12642 - SparkFun Electronics. [online] Sparkfun.com. Available at: <https://www.sparkfun.com/products/12642> [Accessed 5 Jan. 2017].
- [36] Team, S. (2017). Lipo Rider Pro - Seeed Wiki. [online] Wiki.seeed.cc. Available at: http://wiki.seeed.cc/Lipo_Rider_Pro/ [Accessed 6 Jan. 2017].
- [37] Maximintegrated.com. (2017). DS3231 Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal - Maxim. [online] Available at: https://www.maximintegrated.com/en/products/digital/real-time-clocks/DS3231.html/tb_tab3 [Accessed 6 Jan. 2017].
- [38] Arduino.cc. (2017). Arduino - ArduinoBoardNano. [online] Available at: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano> [Accessed 6 Jan. 2017].
- [39] Digi.com. (2017). XBee-PRO DigiMesh 900 Modules Product Detail - Digi International. [online] Available at: <https://www.digi.com/support/productdetail?pid=3518> [Accessed 7 Jan. 2017].
- [40] SBC, R. (2017). Raspberry Pi 3 Model B | Raspberry Pi 3 Model B SBC | Raspberry Pi. [online] Es.rs-online.com. Available at: <http://es.rs-online.com/web/p/kits-de-desarrollo-de-procesador-y-microcontrolador/8968660/> [Accessed 7 Jan. 2017].
- [41] Arduino.cc. (2017). Arduino - ArduinoBoardMega. [online] Available at: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega> [Accessed 9 Jan. 2017].
- [42] CH340, U. (2017). USB to TTL Adapter Based on CH340 – Art of Circuits. [online] Artofcircuits.com. Available at: <http://artofcircuits.com/product/usb-to-ttl-adapter-based-on-ch340> [Accessed 9 Jan. 2017].
- [43] Fazecast.github.io. (2017). jSerialComm. [online] Available at: <http://fazecast.github.io/jSerialComm/> [Accessed 12 Mar. 2017].