



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES Y REDES

**“ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE LA TECNOLOGÍA
LORAWAN APLICADO AL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE
MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE EN LA UNIDAD
EDUCATIVA SANTO TOMÁS APÓSTOL RIOBAMBA”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Tipo: DISPOSITIVO TECNOLÓGICO

Presentado para optar al Grado Académico de:

INGENIERA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES

AUTORAS: CANTUÑA ESCALANTE KATHERINE LIZETH

SATIÁN GUAMÁN DANIELA FERNANDA

TUTOR: Ing. Alberto Arellano Aucancela

Riobamba – Ecuador

2019

@2019, Katherine Lizeth Cantuña Escalante, Daniela Fernanda Satián Guamán.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES Y
REDES

El Tribunal de trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: **ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE LA TECNOLOGÍA LORAWAN APLICADO AL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE EN LA UNIDAD EDUCATIVA SANTO TOMÁS APÓSTOL RIOBAMBA**, de responsabilidad de las señoritas Katherine Lizeth Cantuña Escalante y Daniela Fernanda Satián Guamán, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación quedando autorizado su presentación.

ING. WASHINGTON LUNA
DECANO DE LA FACULTAD DE
INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA _____

ING. PATRICIO ROMERO
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE
INGENIERÍA ELECTRÓNICA, _____
TELECOMUNICACIONES Y REDES

ING. ALBERTO ARELLANO AUCANCELA
DIRECTOR DE TESIS _____

ING. JOSE LUIS MORALES
MIEMBRO DEL TRIBUNAL _____

Nosotras, Katherine Lizeth Cantuña Escalante y Daniela Fernanda Satián Guamán, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación y el patrimonio de la misma, pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Katherine Lizeth Cantuña Escalante

Daniela Fernanda Satián Guamán

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a Dios que es el pilar fundamental para cumplir con nuestros sueños, nuestra inspiración, sabiduría, conocimiento y comprensión. Él ha sido la fuente de fuerza a lo largo de este proyecto. Las palabras nunca pueden expresar nuestro profundo amor y gratitud a nuestros padres que siempre nos han amado incondicionalmente y cuyos buenos valores nos han enseñado a esforzarnos por los sueños que deseamos alcanzar. En especial para nuestras madres, que continúan aprendiendo, creciendo y desarrollándose y que han sido fuente de estímulo e inspiración para nosotras durante toda la vida. De igual manera agradecemos a nuestros mejores amigos que han sido una fuente constante de apoyo e inspiración durante los desafíos de toda nuestra vida universitaria.

Katherine

Daniela

AGRADECIMIENTO

La realización de este trabajo solo fue posible gracias a la colaboración de personas, a quienes deseamos expresar nuestra gratitud.

Al Ing. Alberto Arellano, nuestro tutor del trabajo de titulación, estamos agradecidas por la confianza depositada y por la motivación demostrada en este arduo curso. También estamos agradecidas a los miembros del tribunal por su paciencia y apoyo para superar los numerosos obstáculos que hemos enfrentado a través de la investigación. Finalmente, nos gustaría agradecer a nuestros padres, hermanos y amigos por el amor que nos dieron y fuerzas para hacer este trabajo.

Katherine

Daniela

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	
1. MARCO TEÓRICO.....	6
1.1. Calidad del Aire.....	6
1.1.1. Calidad del Aire en el Ecuador.....	6
1.1.2. Índice de la Calidad del Aire.....	8
1.1.3. Contaminantes.....	9
1.1.3.1. Material Particulado (PM).....	9
1.1.3.2. Dióxido de Azufre (SO₂).....	9
1.1.3.3. Dióxido de Nitrógeno (NO₂).....	10
1.1.3.4. Ozono (O₃).....	10
1.1.3.5. Monóxido de Carbono (CO).....	10
1.2. Redes Inalámbricas de Sensores (WSN).....	11
1.2.1. Definición.....	11
1.2.2. Características.....	11
1.2.3. Topologías.....	12
1.2.3.1. Topología Estrella (Star-Monosalto).....	12
1.2.4. Aplicaciones.....	13
1.2.4.1. Automoción.....	13
1.2.4.2. Control domótico de un edificio.....	13
1.2.4.3. Control de procesos industriales.....	114
1.2.4.4. Cuidado de la salud.....	14
1.2.4.5. Seguridad y vigilancia.....	14
1.2.4.6. Monitorización ambiental.....	14
1.3. Redes de Monitoreo Medioambientales.....	15
1.3.1. Red de monitoreo de la calidad del aire.....	15
1.3.2. Requisitos.....	15
1.3.3. Hardware.....	16

1.3.3.1.	<i>Tarjetas de desarrollo</i>	16
1.3.3.2.	<i>Sensores para el monitoreo de gases</i>	17
1.3.4.	<i>Software</i>	17
1.3.4.1.	<i>Plataformas IoT</i>	17
1.4.	Tecnologías IoT	18
1.4.1.	<i>Tecnologías en objeto conectado</i>	19
1.4.2.	<i>Tecnologías aplicativas en red</i>	19
1.4.3.	<i>Tecnologías Cloud y Big Data</i>	19
1.4.4.	<i>Tecnologías de Aplicación IoT</i>	20
1.4.5.	<i>Tecnologías de comunicación</i>	20
1.4.6.	<i>Tecnologías de amplia cobertura y baja potencia</i>	20
1.4.6.1.	<i>Sigfox</i>	21
1.4.6.2.	<i>ZigBee</i>	21
1.4.6.3.	<i>LoRa</i>	21
1.5.	LoRa	21
1.5.1.	<i>Generalidades</i>	21
1.5.2.	<i>Modulación LoRa</i>	22
1.5.2.1.	<i>Principales propiedades</i>	22
1.5.2.2.	<i>Espectro ensanchado LoRa</i>	23
1.5.2.3.	<i>Trama de datos LoRa</i>	24
1.5.2.4.	<i>Parámetros de Transmisión</i>	25
1.6.	Protocolo LoRaWAN	25
1.6.1.	<i>Características</i>	26
1.6.2.	<i>Arquitectura y Topología</i>	26
1.6.3.	<i>Clases de Dispositivos</i>	28
1.6.3.1.	<i>Dispositivo Clase A</i>	28
1.6.3.2.	<i>Dispositivo Clase B</i>	28
1.6.3.3.	<i>Dispositivo Clase C</i>	28
1.6.4.	<i>Comparativa entre las clases de módulos Lora</i>	29
1.6.5.	<i>Parámetros de rendimiento de una red LoRaWAN</i>	29
1.6.5.1.	<i>Alcance</i>	29
1.6.5.2.	<i>Consumo de corriente de módulos LoRa</i>	30
1.6.5.3.	<i>Bajo Costo</i>	30
1.6.6.	<i>Seguridad</i>	30
 CAPITULO II		
2.	MARCO METODOLÓGICO	31

2.1.	Sistematización del prototipo	31
2.2.	Arquitectura y requerimientos hardware del sistema	33
2.2.1.	<i>Nodo de recolección de datos</i>	33
2.2.1.1.	<i>Bloque de Monóxido de carbono</i>	34
2.2.1.2.	<i>Bloque de Ozono y Dióxido de Nitrógeno</i>	35
2.2.1.3.	<i>Bloque de Dióxido de azufre</i>	35
2.2.1.4.	<i>Bloque de Material particulado</i>	35
2.2.2.	<i>Nodo coordinador</i>	35
2.2.3.	<i>Nodo de almacenamiento</i>	36
2.2.4.	<i>Nodo de monitoreo</i>	37
2.3.	Requerimientos Hardware del sistema de monitoreo de la calidad del aire	38
2.3.1.	<i>SX1278 Ra-01 LoRa</i>	38
2.3.2.	<i>Tarjeta de desarrollo</i>	39
2.3.2.1.	<i>Arduino NANO</i>	39
2.3.2.2.	<i>ESP 8266 NODE MCU</i>	40
2.3.3.	<i>Sensores para medir la calidad del aire</i>	41
2.3.3.1.	<i>Sensor MQ-7 (Monóxido de Carbono)</i>	41
2.3.3.2.	<i>Sensor MQ-131 (Ozono y Dióxido de Nitrógeno)</i>	42
2.3.3.3.	<i>Sensor MQ-136 (Dióxido de Azufre)</i>	43
2.3.3.4.	<i>Sensor DSM501A (Material Particulado)</i>	43
2.3.4.	<i>Conversor</i>	44
2.3.5.	<i>LCD</i>	44
2.3.6.	<i>Fuentes de alimentación</i>	45
2.3.6.1.	<i>LM2596</i>	45
2.3.6.2.	<i>XL4015</i>	46
2.3.7.	<i>Diseño y fabricación de las cajas de protección para el sistema de monitoreo</i>	47
2.3.7.1.	<i>El nodo coordinador</i>	47
2.3.7.2.	<i>Nodo A y Nodo B</i>	47
2.4.	Comunicación SPI	48
2.5.	Pruebas de funcionamiento del sistema	48
2.5.1.	<i>Prueba 1: Rango de funcionamiento de los sensores</i>	49
2.5.2.	<i>Prueba 2: Alcance de la tecnología LoRaWAN</i>	49
2.5.3.	<i>Prueba 3: Consumo energético del dispositivo LoRaWAN</i>	49
2.5.4.	<i>Prueba 4: Análisis de costo</i>	49
2.5.5.	<i>Prueba 5: Grado de acogida del usuario final</i>	49
2.6.	Diagramas de conexión	50
2.6.1.	<i>Conexión de Arduino Nano y LoRa RA01 LORA SX1278</i>	50

2.6.2.	<i>Conexión del sensor MQ-136 y Arduino Nano</i>	51
2.6.3.	<i>Conexión del sensor MQ-7 y Arduino Nano</i>	52
2.6.4.	<i>Conexión del sensor MQ-131 y Arduino Nano</i>	53
2.6.5.	<i>Conexión del sensor DSM501A y Arduino Nano</i>	54
2.7.	Requerimientos Software del sistema de monitoreo de la calidad del aire	55
2.7.1.	<i>Plataforma ThingSpeak IoT</i>	55
2.7.2.	<i>IDE de Arduino</i>	56
2.7.3.	<i>Instalación de la placa para el funcionamiento del ESP8266 NODE MCU</i>	56
2.7.4.	<i>Librerías</i>	59
2.7.4.1.	<i>Instalación de la librería LoRa</i>	59
2.8.	Diagrama de flujo del sistema de monitoreo	60
2.9.	Código para la comunicación de la tecnología LoRa	62
2.9.1.	<i>Receiver</i>	62
2.9.2.	<i>Sender</i>	62
2.9.3.	<i>Sender 2</i>	62
2.10.	Ubicación del sistema de monitoreo de la calidad de aire	63

CAPITULO III

3.	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA	65
3.1.	Instalación del sistema de monitoreo de la calidad del aire	65
3.2.	Almacenamiento de datos en la plataforma IoT ThingSpeak	68
3.2.1.	<i>Visualización de la información en la aplicación móvil</i>	68
3.3.	Funcionamiento del sistema de monitoreo	70
3.4.	Pruebas de funcionamiento	70
3.4.1.	<i>Prueba 1: Funcionamiento de los sensores</i>	70
3.4.1.1.	<i>Calibración del sensor MQ-7</i>	70
3.4.1.2.	<i>Calibración del sensor MQ-131</i>	72
3.4.1.3.	<i>Calibración del sensor MQ-136</i>	73
3.4.1.4.	<i>Rango de funcionamiento de los sensores</i>	74
3.4.2.	<i>Prueba 2: Alcance de la tecnología LoRaWAN</i>	77
3.4.3.	<i>Prueba 3: Consumo energético del módulo LoRa SX1278 Ra-01</i>	80
3.4.4.	<i>Prueba 4: Análisis de costos</i>	81
3.4.5.	<i>Prueba 5: Grado de satisfacción del usuario final</i>	83
3.4.5.1.	<i>Resultados de la encuesta dirigida a los estudiantes de la Unidad Educativa Santo Tomás Apóstol</i>	84
3.5.	Resultados obtenidos del sistema de monitoreo	90
3.5.1.	<i>Análisis en el Nodo A (desde el 25 de febrero al 06 de marzo del 2019)</i>	91

3.5.2. Análisis en el Nodo B (desde el 25 de febrero al 06 de marzo del 2019)	96
CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES	104
GLOSARIO DE ABREVIATURAS	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Programas y proyectos del Plan Nacional de Calidad del Aire	8
Tabla 2-1 Interpretación del Índice de la Calidad del Aire	8
Tabla 3-1 Valores Fijados por la NECA de los Contaminantes PM	9
Tabla 4-1 Valores Fijados por la NECA del Contaminante SO ₂	9
Tabla 5-1 Valores Fijados por la NECA del Contaminante NO ₂	10
Tabla 6-1 Valores Fijados por la NECA del Contaminante O ₃	10
Tabla 7-1 Valores Fijados por la NECA del Contaminante CO	11
Tabla 8-1 Requisitos de una Red de Monitoreo	16
Tabla 9-1 Propiedades clave de la Modulación LoRa.....	23
Tabla 10-1 Parámetros de Transmisión.....	25
Tabla 11-1 Características LoRaWAN	26
Tabla 12-1 Elementos Principales de una Red LoRaWAN	27
Tabla 13-1 Comparación entre las clases de módulos LoRa.....	29
Tabla 1-2 Módulo Ra-01 LoRa SX1278	39
Tabla 2-2 ESP8266 NodeMCU WiFi.....	41
Tabla 3-2 Datos Técnicos del Sensor MQ-7	42
Tabla 4-2 Datos Técnicos del Sensor MQ-131	42
Tabla 5-2 Datos Técnicos del Sensor MQ-136	43
Tabla 6-2 Conexión de Arduino Nano y LoRa RA01 SX1278.....	50
Tabla 7-2 Conexión del sensor MQ-136 y Arduino Nano	51
Tabla 8-2 Conexión del sensor MQ-7 y Arduino Nano	52
Tabla 9-2 Conexión del sensor MQ-131 y Arduino Nano	53
Tabla 10-2 Conexión del sensor DSM501A y Arduino Nano	54
Tabla 11-2 Librerías para el funcionamiento del sistema	59
Tabla 12-2 Latitud y Longitud de la localización de los dispositivos	63
Tabla 1-3 Fuente contaminadora de cada contaminante	75
Tabla 2-3 Rango de operación de los sensores.....	76
Tabla 3-3 Rango de funcionamiento de los módulos LoRa	79
Tabla 4-3 Cálculo del consumo energético del dispositivo LoRa.....	80
Tabla 5-3 Cálculo del consumo energético del dispositivo LoRa SX1278 Ra-01 según mediciones realizadas.	81
Tabla 6-3 Cálculo del consumo energético del módulo CC2480 ZigBee.	81
Tabla 7-3 Detalle de los componentes que conforman el Nodo y Coordinador.	82
Tabla 8-3 Comparación entre el sistema de monitoreo y Smarthuman Air Quality Monitor	83

Tabla 9-3 Datos necesarios para determinar la muestra.....	83
Tabla 10-3 ¿Se siente afectado por los gases emanados de las calderas de la Empresa Cerámica?.....	84
Tabla 11-3 ¿Considera importante tener un sistema de monitoreo de calidad de aire en su Institución funcionando permanentemente?.....	85
Tabla 12-3 ¿Considera importante tener un sistema de monitoreo de calidad de aire en su Institución funcionando permanentemente?.....	86
Tabla 13-3 ¿Considera que la app ThingView es fácil de manejar y comprender?	87
Tabla 14-3 ¿Los datos proporcionados por el sistema de monitoreo muestran los valores en tiempo real?.....	88
Tabla 15-3 ¿Se siente satisfecho con el beneficio brindado por el sistema de monitoreo?.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Topología Estrella	13
Figura 2-1 Tipos de sensores para aplicaciones de electrónica.....	17
Figura 3-1 Componentes Tecnológicos IoT.....	19
Figura 4-1 Forma de la señal chirp lineal	24
Figura 5-1 Arquitectura de Red LoRaWAN.....	27
Figura 1-2 Diseño del sistema de monitoreo.....	32
Figura 2-2 Almacenamiento de información vía WIFI.....	37
Figura 3-2 Aplicativo móvil ThingSpeak IoT.....	38
Figura 4-2 Módulo Ra-01 LoRa SX1278	39
Figura 5-2 Arduino Nano.....	40
Figura 6-2 Tarjeta de desarrollo ESP8266 Node MCU WIFI.....	40
Figura 7-2 Sensor MQ-7	41
Figura 8-2 Sensor MQ-131	42
Figura 9-2 Sensor MQ-136	43
Figura 10-2 Sensor DSM501A	44
Figura 11-2 Convertidor de nivel lógico.....	44
Figura 12-2 Estructura de un LCD.....	45
Figura 13-2 Configuración del módulo LM2596.....	46
Figura 14-2 Configuración del módulo XL4015	46
Figura 15-2 Diseño del nodo coordinador	47
Figura 16-2 Diseño de los nodos de recolección	48
Figura 17-2 Conexión de Arduino Nano y LoRa RA01 LoRa SX1278	50
Figura 18-2 Conexión del sensor MQ-136 y Arduino Nano.....	51
Figura 19-2 Conexión del sensor MQ-7 y Arduino Nano.....	52
Figura 20-2 Conexión del sensor MQ-131 y Arduino Nano.....	53
Figura 21-2 Conexión del sensor DSM501A y Arduino Nano.....	54
Figura 22-2 Interfaz Gráfica de ThingSpeak IoT.....	55
Figura 23-2 Claves API de ThingSpeak IoT.....	56
Figura 24-2 Configuración de la URL para ESP8266	57
Figura 25-2 Configuración para descarga de la placa NODE MCU.....	57
Figura 26-2 Instalación de la placa y librerías ESP8266	58
Figura 27-2 Interfaz de IDE Arduino.....	58
Figura 28-2 Instalación de la librería LoRa	60
Figura 29-2 Cadena de envío de caracteres de los nodos A y B	62

Figura 1-3 Ubicación de los dispositivos dentro de la Unidad Educativa	65
Figura 2-3 Nodos transmisores A, B y Gateway.....	66
Figura 3-3 Colocación del nodo coordinador en la Unidad Educativa	66
Figura 4-3 Colocación del nodo A en la Unidad Educativa.....	67
Figura 5-3 Colocación del nodo B en la Unidad Educativa.....	67
Figura 6-3 Notificación recibida del contaminante.....	69
Figura 7-3 Curva de sensibilidad del sensor MQ-7	71
Figura 8-3 Curva de sensibilidad del sensor MQ-131	72
Figura 9-3 Curva de sensibilidad del sensor MQ-136	74
Figura 10-3 Diagrama de ubicación con sus respectivas distancias del sistema Maestro-Eslavo	78
Figura 11-3 Precio en el mercado de SMARTHUMAN AIR QUALITY MONITOR LORA..	82

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1 Infecciones respiratorias agudas en el Ecuador	7
Gráfico 1-2 Diagrama de bloques del Nodo de recolección de datos	34
Gráfico 2-2 Diagrama de bloques del Nodo coordinador	36
Gráfico 3-2 Diagrama de flujo del sistema de monitoreo	61
Gráfico 4-2 Ubicación de los dispositivos de monitoreo en la Unidad Educativa	64
Gráfico 1-3 Ejemplo de visualización de los gráficos de NO ₂ y SO ₂	68
Gráfico 2-3 Visualización de los polutantes en la interfaz de la aplicación móvil	69
Gráfico 3-3 Obtención de la curva con tendencia potencial para el gas CO	71
Gráfico 4-3 Obtención de la curva con tendencia potencial para el gas O ₃	72
Gráfico 5-3 Obtención de la curva con tendencia potencial para el gas O ₃	73
Gráfico 6-3 Obtención de la curva con tendencia potencial para el gas SO ₂	74
Gráfico 7-3 Rango de funcionamiento de los sensores	77
Gráfico 8-3 Diagrama representativo de la aplicación desarrollada: Maestro-Esclavo	79
Gráfico 9-3 ¿Se siente afectado por los gases emanados de las calderas de la Empresa Cerámica?.....	85
Gráfico 10-3 ¿Considera importante tener un sistema de monitoreo de calidad de aire en su Institución funcionando permanentemente?.....	86
Gráfico 11-3 ¿Es importante para Ud. recibir mensajes de alerta, cuando la contaminación ambiental supera los límites establecidos?.....	87
Gráfico 12-3 ¿Considera que la app ThingView es fácil de manejar y comprender?	88
Gráfico 13-3 Los datos proporcionados por el sistema de monitoreo muestran los valores en tiempo real?.....	89
Gráfico 14-3 Se siente satisfecho con el beneficio brindado por el sistema de monitoreo?	90
Gráfico 15-3 Contaminantes tomados el 25/02/2019.....	91
Gráfico 16-3 Contaminantes tomados el 26/02/2019.....	92
Gráfico 17-3 Contaminantes tomados el 27/02/2019.....	92
Gráfico 18-3 Contaminantes tomados el 28/02/2019.....	93
Gráfico 19-3 Contaminantes tomados el 01/03/2019.....	93
Gráfico 20-3 Contaminantes tomados el 02/03/2019.....	94
Gráfico 21-3 Contaminantes tomados el 03/03/2019.....	94
Gráfico 22-3 Contaminantes tomados el 04/03/2019.....	95
Gráfico 23-3 Contaminantes tomados el 05/03/2019.....	95
Gráfico 24-3 Contaminantes tomados el 06/03/2019.....	96
Gráfico 25-3 Contaminantes del nodo B tomados el 25/02/2019	96

Gráfico 26-3 Contaminantes del nodo B tomados el 26/02/2019	97
Gráfico 27-3 Contaminantes del nodo B tomados el 27/02/2019	97
Gráfico 28-3 Contaminantes del nodo B tomados el 28/02/2019	98
Gráfico 29-3 Contaminantes del nodo B tomados el 01/03/2019	98
Gráfico 30-3 Contaminantes del nodo B tomados el 02/03/2019	99
Gráfico 31-3 Contaminantes del nodo B tomados el 03/03/2019	99
Gráfico 32-3 Contaminantes del nodo B tomados el 04/03/2019	100
Gráfico 33-3 Contaminantes del nodo B tomados el 05/03/2019	100
Gráfico 34-3 Contaminantes del nodo B tomados el 06/03/2019	101

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo por objetivo implementar un sistema de monitoreo de calidad del aire mediante la tecnología LoRaWAN dentro de la Unidad Educativa Santo Tomás Apóstol en la ciudad de Riobamba, donde se utilizaron tres dispositivos, dos de ellos para la recolección de datos de los contaminantes ambientales: Monóxido de Carbono, Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno, Ozono y Material Particulado especificados según la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (NECA), captados por los sensores: MQ7, MQ131, MQ136 y DSM501A; mientras que, el tercer dispositivo está encargado de la comunicación inalámbrica mediante el módulo RA-01 LORA SX1278 que permite la transmisión y recepción de información entre los nodos transmisores y la puerta de enlace (gateway), donde se establecen comunicaciones en un rango de 0 a 60 metros sin pérdidas de paquetes y con niveles adecuados de tasa de transferencia (throughput), latencia y sensibilidad entre redes inalámbricas de área extensa de baja potencia (LPWAN). Los datos son procesados con el módulo ESP8266 NODE MCU que los trasfiere y almacena en tiempo real en un Web Server de la plataforma IoT denominada ThingSpeak, y a su vez son analizados bajo las directrices establecidas por la NECA donde se evaluaron los niveles de contaminantes que inciden en la salud del ser humano los que se muestran a través de un aplicativo móvil. En conclusión, el sistema mostró como resultado que el contaminante con concentraciones elevadas fue el Monóxido de Carbono alcanzando un nivel elevado por las noches, mientras que, los otros contaminantes llegaron a un nivel de alerta por cortos periodos de tiempo no provocando riesgos a la salud. Se recomienda la utilización de la tecnología LoRaWAN para proyectos que requieran comunicaciones a larga distancia, sin línea de vista y bajo consumo energético.

PALABRAS CLAVE: <TELECOMUNICACIONES>, <MEDIO AMBIENTE>, <NIVEL DE CONTAMINACION>, <CALIDAD DEL AIRE>, <ESP8266 NODE MCU (DISPOSITIVO)>, <REDES INALÁMBRICAS>, <PLATAFORMAS IOT>, <RA-01 LORA SX1278 (DISPOSITIVO)>.

ABSTRACT

The objective of this titling work was to implement a system for monitoring air quality using the LoRaWAN technology within the Unidad Educativa Santo Tomás Apóstol located in the city of Riobamba, where three devices were used, two of them for data collection on environmental pollutants: Carbon Monoxide, Sulfur Dioxide, Nitrogen Dioxide, Ozone and Particulate Material specified according to the Ecuadorian Air Quality Norm (EAQN), operated by the sensors: MQ7, MQ131, MQ136 and DSM501A; while, the third device is responsible for wireless communication through the RA-01 LORA SX1278 module that allows the transmission and reception of information between the transmitting nodes and the gateway, where communications are established in a range of 0 at 60 meters without packet loss and with adequate levels of throughput, latency and sensitivity between wireless low power wide area networks (LPWAN). The data is processed in the module ESP8266 NODE MCU that transfers and stores them in real time in a Web Server of the IoT platform called ThingSpeak, and in turn they are analysed under the guidelines established by the EAQN where the levels of contaminants that affect the health of the human beings were evaluated those which are shown through a mobile application. In conclusion, the system showed that the pollutant with high concentrations was the Carbon Monoxide reaching a high level at night, while the other pollutants reached a level of alert for short periods of time not causing health risks. The use of LoRaWAN technology is recommended for projects that require long distance communications, without line of sight and low energy consumption.

KEYWORDS: <TELECOMMUNICATIONS>, <ENVIRONMENT>, <POLLUTION LEVEL>, <AIR QUALITY>, <ESP8266 NODE MCU (DEVICE)>, <WIRELESS NETWORKS>, <IOT PLATFORM>, <RA-01 LORA SX1278 (DEVICE)>.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día el desarrollo del Internet de las cosas (IoT) proporciona una gran cantidad de información útil sobre la vida, el trabajo y el medio ambiente. Usualmente los identificadores de radio frecuencia, las tecnologías de comunicación inalámbrica a corto y largo alcance son los más populares en el ámbito tecnológico asociadas a IoT (Seye et al., 2017, p. 1). Según datos de la “Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)” realizada en el año 2016, los países que tienen más cosas conectadas a Internet se encuentra liderado por Corea con 37,9%, Dinamarca con 32,7% y Suiza con 29% de dispositivos conectados por cada 100 habitantes (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 2017, p. 1).

En los próximos años, se evidenciará más claramente la comunicación y/o conexión de cualquier objeto con la red ofreciendo datos en tiempo real; distintos estudios mostraron que la cantidad de dispositivos IoT usados para 2020 será más alto que el número de seres humanos presentes en la tierra. Las aplicaciones basadas en IoT están bien distribuidas en todo el mundo debido a la existencia de una gran cantidad de casos usados; una aplicación con la que el IoT está revolucionando el mercado es el control ambiental, ya que permite el acceso libre a la información dada por los sensores y sistemas correspondientes (Rob van der Meulen, 2017, p. 1).

Las nuevas tecnologías de la comunicación de IoT se formaron por medio de las redes de bajo consumo denominada Low Power Wide Area Network (LPWAN) que surgieron para cubrir distintas necesidades de conectividad de largo alcance, con una amplia capacidad y bajo consumo de energía, que además están diseñadas para dispositivos pequeños con potencia limitada para uso móvil (Kodali, 2017, p. 1).

A diferencia de las tecnologías Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee las mismas que poseen una comunicación de corto alcance, LPWAN es una tecnología que cuenta con una cobertura más amplia, de bajo costo y con topologías de redes de estrellas las mismas que ofrecieron una plataforma para el desarrollo de modulaciones donde sobresale LoRa (Li et al., 2017, p. 1).

LoRaWAN es un protocolo de especificación integrado en la tecnología LoRa y desarrollado por LoRa Alliance. Utiliza el espectro de radio sin licencia dentro de las bandas ISM y permite una comunicación de baja potencia y amplia gama entre sensores remotos y nodos de pasarelas. Este enfoque basado en estándares permite un despliegue rápido de redes de IoT públicas o privadas que proporcionan comunicaciones de hardware y software seguros, bidireccionales, interoperables y móviles (Varsier and Schwoerer, 2017, p. 1).

Por lo tanto, la tecnología LoRaWAN forma una red robusta para sistemas de monitoreo remoto, ciudades inteligentes, sistemas de medición, industria automotriz y, por lo tanto, teniendo en cuenta el costo, la seguridad, el alcance, el ancho de banda y la potencia (Kodali, 2017, p. 1). Por ser LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) una red inalámbrica reciente, se conocen pocas aplicaciones desarrolladas.

Para ejemplificar se puede manifestar la “Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del Río Tomebamba” (Ávila, 2017, p. 3), que se desarrolló con LoRaWAN en beneficio de un Programa para el Manejo del Agua y Suelo (PROMAS) dando buenos resultados; también, la “Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricos con LoRaWAN en Ambientes Forestales” (Ávila, 2017, p. 1), realizados en la ciudad de Cuenca y “Diseño e Implementación de un Sistema Inteligente para un Edificio mediante IoT Utilizando el Protocolo de Comunicación LoRaWAN” (Rodríguez and López, 2017, p. 1), el cual fue elaborado en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Para hacer el análisis del sistema se pretende diseñar un sistema que monitoree la calidad del aire para medir varios gases polutantes; como se ha percatado, la contaminación del aire no es un problema que se ha generado en la actualidad, más bien desde los últimos años se ha percibido un fuerte inconveniente al tratar de ser solucionado, tanto en países desarrollados y en vías de desarrollo. A pesar de los esfuerzos realizados en Ecuador para diseñar e implementar sistemas de monitoreo de la calidad del aire, estos no son suficientes para cumplir los estándares vigentes a nivel mundial.

Según investigaciones realizadas por la “Organización Mundial de la Salud (OMS)”, las muertes debido a la contaminación atmosférica, tales como el asma y gripe son consideradas como infecciones agudas de las vías respiratorias con un 3%, cáncer de pulmón con un 6%, neumonía con un 11%, enfermedades cardiovasculares y cardiopatía isquémica con un 40%; estas enfermedades provocan un mayor efecto en los niños menores de 5 años y personas de la tercera edad. También, se conoce que la ciudad con más altos niveles de contaminación atmosférica es Onitsha, una ciudad al sureste de Nigeria; cuenta con un total de 600 microgramos por metro cúbico de partículas respirables con referencia a los establecidos por la OMS los mismos que son 20 microgramos por metro cúbico (Organización Mundial de la Salud, 2018, p. 1).

En el Ecuador existen pocas ciudades que disponen de sistemas que monitorean la calidad del aire tal como en Quito “La Red Metropolitana de Monitoreo Ambiental (RMMAQ)” la cual fue desarrollada en el 2003 (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2004, p. 1); Cuenca, Ambato, Esmeraldas y Guayaquil conforman parte del monitoreo atmosférico manejado por la

“Red Normalizado del Ecuador (RED ECUAIRE)” (Ministerio del Ambiente, 2010, p. 1). En definitiva, estos sistemas tienen varios dispositivos electrónicos que logran recoger información diariamente de forma sistemática sobre los contaminantes aéreos producidos en las ciudades y como fin mantener informada a la ciudadanía.

Formulación del Problema

¿La implementación de la tecnología LoRaWAN en un sistema de monitoreo y alertas tempranas de la calidad del aire permitirá mejorar el rendimiento de este?

Sistematización del Problema

- ¿Cuáles son los parámetros necesarios para evaluar el rendimiento de la tecnología LoRaWAN implementada en un sistema de monitoreo?
- ¿Cuáles son los contaminantes que se deben tomar en cuenta para el monitoreo de la calidad de aire en las cercanías de la Empresa Cerámica SA ubicada en la ciudad de Riobamba?
- ¿Es posible obtener un rendimiento idóneo del sistema de monitoreo de la calidad del aire mediante el uso de la tecnología LoRaWAN?

Justificación

Justificación Teórica

En la actualidad, la necesidad de contar con un sistema que permita monitorear la calidad del aire, y permita dar aviso de los niveles de contaminación a la ciudadanía es indispensable. Ya que, en algunos puntos estratégicos de la ciudad de Riobamba no se da la debida importancia al tema de contaminación y a los efectos que éstos pueden provocar en la salud de las personas y en sus actividades diarias.

Para la Organización Mundial de la Salud, (2014, p. 1), los efectos a corto plazo de los contaminantes del aire perjudicarán principalmente a las personas de la tercera edad y niños. Además, mientras la gente siga bajo el efecto de la contaminación por un tiempo prolongado estos presentarán enfermedades graves o crónicas, tales como: el cáncer y la disminución de las funciones del cerebro. Es así que Delgado, (2016, p. 49) señala que:

“Los afectados creen que el principal problema que produce la Empresa “Cerámica S.A”, es un daño al sistema respiratorio, pues han sido víctimas constantes de resfriados y problemas de asma. Por lo cual es necesario que los moradores presenten acciones para detener esta contaminación y poder continuar habitando dentro del sector, de un modo seguro”.

Para ello es preciso mencionar que en las cercanías a la Empresa “Cerámica S.A” hay 1 827 moradores que conforman el barrio “Los Pinos” Delgado, (2016, p. 49), y 2 340 estudiantes que pertenecen a la Unidad Educativa “Santo Tomás Apóstol Riobamba (UESTAR)” (Tello, comunicación personal, 2019), los cuales están expuestos directamente a una cantidad elevada de gases tóxicos produciendo problemas en su salud ya que la contaminación producida por la empresa es constante.

Es por esta razón, que la presente investigación propone elaborar un sistema de monitoreo y alerta temprana como apoyo a la ciudadanía con el fin de proporcionar información veraz acerca de la calidad del aire que se presenta en los alrededores. Este sistema se implementará dentro de las instalaciones de la Unidad Educativa “Santo Tomás Apóstol Riobamba”.

Justificación Aplicativa

Como parte aplicativa, el presente proyecto propone la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del aire, el mismo que constará de 2 nodos conformados por 5 sensores cada uno, estos son: PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO y O₃. Además, el sistema constará un nodo coordinador que realizará las funciones de un Gateway con la tecnología LoRaWAN, el mismo que posee un módulo GSM que permitirá la comunicación con una base de datos en la nube donde se guardará la información recolectada. Finalmente, esta información será presentada en una aplicación móvil que podrá ser descargada desde la Play Store de Android.

Es pertinente mencionar que la tecnología LoRaWAN es una red de consumo ahorrativo que disfruta de los beneficios de la modulación LoRa para la comunicación entre dispositivos de una manera eficaz y económica. Los nodos que forman parte de la red son dispositivos inalámbricos que logran transmitir y recibir información hacia el Gateway, el cual es un mediador entre el servidor y los nodos (Corporación Medium, 2017, p. 1).

Además, este proyecto se sustenta en las líneas de investigación de la ESPOCH 2012–2018 ubicándolo en el Programa de conectividad y telecomunicaciones para la sociedad de la información y conocimiento, el mismo que se encuentra en el área de Tecnologías de la

información, comunicación y procesos industriales (Secretaría General-Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2013, p. 2).

Asimismo, el presente trabajo se encuentra ubicado en las siguientes líneas de investigación: Redes inalámbricas y Simulación de Redes dentro del área de Redes e Integración de Sistemas en la Facultad de Informática y Electrónica (Secretaría General-Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2008, p. 17).

La sustentación finaliza con el Objetivo 3, del Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida, que manifiesta lo siguiente: Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones (Secretaría General-Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2008, p. 64). Dado que, se pretende informar a la comunidad de la contaminación que existe en el aire, así como también generar conciencia acerca de la eliminación de gases tóxicos.

OBJETIVOS

General

Analizar el rendimiento de la tecnología LoRaWAN y aplicarlo al desarrollo de un sistema de monitoreo de calidad de aire.

Específicos

- Revisar bibliográficamente la tecnología de comunicación inalámbrica LoRaWAN y los tipos de parámetros de rendimiento.
- Identificar los polutantes ambientales presentes en la Unidad Educativa “Santo Tomás Apóstol Riobamba” para determinar la calidad del aire
- Diseñar e implementar un sistema de monitoreo de la calidad del aire aplicando LoRaWAN.
- Evaluar el funcionamiento del sistema implementado con la tecnología LoRaWAN para el monitoreo de la calidad del aire en la Unidad Educativa “Santo Tomás Apóstol Riobamba”.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo, se da a conocer los principales contaminantes que determinan la calidad de aire y los problemas que pueden provocar en la salud de la sociedad. Además, se presenta de manera detallada y específica las tecnologías inalámbricas, principalmente de LoRaWAN, a partir de un principio general en la que se manifiesta definiciones de Redes de Sensores Inalámbrico hasta el funcionamiento y aspectos específicos de la modulación LoRa y la forma en la que se puede utilizar para diversas aplicaciones en el campo de la electrónica que está enfocada en mejorar y facilitar la vida de los seres humanos.

Esta investigación se utilizará definir los diferentes dispositivos y herramientas que permitirán la comunicación de la tecnología y así implementar el prototipo electrónico llevando a cabo con los objetivos planteados.

1.1. Calidad del Aire

Es una manera de evaluar las condiciones del aire desde un grado de pureza hasta una calidad crítica perjudicial para la salud humana. Está considerada como un tema significativo a nivel mundial debido a su relación directa con la contaminación atmosférica (Environmental Protection Agency, 2016, p. 1). Es importante poseer una red de monitoreo de la calidad del aire, para la obtención sistemática y diaria de los principales polutantes atmosféricos y así proveer la información necesaria a fin de realizar los respectivos análisis (GeoEcuador, 2008, pp. 38–39).

Cazco Castelli, (2012, p. 10), manifiesta que la calidad del aire, o mejor dicho su contaminación, es el resultado de fenómenos procedentes de distintas causas y efectos asociados a la actividad humana y a la emisión de polutantes al ambiente.

1.1.1. Calidad del Aire en el Ecuador

En la actualidad, Ecuador posee pocas investigaciones acerca de los efectos que produce la contaminación del aire en la salud de las personas; de igual manera los problemas ambientales se presentan en mayor parte en ciudades donde la concentración de habitantes es grande, tales como Quito, Guayaquil y Cuenca. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, el aire limpio es un derecho inalienable de la población para su salud y bienestar, por lo cual es indispensable

que Ecuador incorpore las normas de prevención y control de contaminación atmosférica propuestos en el Plan Nacional de la Calidad del Aire (GeoEcuador, 2008, p. 1; Ministerio del Ambiente, 2012, pp. 1–2).

La contaminación del aire es producida por diversos factores relacionados con las actividades diarias de las personas, sector industrial y automotriz, explotaciones mineras, emisiones de gases tóxicos, entre otros; por lo que las enfermedades generadas por esta problemática se presentan en su mayoría afectando las vías respiratorias (Ministerio del Ambiente, 2012, p. 5). En el gráfico 1-1 se detalla el total de casos registrados de infecciones respiratorias agudas en el Ecuador.

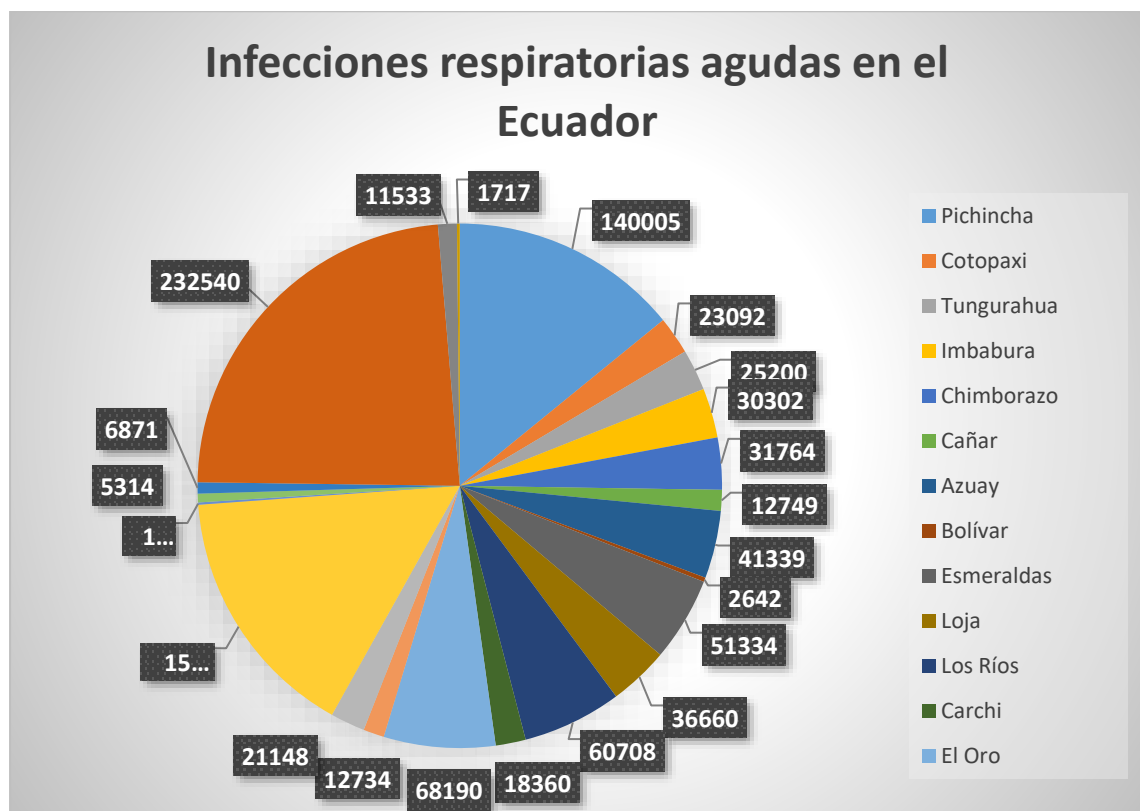


Gráfico 1-1 Infecciones respiratorias agudas en el Ecuador

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012, p. 5)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

El estado ecuatoriano junto al Ministerio del Ambiente ha desarrollado tres programas en beneficio del medio ambiente, estos son: control y vigilancia de la calidad del aire, mejoramiento y prevención de su deterioro y además las medidas a tomar en cuenta en estado de alerta. En la Tabla 1-1 se detalla los programas de acción con sus respectivos proyectos que cuenta el Plan Nacional de Calidad del Aire del Ecuador.

Tabla 1-1 Programas y proyectos del Plan Nacional de Calidad del Aire

Programas	Proyectos
PROGRAMA 1: Control y vigilancia de la calidad del aire	Proyecto 1: Desarrollo del inventario nacional de emisiones.
	Proyecto 2: Sistema nacional de monitoreo y vigilancia de la calidad de aire.
	Proyecto 3: Elaboración de un sistema de información de la calidad del aire (sica).
	Proyecto 4: Implantación del sistema nacional de vigilancia epidemiológica de las enfermedades respiratorias generadas por contaminación del aire.
	Proyecto 5: Modelos predictivos de calidad del aire.
PROGRAMA 2: Mejoramiento de la calidad del aire y prevención de su deterioro	Proyecto 6: Competencias sobre la gestión del recurso aire.
	Proyecto 7: Formación, capacitación e investigación en gestión de la calidad del aire integrados a las políticas nacionales de ciencia y tecnología.
	Proyecto 8: Programa nacional de reducción de emisiones.
	Proyecto 9: Producción de combustibles de mejor calidad para fuentes móviles y fijas.
	Proyecto 10: Sistema nacional de revisión técnica vehicular.
	Proyecto 11: Sistema de participación ciudadana en tema calidad del aire.
PROGRAMA 3: Medidas a ser aplicadas durante los estados de alerta.	Proyecto 12: Implementación de planes de contingencia ante episodios críticos de contaminación del aire.

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2012, p. 14-15)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.1.2. Índice de la Calidad del Aire

Se trata de un conjunto de información que permite determinar de modo eficaz el estado del aire para notificar a la comunidad sus posibles efectos en la salud. La manera más elemental de evaluar la calidad atmosférica es establecer relaciones entre las directrices propuestas por la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (NECA) y la acumulación de polutantes extraídos por los sistemas de monitoreo (Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, 2013, p. 1). En la Tabla 2-1 se muestra los rangos y niveles de la calidad del aire existentes en la atmósfera.

Tabla 2-1 Interpretación del Índice de la Calidad del Aire

Nivel	Bueno (ug/m³)	Alerta (ug/m³)	Alarma (ug/m³)	Emergencia (ug/m³)
CO ₂	0-14999	15000	30000	40000
O ₃	0-199	200	400	600
NO ₂	0-999	1000	2000	3000
SO ₂	0-199	200	1000	1800
PM ₁₀	0-249	250	400	500
PM _{2.5}	0-149	150	250	350

Fuente: (Environmental Protection Agency, 2016, p. 1; Secretaría de Ambiente, 2014, p. 1)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.1.3. Contaminantes

Según la NECA, existen varios polutantes que inciden en la contaminación atmosférica los cuales son fundamentales para evaluar la calidad del aire. A continuación, se detallará cada uno de ellos (Secretaría de Ambiente, 2011, p. 3).

1.1.3.1. Material Particulado (PM)

Es una mezcla de partículas líquidas y sólidas presentes en el aire de diferente composición y tamaño; es por esta razón, que se clasifican en: $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Las más dañinas para la salud son las menores a 10 micrómetros de diámetro (PM_{10}) ya que pueden penetrar y alojarse en el aparato respiratorio causando una disminución de las funciones pulmonares en niños y adultos con problemas de asma (Secretaría de Ambiente, 2013, pp. 1–2). A continuación, en la Tabla 3-1 se detalla los valores fijados por la NECA para el contaminante PM.

Tabla 3-1 Valores Fijados por la NECA de los Contaminantes PM

Contaminante	Tiempo de Muestras
$PM_{2.5}$	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual
	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 24 h
PM_{10}	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual
	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 24 h

Fuente: (Secretaría de Ambiente, 2011, p. 5)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.1.3.2. Dióxido de Azufre (SO_2)

Es un gas irritante e incoloro generado en su mayoría por la quema de fósiles y procesos industriales de combustión. Las personas más vulnerables pueden sufrir de opresiones en el pecho o dificultades para respirar, incluso sometidos a exposiciones cortas (Secretaría de Ambiente, 2013, p. 3). A continuación, en la Tabla 4-1 se detalla los valores fijados por la NECA para el contaminante SO_2 .

Tabla 4-1 Valores Fijados por la NECA del Contaminante SO_2

Contaminante	Tiempo de Muestras
SO_2	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 24 h
	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 10 min

Fuente: (Secretaría de Ambiente, 2011, p. 5)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.1.3.3. Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

Es un gas sumamente tóxico que resulta de la combinación del oxígeno y del Óxido Nítrico; además del transporte vehicular, las fuentes generadoras de este gas son similares a las del SO₂. La tos y la disminución de las funciones pulmonares se presentan principalmente en niños asmáticos debido a la inhalación constante de NO₂ (Secretaría de Ambiente, 2013, p. 4). A continuación, en la Tabla 5-1 se detalla los valores fijados por la NECA para el contaminante NO₂.

Tabla 5-1 Valores Fijados por la NECA del Contaminante NO₂

Contaminante	Tiempo de Muestras
NO ₂	40 µg/m ³ de media anual
	200 µg/m ³ de media en 1 h

Fuente: (Secretaría de Ambiente, 2011, p. 5)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.1.3.4. Ozono (O₃)

Es un contaminante de la atmósfera terrestre producido por la reacción química de los gases emitidos por las fuentes en presencia de la luz solar. El O₃ es un gas muy peligroso por lo que una concentración elevada puede causar problemas al aparato respiratorio, provocando asma y afecciones pulmonares (Secretaría de Ambiente, 2013, p. 1). A continuación, en la Tabla 6-1 se detalla los valores fijados por la NECA para el contaminante O₃.

Tabla 6-1 Valores Fijados por la NECA del Contaminante O₃

Contaminante	Tiempo de Muestras
O ₃	100 µg/m ³ de media en 8 h

Fuente: (Secretaría de Ambiente, 2011, p. 5)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.1.3.5. Monóxido de Carbono (CO)

Es un gas denominado asesino silencioso porque, es un gas que no tiene olor, ni color, no produce irritación en ninguna vía respiratoria; es producido por la incompleta oxidación a causa del carbono durante el proceso de combustión. La intoxicación por CO, es la causa más común de muerte ya que está relacionada al envenenamiento por gases o vapores tóxicos para la salud humana (Secretaría de Ambiente, 2013, p. 1).

Otra causa que genera monóxido de carbono es la mala ventilación o la colocación de dispositivos eléctricos y motores en espacios cerrados o sellados herméticamente. A continuación, en la Tabla 7-1 se detalla los valores fijados por la NECA para el contaminante CO.

Tabla 7-1 Valores Fijados por la NECA del Contaminante CO

Contaminante	Tiempo de Muestras
CO	10000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 8 h
	30000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 1 h

Fuente: (Secretaría de Ambiente, 2011, p. 5)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.2. Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)

Con el transcurso del tiempo, la humanidad ha sido testigo del exponencial crecimiento de las redes de computadores, y siendo específico, las comunicaciones inalámbricas, las cuales han sido partícipes de los continuos avances tecnológicos (Capella, 2010, p. 21). Siendo así que, una red de sensores surge gracias a las posibilidades que nos da la tecnología de crear una red de dispositivos de captura constante, que permita registrar y almacenar una determinada información, transmitir datos de un dispositivo a otro, y después retransmitir toda la información para almacenarla en una localización central (Martínez, 2012, p. 139).

1.2.1. Definición

Para (Fernández et al., 2009, p. 17), una WSN es una red de diminutos dispositivos, equipados con sensores que colaboran en una tarea común, siendo el objetivo principal, la obtención de datos durante su recolección por medio de sensores. Estas redes cuentan con ciertas capacidades sensitivas y de comunicación inalámbrica que permiten formar redes ad-hoc sin infraestructura física preestablecida ni administración central.

1.2.2. Características

López afirma, que sin importar la naturaleza de los nodos que son utilizados en estas redes todos pueden manifestar una lista de características comunes tales como: gran escala debido a que la red puede incrementar el número de nodos, topología variable ya que la posición de los nodos serán ubicados en manera aleatoria con respecto a otros nodos, recursos limitados, cooperación de nodos sensores, comunicación, funcionamiento autónomo, integración con otras tecnologías y

la tolerancia a errores, es decir, la capacidad de un sensor seguir funcionando frente a problemas presentes en el propio sistema (López, 2012, p. 12).

1.2.3. Topologías

La topología o forma lógica de red se refiere a la configuración adoptada de los componentes de la red inalámbrica en busca de la ubicación más adecuada para la transmisión y recepción de información entre los nodos, variando según la función de la aplicación que se le dé a la red. Las principales topologías son: Estrella, Malla e Híbrida (Vela, 2016, p. 2).

1.2.3.1. Topología Estrella (Star-Monosalto)

Esta topología es la principal para coordinar el Gateway o coordinador WSN ya que éste se encuentra en el centro de la red a una distancia variable entre 30 y 100 metros de los nodos, es decir, la información transmitida da un solo salto y solo los nodos sensores están directamente comunicados con el Gateway; además los nodos finales no se pueden comunicar entre ellos, por lo que su información no será visible por los mismos y obligatoriamente deben emitir la información mediante la puerta de enlace (Saigua and Villafuerte, 2003, p. 44).

Así mismo, la puerta de enlace es utilizada para enviar datos al exterior y permitir una monitorización de la red. Una desventaja de esta topología es que su distancia de transmisión entre los dispositivos de la red es limitada, pero su consumo de energía es menor comparado al resto de topologías. En caso de que uno de los nodos tenga congestionado su vía de comunicación, no existe un camino alternativo lo que ocasiona a perder la información (Saigua and Villafuerte, 2003, p. 45).

En la figura 1-1 se observa la topología tipo estrella, donde la letra C representa al nodo coordinador o Gateway y la letra E los nodos finales.

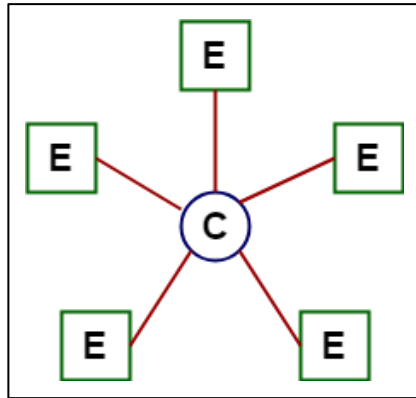


Figura 1-1 Topología Estrella

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.2.4. Aplicaciones

Hoy en día la evolución de las redes de sensores inalámbricas fue originada por un amplio campo de aplicaciones. (Jaramillo et al., 2011, p. 17), pese a que la mayoría de los sensores encontramos aun conectados por medio de cables, en cambio los inalámbricos brindan beneficios significativos como es el disminuir el coste del sistema con respecto a los cableados (Martínez, 2012, p. 32).

A continuación, en este apartado se efectúa un estudio de las diferentes aplicaciones significativas tales como (Martínez, 2012, p. 33):

1.2.4.1. Automoción

Puesto que las WSN poseen características que permitirán que los vehículos se comuniquen unos con otros ya sea dentro de carreteras y autopistas. Para brindar asistencia al conductor y emitir mensajes de alerta de ser necesario, estos sensores podrían colocarse en las ruedas de los vehículos (Martínez, 2012, pp. 32–33).

1.2.4.2. Control domótico de un edificio

El control de oficinas, casas, edificios son un tipo de aplicaciones que lo realizan en un tiempo permanente. La utilización de estos sensores introducidos son capaces de disminuir ampliamente los costes de una monitorización de temperatura y luz para así poder mantener ajustados los sistemas de iluminación y calefacción (Martínez, 2012, p. 33).

1.2.4.3. Control de procesos industriales

Las industrias cuentan con sistemas de control de calidad flexibles y autónomos de mantenimiento, el tamaño y las características de estos sensores les permite instalarlos en diferentes lugares para que ejecuten sus funciones eficientemente y a más de eso brinda soluciones de bajo consumo energético y de bajo costo (Huidrobo, 2014, p. 1; Mudzingwa and Nechibvute, 2013, p. 1).

1.2.4.4. Cuidado de la salud

Estos sensores son esenciales ya que son beneficiosos en la medicina moderna y cuidado de la salud actual y a futuro. Tanto en la industria como en la investigación científica se están desarrollando nuevos sensores como menciona (Hanson et al., 2009, p. 3), que existen tres categorías de sensores aplicados en la medicina y cuidado de la salud tasi como:

- Sensores fisiológicos, en este conjunto están los concernientes a la medición de la presión arterial, electroencefalograma, glucosa en la sangre, electrocardiografía, entre otros.
- Sensores biocinéticos, en este conjunto están los sensores que reconocen los movimientos del cuerpo humano.
- Sensores ambientales, en este conjunto están los que miden los fenómenos ambientales como la humedad, la luz y la temperatura (Campaña and Londoño, 2013, p. 6).

1.2.4.5. Seguridad y vigilancia

Hay sitios que demandan altos niveles de seguridad para impedir algún daño o ataques violentos, así como centrales nucleares, aeropuertos, edificios del gobierno. Gracias a este tipo de red de sensores se obtienen detectar circunstancias que sería imposible detectarlas con una simple cámara (INGENIATIC, 2010, p. 1).

1.2.4.6. Monitorización ambiental

El control ambiental de bosques y océano, son las primeras aplicaciones de las redes de sensores (Martínez, 2012, p. 34). El control de una gran cantidad de sensores en el medio ambiente como temperatura, humedad, incendios, actividad sísmica, ruido es posible obtener los datos a través este sistema de monitoreo.

Por otra parte, las ciencias naturales investigan medir de una manera adecuada el impacto que provocan los seres vivos, algunas de estas es el cambio al medio ambiente. Debido a esto existen aplicaciones de monitoreo ambiental encaminados al seguimiento de especies. Además de esto se puede implementar aplicaciones para el monitoreo de la contaminación que provienen de gases tóxicos (Bravo and Belduma, 2017, p. 37).

1.3. Redes de Monitoreo Medioambientales

La calidad ambiental es la unidad fundamental que considera el estado y disponibilidad de los recursos que posee la naturaleza ya que dependiendo de su estado puede afectar o resultar beneficioso en una determinada población. El estado de los recursos naturales se puede determinar por las directrices apropiadas a partir de la información recolectada a través de las redes de monitoreo del agua, el aire, el suelo y otros análisis ambientales. Por medio de estas directrices, se puede implantar un sistema que nos permita tener un diagnóstico de las actividades y los problemas que se presenta en el entorno (Corporación Eléctrica del Ecuador, 2013, p. 1; Observatorio, 2010, p. 1).

1.3.1. Red de monitoreo de la calidad del aire

La calidad del aire, es un factor que mide el contenido de una concentración de componentes presentes en el aire, el cual debe cumplir normas que beneficien la salud y el bienestar de la población y mantener el equilibrio ecológico (Biblioteca Virtual de SDE, 2003, p. 116). La calidad del aire debe controlarse para restringir la suspensión de compuestos tóxicos en el ambiente cuya presencia contribuya a enfermedades, ya que se la considera como un gran reto sanitario debido a la importancia de la contaminación del aire (Matus and Lucero, 2002, p. 1).

La contaminación atmosférica es el mayor inconveniente que inquieta a todos los países desarrollados y en vías de desarrollo del mundo. Se relaciona con los efectos perjudiciales en la salud humana que van desde simples síntomas respiratorios hasta la muerte, afectando principalmente a las personas de la tercera edad, niños menos a cinco años y población con nivel de vida bajo (Matus and Lucero, 2002, p. 2).

1.3.2. Requisitos

La red de monitoreo tiene como propósito construir un sistema organizado, dinámico y general de medición de los contaminantes presentes en dicho ambiente, almacenamiento de los datos en un periodo determinado, transmisión de estos con exactitud y precisión, procesamiento y

visualización de la información hacia el usuario. Además, es importante tomar en cuenta las limitaciones y los recursos disponibles por lo que es necesario lograr un equilibrio entre los costos de los equipos, la complejidad y el desempeño de los mismos (Dirección General de Salud Ambiental, 2005, pp. 8–9; Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2018, pp. 1–2).

Para la implementación de una red de monitoreo los requisitos mínimos que debería cumplir se presentan en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1 Requisitos de una Red de Monitoreo

Requisito	Descripción
Acceso	El lugar para la ubicación de la estación de monitoreo debe ser accesible en todo momento, el mismo que proporcione la facilidad en los procesos de operación.
Seguridad	Debe tener el acceso limitado de los agentes exteriores.
Materiales	Los equipos de monitoreo activo y automáticos deben contener materiales de aluminio y acero, además deben estar protegidas las caídas de rayos, efectos de lluvia, etc.
Suministro eléctrico	Debe poseer para los equipos que se encuentren funcionando y futuras instalaciones.

Fuente: (Dirección General de Salud Ambiental, 2005, pp. 21–22)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.3.3. Hardware

Es un término que se refiere a todas las partes físicas que conforman los dispositivos electrónicos el mismo que se limita a tareas específicamente diseñadas las mismas que trabajan de forma independiente y son sencillas.

1.3.3.1. Tarjetas de desarrollo

Hay diferentes tipos de tarjetas de desarrollo como Raspberry Pi, módulo ESP8266, Arduino, entre otras; estos dispositivos cumplen con funciones como la lectura y transmisión de datos. Posteriormente, se detallarán las tarjetas de desarrollo que en la actualidad tienen un bajo costo en el mercado y se ajustan adecuadamente a las necesidades del prototipo.

Arduino

Es una plataforma open-source (código abierto) basada en hardware y software interactivos con el usuario, pero con gran capacidad lo cual facilita su uso en diversos proyectos electrónicos. Posee una placa con un microcontrolador que se lo programa usando el lenguaje de programación

Arduino y el entorno de desarrollo Arduino, que incluyen todos los controladores para ser utilizados en los distintos dispositivos Arduino (ARDUINO, 2013, p. 1).

1.3.3.2. Sensores para el monitoreo de gases

Del procesamiento de los datos únicamente se encarga la plataforma, sin embargo, estos datos son detentados de dispositivos externos a la plataforma, que se denominan sensores. Hoy en día estos dispositivos sensores son utilizados en diferentes aplicaciones según sus especificaciones y requerimientos. Sin embargo, hay algunos tipos de sensores que se utilizan según sus necesidades con frecuencia en la mayoría de las aplicaciones de electrónica. En la figura 2-1 se puede apreciar los tipos de sensores.



Figura 2-1 Tipos de sensores para aplicaciones de electrónica

Fuente: (Pardal, 2017, p. 20)

1.3.4. Software

Es un conjunto de instrucciones o programas que le indican a un dispositivo o equipo que ejecute tareas establecidas y específicas, además es capaz de implementar algoritmos que permiten que los dispositivos completen trabajos muchos más complejas.

1.3.4.1. Plataformas IoT

Hoy en día, las plataformas son un elemento importante en el desarrollo y la implementación de medios interconectados con la Internet. Las plataformas IoT facilitan el registro de datos recolectados por sensores o dispositivos electrónicos, el enrutamiento en tiempo real de la información y la monitorización de dispositivos. Cabe mencionar que cuenta con una interfaz en la que los usuarios pueden interactuar y visualizar en el sistema IoT (Quiñones et al., 2017, p.

334). Por ende, gracias a estas características el prototipo será estimado en una de estas tres plataformas IoT:

Ubidots

Es un servicio en la nube que permite recopilar y almacenar información extraída de sensores que pueden ser enviados desde Raspberry Pi, Arduino y HW, la misma que puede ser visualizada en tiempo real mediante una página web o aplicación móvil (UbiMaker, 2015). A más de eso tiene la capacidad de permitir a los administradores del sistema elaborar una imagen en tiempo real de los sistemas.

Phant

Desarrollada por SparkFun Electronics es una herramienta de código libre diseñada para la recopilación de datos de IoT. Para comenzar con el proceso de almacenamiento de datos se requiere de una clave privada y una pública para poder registrar la información en el servidor mediante cualquier servidor web. Pese a que presta un servicio gratuito tiene como restricción la capacidad máxima de 50MB (Quiñones et al., 2017, pp. 334–335).

ThingSpeak

Es una plataforma de análisis de IoT que tiene la capacidad de añadir y representar datos en la nube en tiempo real. ThingSpeak provee graficas en vivo de los datos recopilados por dispositivos electrónicos. Con la habilidad de ejecutarse en la herramienta MaTLab, en el cual se puede realizar el procesamiento de la información (ThingSpeak, 2016). Las principales características de esta plataforma son las siguientes:

- Utiliza los principales protocolos de IoT.
- Visualiza datos en tiempo real.
- El análisis de IoT es automático por medio de horarios.
- Creación de prototipos sin realizar la configuración en servidores.

1.4. Tecnologías IoT

El Internet de la Cosas (IoT) hace referencia a los dispositivos y objetos que están conectados a Internet, con el fin de recoger e intercambiar información para tener interconectividad e interacción entre las personas y estos objetos (Gutiérrez, 2014, p. 19); por lo que algunas de las

tecnologías de IoT se emplean para dar solución a problemas de gestión de redes inteligentes, mediciones inteligentes y las plataformas de iluminación inteligente de las calles (Accent Systems, 2012, p. 1).

Según Pardal, las principales tecnologías IoT son cinco, las mismas que se presentan en la figura 3-1:

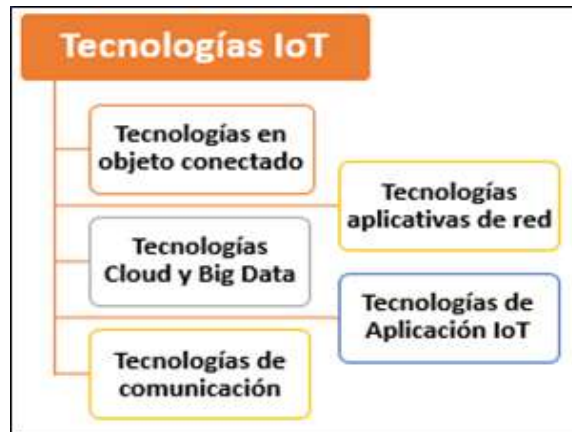


Figura 3-1 Componentes Tecnológicos IoT

Fuente: (Pardal, 2017, p. 20)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.4.1. Tecnologías en objeto conectado

A más de la comunicación los objetos conectados están basados en plataformas hardware y software, por lo que requieren de un proceso de programación. Las arquitecturas de microcontroladores conocidas en el mercado establecidos por núcleos ARM, PIC, AVR, 808x o los nuevos ARM-Cortex M entre otros (Cruz et al., 2015, pp. 136–137).

1.4.2. Tecnologías aplicativas en red

Como son: ZigBee, Z-Wave, 6LowPAN o UDP, las mismas que ofrecen conectividad de los objetos con las plataformas IoT por medio de un encaminamiento de forma correcta. Pero en muchos casos son poco eficaces en despliegues amplios (Pardal, 2017, p. 21).

1.4.3. Tecnologías Cloud y Big Data

Una de las principales aplicaciones es en la que todos los dispositivos conectados interactúan de una forma con la plataforma IoT con los sistemas de computación en la nube, brindando así datos informativos. La directriz de evolución de estas soluciones pasa por integrar distintos niveles de

inteligencia IoT, de modo que sean capaces de realizar un análisis de datos y aprendizaje propios del Big Data con destrezas eficientes con objetos inteligentes, recolección e información, gestión de red, entre otras (Pardal, 2017, p. 21).

1.4.4. Tecnologías de Aplicación IoT

Desde el enfoque de los objetos conectados por IoT, las redes de comunicaciones, cloud y una serie de procesos asociados e interfaces abiertos. El entorno aplicativo no se muestra únicamente como un compendio de listas, tablas, gráficas y controles que permitan interactuar con los elementos de niveles inferiores. La interacción con el usuario final habrá de proporcionar valor añadido y ser de utilidad (Pardal, 2017, p. 21).

1.4.5. Tecnologías de comunicación

Poseen un alto consumo energético con gran cobertura como lo son las tecnologías tradicionales Wifi, 2G, 3G o 4G. Por otra parte, las tecnologías Bluetooth, BLE (Bluetooth Low Energy) o NFC (Near-field Communication), en la actualidad están siendo más utilizadas porque se manifiestan como un punto importante en el área personal. Por otro lado tenemos las tecnologías nativas para el IoT con características como largo alcance, muy bajo consumo energético y un bajo coste en los dispositivos denominadas Low Power Wide Area Network (LPWAN) así como Sigfox, LoRa o Weightless entre otras, las cuales son la base del desarrollo del IoT (Pardal, 2017, pp. 20–21).

1.4.6. Tecnologías de amplia cobertura y baja potencia

Para apoyar la comunicación entre objetos físicos o cosas, existe una necesidad clara de un nuevo tipo de tecnología de comunicación inalámbrica que admita la gran cantidad de dispositivos conectados a una potencia y un costo mucho más bajos (Lee and YI, 2016, p. 21). Las redes LPWAN se han mostrado como la solución para el despliegue de soluciones IoT (Zona, 2017, p. 1), son un tipo de red con una distancia de comunicación de largo alcance, bajo consumo de energía y bajo costo del dispositivo (Lee and YI, 2016, p. 21).

LPWAN se concentra en la conectividad IoT para dispositivos (finales) que consumen poca energía, envían y reciben mensajes cortos a velocidades bajas y cuentan con ciclos de trabajo cortos.

1.4.6.1. Sigfox

Es un tipo de red de telecomunicaciones administrada, la misma que no necesitara que el usuario administre las actividades de instalación o mantenimiento. Esta red está diseñada para enviar mensajes cortos siempre y cuando sean necesarios (Netrotter Connecting Things, 2014, p. 1).

1.4.6.2. ZigBee

ZigBee es un estándar de red de malla inalámbrica utilizado para conectar sensores, así como instrumentación y sistemas de control. ZigBee es un protocolo abierto y global, basado en paquetes y diseñado para proporcionar una arquitectura fácil de usar (Tomar, 2011, p. 2). Zigbee es considerado como un sistema ideal para redes domóticas, específicamente diseñado para reemplazar la proliferación de sensores/actuadores individuales (Universidad Nacional Autónoma de México, 2012, p. 61).

1.4.6.3. LoRa

Permite extender redes privadas o disponibles por operadores para sus propias redes IoT. Estas redes inteligentes son eficientes en la información recopilada por los sensores que están implementados en la red. Es así como a través de las LPWAN los sensores inteligentes controlan la eficiencia de los generadores de energía renovable que se conectan a la red, como pueden ser paneles solares o aerogeneradores que normalmente están conectados por medio de la tecnología de red LoRa (Gerber, 2017, p. 1).

1.5. LoRa

1.5.1. Generalidades

LoRa (Long Range), es un sistema de comunicaciones inalámbricas de largo alcance, promovido por LoRa Alliance. Este sistema tiene como objetivo ser utilizable en dispositivos a batería de larga duración, donde el consumo de energía es de suma importancia. LoRa puede referirse comúnmente a dos capas distintas: una capa física que utiliza la técnica de modulación de radio CSS (Chirp Spread Spectrum); y un protocolo de capa MAC (LoRaWAN), aunque el sistema de comunicaciones LoRa también implica una arquitectura de red de acceso específica (Augustin et al., 2016, p. 4).

La ventaja de LoRa radica en la capacidad de largo alcance de la tecnología. Una única puerta de enlace o estación base puede cubrir ciudades enteras o cientos de kilómetros cuadrados. El alcance depende en gran medida del entorno u obstrucciones en una ubicación determinada, pero LoRa y LoRaWAN™ tienen un presupuesto de enlace mayor que cualquier otra tecnología de comunicación estandarizada (LoRa Alliance™, 2015, p. 4).

1.5.2. Modulación LoRa

LoRa es un sistema de telecomunicaciones de largo alcance y de baja potencia para IoT (Augustin et al., 2016, p. 16), establecida en la Modulación CSS, la misma que se utiliza para comunicaciones espaciales y militares gracias a largas distancias de comunicación y robustez a la interferencia. LoRa es la primera en efectuar esta modulación de manera comercial (Ordoñez, 2017, p. 23).

La capa física usa la modulación LoRa, una tecnología patentada con un protocolo MAC (Augustin et al., 2016, p. 16). Que también se la conoce como "modulación chirp", debido a que LoRa revela que el elemento portador de información es el desplazamiento de frecuencia al comienzo del símbolo y el chirrido es similar a un tipo de portadora por medio de una inspección minuciosa. Por esta razón, LoRa se describe mejor como modulación chirp de cambio de frecuencia (FSCM) (Vangelista, 2017, p. 1).

1.5.2.1. Principales propiedades

En la modulación LoRa, gracias a la modulación de espectro expandido chirp y la alta sensibilidad del receptor, ofrece una buena resistencia a la interferencia. Las pruebas de campo muestran que LoRa puede ofrecer una cobertura de red satisfactoria de hasta 3 km en un área suburbana con viviendas residenciales densas. LoRa es por lo tanto muy adecuado para redes de bajo consumo, bajo rendimiento y largo alcance (Augustin et al., 2016, pp. 16–17). A continuación, SEMTECH Corporation manifiesta que existen ocho propiedades clave de la modulación LoRa, las mismas que son presentadas en la Tabla 9-1.

Tabla 9-1 Propiedades clave de la Modulación LoRa

Propiedades	Descripción
Ancho de banda escalable	La modulación LoRa es escalable y de ancho de banda. Se puede usar tanto para salto de frecuencia de banda estrecha como para aplicaciones de secuencia directa de banda ancha. A diferencia de los esquemas de modulación de banda ancha o banda estrecha existentes, LoRa se puede adaptar fácilmente para cualquier modo de operación.
Envolvente constante / baja potencia	Al igual que FSK, LoRa es un esquema de modulación de envolvente constante, lo que significa que las mismas etapas de PA de alta eficiencia y bajo consumo de energía se pueden reutilizar sin modificaciones.
Alta robustez	Debido al alto producto BT ($BT > 1$) y su naturaleza asíncrona, una señal LoRa es muy resistente tanto a los mecanismos de interferencia dentro de banda como fuera de banda.
Resistencia a trayectos múltiples / desvanecimiento	El pulso chirp es relativamente de banda ancha y, por lo tanto, LoRa ofrece inmunidad a multitrayecto y desvanecimiento, por lo que es ideal para su uso en entornos urbanos y suburbanos, donde dominan ambos mecanismos.
Doppler resistente	El desplazamiento Doppler causa un pequeño cambio de frecuencia en el pulso de LoRa que introduce un cambio relativamente despreciable en el eje de tiempo de la señal de banda de base. LoRa es ideal para enlaces de comunicaciones de datos móviles, tales como sistemas inalámbricos de monitoreo de presión de neumáticos, aplicaciones de paso por línea, etc.
Capacidad de largo alcance	Para una potencia de salida y rendimiento fijos, el presupuesto del enlace de LoRa excede el del FSK convencional. Cuando se toma en conjunto con la robustez comprobada de los mecanismos de interferencia y desvanecimiento, esta mejora en el presupuesto del enlace puede traducirse fácilmente en x4 y más allá del aumento en el alcance

Fuente: (SEMTECH Corporation, 2015b, pp. 11–12)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.5.2.2. Espectro ensanchado LoRa

La modulación LoRa, derivada de CSS, funciona con un tono de radio frecuencia (RF) a lo largo del tiempo de una manera muy lineal. Las transmisiones LoRa funcionan, destrozando los ruidos en diferentes lugares en términos de tiempo y frecuencia para codificar un símbolo. Una de las características importantes de LoRa es la capacidad de generar una señal chirp que varía constantemente en frecuencia. En la Figura 4-1 se observa la forma de la señal chirp lineal a lo largo del tiempo en frecuencia (Avila, 2017, p. 11; Ruano Lin, 2016, pp. 13–14).

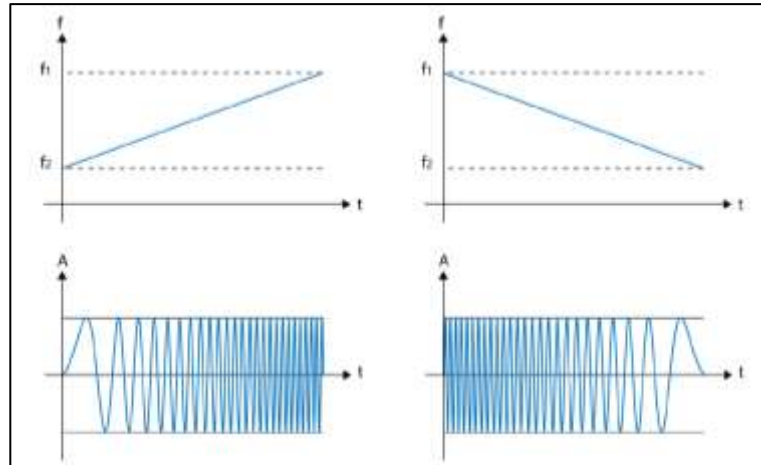


Figura 4-1 Forma de la señal chirp lineal

Fuente: (Ruano Lin, 2016, p. 11)

Precisando el ancho de banda y el factor de dispersión seleccionado, el tiempo del barrido de frecuencia tomará más o menos tiempo. Un incremento en el factor de propagación seleccionado duplicará el tiempo del símbolo, por lo que un símbolo enviado a SF12 será 32 veces más largo que un símbolo enviado en SF7. La disminución de complejidad del receptor es un beneficio de este método, debido a que las alteraciones de temporización y frecuencia entre la transmisión y receptor son similares (Avila, 2017, p. 11).

1.5.2.3. Trama de datos LoRa

El sistema de comunicaciones inalámbricas LoRa generalmente se describe en dos capas diferentes, una de estas es la capa física la cual se basa en la modulación de radio Chirp Spread Spectrum (CSS) que es una técnica del espectro ensanchado (SSM). SSM con una cadena de alta frecuencia codifica la señal base, que irradia la señal base mediante un mayor ancho de banda, disminuye el consumo energético e incrementa la resistencia a las interferencias electromagnéticas, la otra es un protocolo de capa MAC (LoRaWAN), sin embargo, el sistema de comunicaciones LoRa de igual modo cuenta con una arquitectura específica de red de acceso (Borrero et al., 2018, p. 2; Pickering, 2017a)

Fue desarrollada por Semtech, la capa física LoRa de la forma que admite un extenso alcance con un bajo consumo de potencia. Dependiendo del país en donde esté funcionando el enlace trabaja en las bandas ISM de 433, 868 o 915 MHz. Por otra parte, la carga útil de cada transmisión es capaz de modificar de 2-255 octetos y la velocidad de datos puede adquirir hasta 50 Kbps en el punto en que se utiliza la agregación de canales (Borrero et al., 2018, pp. 2–3).

1.5.2.4. Parámetros de Transmisión

En esta sección se da a conocer detalladamente los parámetros de transmisión LoRa sobre el consumo de energía y la fiabilidad de la comunicación. Las contribuciones específicas sobre los parámetros de transmisión son: potencia de transmisión (TP), frecuencia de portadora (CF), factor de dispersión (SF), ancho de banda (BW) y tasa de codificación (CR) para sintonizar enlace rendimiento y consumo de energía (Bor and Roedig, 2017, pp. 1–3). A continuación, en la Tabla 10-1 se detalla cada uno de los parámetros con sus características específicas.

Tabla 10-1 Parámetros de Transmisión

Parámetros	Descripción
Potencia de transmission (TP)	En un radio LoRa la TP se puede ajustar de -4 dBm a 20 dBm, en pasos de 1 dB, pero debido a los límites de implementación del hardware, el rango a menudo se limita a 2 dBm a 20 dBm. De igual manera con las limitaciones del hardware, los niveles de potencia superiores a 17 dBm solo se pueden emplearse en un ciclo de trabajo del 1%.
Frecuencia portadora (CF)	La frecuencia central es la CF que es capaz de programar en pasos de 61 Hz entre 137 MHz y 1020 MHz. Dependiendo del chip LoRa específico, este rango logra estar limitado a 860 MHz a 1020 MHz.
Factor de dispersión (SF)	La relación entre la tasa de símbolos y la velocidad de los chips es el SF. Un factor de dispersión más alto aumenta la relación de señal a ruido (SNR), y por lo tanto la sensibilidad y el alcance, pero también aumenta el tiempo de uso del paquete. El número de fichas por símbolo se calcula como 2^{SF} .
Ancho de banda (BW)	El ancho de las frecuencias en la banda de transmisión es BW. A mayor BW da una tasa de datos más alta, pero una sensibilidad más bajo. Un BW menor proporciona una mayor sensibilidad, pero una velocidad de datos menor. Menor peso corporal también requiere cristales más precisos (menos ppm). Aunque el ancho de banda se puede seleccionar en un rango de 7.8 kHz a 500 kHz, una red LoRa típica opera a 500 kHz, 250 kHz o 125 kHz.
Tasa de codificación (CR)	CR es la tasa de FEC utilizada por el módem LoRa que brinda protección hacia ráfagas de interferencia, y puede establecerse en 4/5, 4/6, 4/7 o 4/8. Las radios con diferentes CR todavía consiguen comunicarse entre sí si emplean un encabezado explícito, ya que el CR de la carga útil se almacena en el encabezado del paquete, que siempre está codificado en CR 4 / 8.

Fuente: (Bor and Roedig, 2017, p. 2)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

1.6. Protocolo LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de LPWAN diseñado para conectar de forma inalámbrica objetos que trabajan a batería a Internet en redes regionales, nacionales o globales. El protocolo incluye

funciones que admiten comunicaciones bidireccionales de bajo costo, móviles y seguras para IoT, máquina a máquina (M2M), ciudad inteligente y aplicaciones industriales (LoRa Alliance™, 2015, p. 1).

1.6.1. Características

El protocolo LoRaWAN está optimizado para un bajo consumo de energía y está diseñado para escalar desde una única instalación de puerta de enlace hasta grandes redes globales con miles de dispositivos que pueden funcionar con tecnologías de recolección de energía que permiten la movilidad y brindan verdadera facilidad de uso al IoT (Gaybor and Maridueña, 2017, p. 18; LoRa Alliance™, 2015, p. 1). En la Tabla 11-1 se detalla las principales características, según Silva et al.

Tabla 11-1 Características LoRaWAN

Características	Detalles
Topología	Estrella en estrella
Modulación	SS Chirp
Date Rate	290bps - 50kbps
Presupuesto de enlace	154 dB
Tamaño del paquete	154 dB
Duración de la batería	8 ~ 10 años
Eficiencia energética	Muy alto
Seguridad / Autenticación	Si (32 bits)
Rango	2-5 km urbano / 15 km suburban / 45 km rural
Inmunidad a la interferencia	Muy alto
Escalabilidad	Si
Movilidad / Localización	Si

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

Fuente: (Silva et al., 2017, p. 3)

1.6.2. Arquitectura y Topología

La arquitectura de LoRaWAN se presenta en una topología tipo estrella ya que preserva la vida útil de la batería cuando se obtiene una comunicación a largo alcance, en la que el Gateway (puerta de enlace) sirve de intermediario para la comunicación entre los nodos finales y el servidor de red. Los nodos finales utilizan una conectividad inalámbrica bidireccional en diferentes bandas de frecuencia y velocidades de datos para conectarse con las puertas de enlace, en cambio éstas

se conectan al servidor de red mediante conexiones IP estándar (LoRa Alliance™, 2015, pp. 8–9). En la Figura 5-1 se observa la arquitectura clásica de una red LoRaWAN.

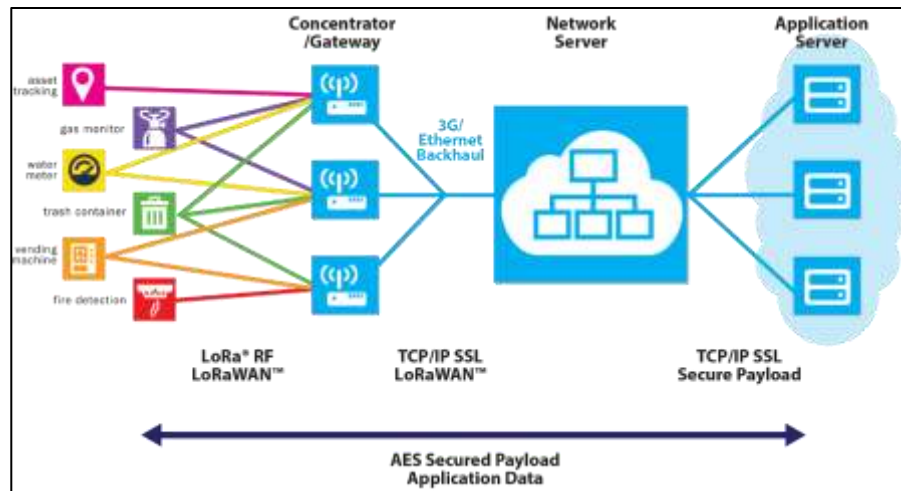


Figura 5-1 Arquitectura de Red LoRaWAN

Fuente: (LoRa Alliance™, 2015, p. 8)

En la Tabla 12-1 se observa los elementos principales con los que cuenta la red LoRaWAN, los mismos que son: End Nodes, Gateway, Network Server y Application Server; a continuación, se detallará la descripción de estos.

Tabla 12-1 Elementos Principales de una Red LoRaWAN

ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN
End Nodes (Nodos Finales)	Son dispositivos finales que recogen los datos proporcionados por el sensor y tienen comunicación con el Servidor de Aplicaciones; son los encargados de transmitir la información al Gateway utilizando comunicación inalámbrica de un solo salto.
Gateway (Puerta de Enlace)	Es un puente bidireccional que se encarga de recibir los datos transmitidos por los nodos finales y enviarlos mediante una conexión IP al Servidor de Red.
Network Server (Servidor de Red)	Establece una conexión segura al momento de conectarse a una o varias puertas de enlace y elimina los mensajes duplicados que llegan desde el Gateway; si los datos corresponden a su red, los reenvía al Servidor de Aplicaciones.
Application Server (Servidor de Aplicaciones)	Recopila, examina y gestiona los datos de los nodos finales y determina sus acciones.

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

Fuente: (Pickering, 2017b, p. 1)

1.6.3. Clases de Dispositivos

1.6.3.1. Dispositivo Clase A

Son también denominados dispositivos optimizados para bajo consumo. Los nodos son los que inician la comunicación, enviando paquetes de datos al servidor en un intervalo de tiempo predeterminado y escuchando los paquetes de respuesta durante otro intervalo también predeterminado (Rodríguez Maribona et al., 2017, p. 24). Además, permiten una comunicación bidireccional entre dispositivos y puerta de enlace (Córdoba, 2017, p. 15).

Este modelo de comunicación implica que los dispositivos solo tienen que estar activos durante cortos intervalos de tiempo para así ahorrar más energía, pero también las transmisiones se realizan con más retraso y más lentamente (Rodríguez Maribona et al., 2017, p. 10).

1.6.3.2. Dispositivo Clase B

Los dispositivos de clase B reducen los problemas de latencia de los de clase A, permitiendo que el Gateway también pueda iniciar la comunicación (Córdoba, 2017, p. 15). También son considerados como una extensión de la Clase A, utilizando una adición de ventanas, de forma que pueda recibir mensajes programados para un enlace descendente desde el servidor (Rodríguez Maribona et al., 2017, p. 24).

Si al Gateway aún le quedan datos por enviar, puede mandar una señal de activación (beacon) al nodo para que se ponga en modo de escucha de paquetes y pueda recibir el resto de la información. Esto reducirá la latencia de la comunicación respecto al modelo A (Rodríguez Maribona et al., 2017, p. 24).

1.6.3.3. Dispositivo Clase C

Se trata de una extensión de la clase A que mantiene la recepción de ventanas abiertas mientras este transmitiendo, esto permite que la comunicación sea de bajo ratio de latencia, pero consume mucha más energía que los dispositivos de clase A (Córdoba, 2017, p. 16). Es decir, los dispositivos de clase C reducen al máximo posible la latencia de la comunicación, haciendo que los nodos estén siempre esperando recibir paquetes del Gateway, y solo dejan de escuchar cuando cambian a modo transmitir (Rodríguez Maribona et al., 2017, p. 24).

1.6.4. Comparativa entre las clases de módulos Lora

En la tabla 13-1 se analizó las mismas especificaciones en las tres clases de dispositivos y se llegó a la conclusión que la opción que cumple con los requerimientos del prototipo es la Clase C, gracias a su comunicación bidireccional que brinda, a la transmisión de datos que inicia en cualquier momento y a su bajo costo en el mercado.

Tabla 13-1 Comparación entre las clases de módulos LoRa

Dispositivos vs Características	LoRa clase A	LoRa clase B	LoRa clase C
Latencia	Baja Latencia	Baja latencia	Sin latencia
Comunicación	Bidireccional	Bidireccional con ranuras de recepción programadas.	Bidireccionales
Transmisión	Mensajes unicast	Mensajes unicast y multicast.	Mensajes unicast y multicast
Payload	Pequeñas cargas útiles, largos intervalos.	Pequeñas cargas útiles, largos intervalos.	Pequeñas cargas útiles.
Protocolos de Comunicación	El dispositivo final inicia la comunicación. El servidor se comunica con el dispositivo final en un periodo de tiempo.	El servidor puede iniciar la transmisión a intervalos fijos.	El servidor puede iniciar la transmisión en cualquier momento. El dispositivo final está recibiendo constantemente.

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

Fuente: (RF Wireless World, 2012)

1.6.5. Parámetros de rendimiento de una red LoRaWAN

El rendimiento de la red es fundamental para determinar cuándo la red presenta problemas. Según (Rohde & Schwarz, 2017), desde la perspectiva del Internet de las Cosas, los parámetros de rendimiento de las redes LPWAN como lo es LoRaWAN, definen a continuación los factores para determinar su rendimiento, los mismo que son:

1.6.5.1. Alcance

Menciona a la dimensión geográfica de una red, la misma que tiene la capacidad de modificar la cantidad de dispositivos conectados con la tecnología LoRaWAN estableciendo la comunicación a largas distancias.(Hernández, 2014, p. 2).

1.6.5.2. Consumo de corriente de módulos LoRa

El consumo de energía de un dispositivo LoRa por transmisión a lo largo del tiempo es una medida significativa del rendimiento. Un requisito clave para cualquier dispositivo IoT es tener un bajo consumo energético o una batería de larga duración. Los dispositivos normalmente cambian al modo de reposo para la mayoría de su vida útil y solo se encienden en modo operativo para transmitir datos mediante LoRa. Mientras se opera en modo de reposo, el dispositivo casi no consume energía (Rohde&Schwarz, 2017, p. 38).

1.6.5.3. Bajo Costo

El bajo costo de un sistema de aplicaciones IoT desarrollado con redes LPWAN una de ellas LoRaWAN, es uno de los parámetros que determinan el rendimiento de la tecnología debido a que provoca un gran beneficio en la industria ya que por ser una tecnología nueva cuenta con características y clases de dispositivos diferentes a los existentes en el mercado (Rohde & Schwarz, 2017, p. 43).

1.6.6. Seguridad

Es de vital importancia para cualquier LPWAN incorporar seguridad. En este caso, LoRaWAN utiliza dos capas de seguridad: una para la red y otra para la aplicación. La seguridad de la red garantiza la autenticidad del nodo en la red, mientras que la capa de seguridad de la aplicación garantiza que el operador de red no tenga acceso a los datos de la aplicación del usuario final.

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se detalla el diseño metodológico investigativo, deductivo y experimental para el desarrollo de la propuesta tecnológica, así como también se especifican los requerimientos necesarios tanto de software como de hardware, en donde se definen los elementos, características y arquitectura de red más adecuados para realizar el diseño del sistema de sensores inalámbricos planteado, considerando el buen rendimiento y asegurando una buena relación costo-beneficio; de igual manera se especifica el funcionamiento que desempeña la red para dar solución al problema descrito en el presente trabajo de titulación.

De la misma forma, se pretende dar solución a los objetivos planteados en el presente trabajo de titulación como realizar una amplia investigación acerca de la tecnología de comunicación inalámbrica LoRaWAN y los respectivos parámetros para analizar su rendimiento, identificar los polutantes ambientales presentes en el lugar de aplicación mencionado con anterioridad para determinar la calidad del aire que encaminen al diseño e implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del aire aplicando la tecnología inalámbrica LoRaWAN y finalmente, con la revisión bibliográfica realizada se evalúa el correcto funcionamiento del sistema implementado.

2.1. Sistematización del prototipo

El sistema de monitoreo se basa en dos nodos anexados a un nodo coordinador mediante la tecnología LoRaWAN, la cual permite la recepción de datos de niveles de polutantes que inciden en el medio ambiente a través de sensores inalámbricos que recolectan un nivel de contaminante representados a través de un intervalo de voltaje y almacenados en una base de datos mediante la gestión de aplicativos móviles (App).

El esquema que se pretende cumplir se puede apreciar en la figura 1-2, donde se enfatiza los nodos de recolección de datos, de procesamiento, monitoreo y almacenamiento, con una comunicación LoRaWAN.

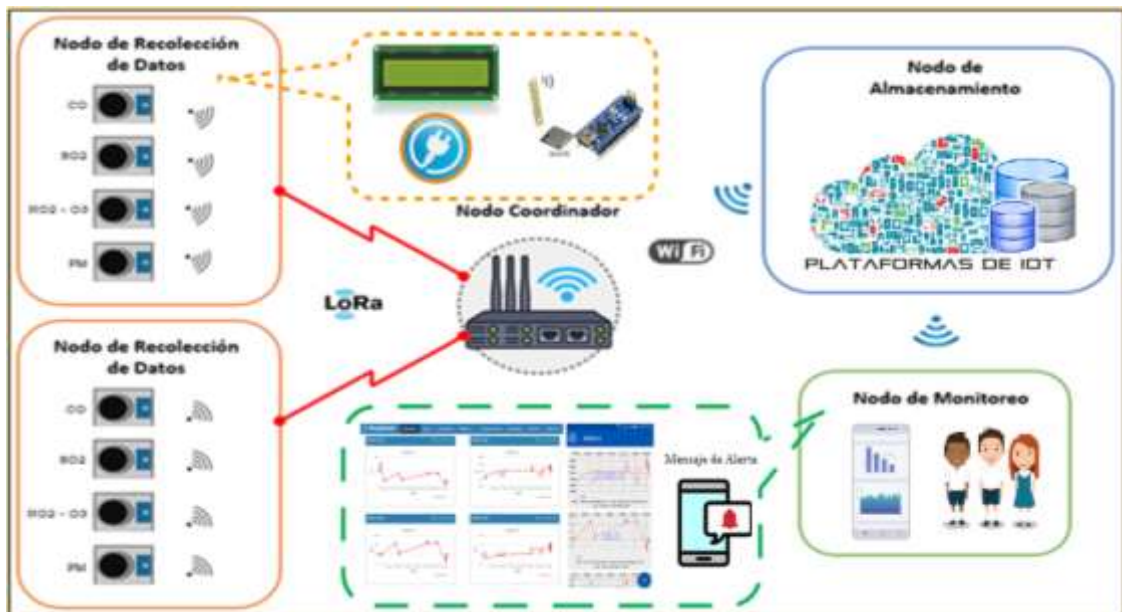


Figura 1-2 Diseño del sistema de monitoreo

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

Para el sistema de monitoreo de los contaminantes se utiliza cuatro nodos, el primero cumple con la función de captación de gases contaminantes para ser procesados de forma inalámbrica con la tecnología LoRaWAN que permite la comunicación a largas distancias. Esta información será enviada a una base de datos mediante un hotspot para ser monitorizada en tiempo real con cualquier periférico de salida conectado a la Web.

El presente trabajo de titulación se basa en la tecnología LoRaWAN ya que posee mejores parámetros con referencia a las otras tecnologías de comunicación inalámbrica, debido a que el rango de cobertura es de largo alcance; por esta razón es ideal la aplicación en áreas extensas con irregularidades geográficas.

LoRaWAN permite alta tolerancia con interferencias ya que cuenta con una sensibilidad en sus antenas de hasta -146dB. A más de contar con una frecuencia de operación poco convencional en nuestro medio (915Mhz América, 868 Mhz Europa, 433 Mhz Asia y otros países de América) (Sabas, 2017, p. 1). La distribución de información con varios dispositivos llega a una capacidad aproximada de mil nodos, con un bajo consumo de energía constituyendo una característica primordial de las IoT.

2.2. Arquitectura y requerimientos hardware del sistema

Una vez establecido el esquema base del proyecto de titulación, se identifica cuatro nodos; los cuales cumplen funciones específicas como recolección, comunicación, almacenamiento y monitoreo. Estos nodos se identifican a continuación:

- Nodo de recolección de datos
- Nodo coordinador
- Nodo de almacenamiento
- Nodo de monitoreo

2.2.1. *Nodo de recolección de datos*

El nodo de recolección de datos se constituye por cuatro sensores de distintos gases, los cuales fueron seleccionados según la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental determinado por la NECA, cumpliendo con uno de los objetivos establecidos en el trabajo de titulación (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2004).

Además, el objetivo pretende cumplir los lineamientos establecidos por la NECA que son:

- Preservar la salud de las personas
- Preservar la calidad del aire en el medio ambiente,
- El bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general.
- Establecer límites máximos permisibles de contaminantes en el aire a nivel de suelo.
- Proveer los procedimientos y métodos destinados a la determinación de las concentraciones de contaminantes en el aire.

Para garantizar la calidad del aire se utilizan sensores enfocados a los principales contaminantes del aire estos son: monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado (PM).

Los cuatro sensores por utilizarse son especificados en el diagrama de bloques del gráfico 1-2 donde, cada uno de ellos forman una red de sensores de bajo consumo energético y bajo costo basado en una topología estrella.

Este nodo se encarga de la adquisición de valores de nivel de polutantes que posee el ambiente en tiempo real determinando a través de mediciones de voltaje que son enviados hacia el nodo coordinador.

En el diagrama de bloque del gráfico 1-2 se puede apreciar la concepción de la adquisición de información a través de los sensores identificados en los bloques de nodos de sensores que cuenta con:

- Bloque de Monóxido de carbono
- Bloque de Ozono y Dióxido de Nitrógeno
- Bloque de Dióxido de Azufre
- Bloque de Material Particulado

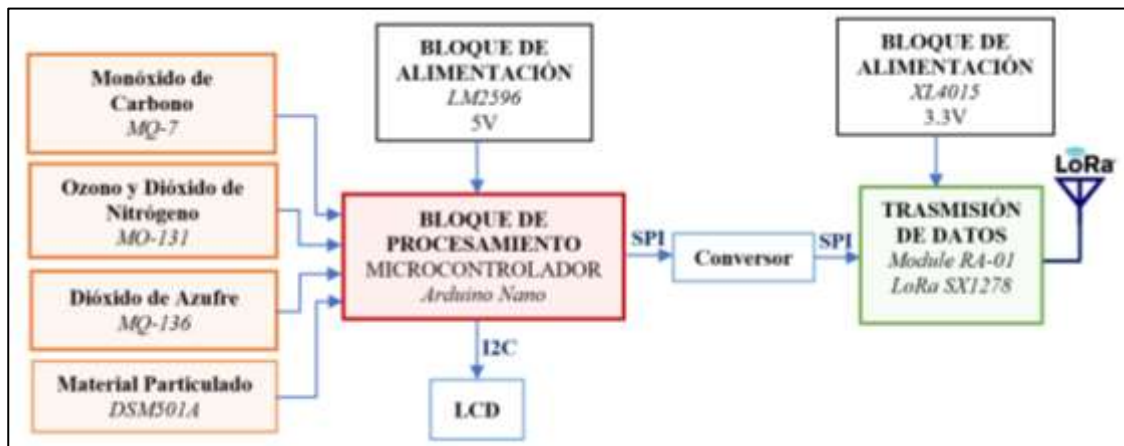


Gráfico 1-2 Diagrama de bloques del Nodo de recolección de datos

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.2.1.1. Bloque de Monóxido de carbono

Este bloque se encarga de la adquisición de los niveles de concentración del gas de monóxido de carbono a través del sensor MQ-7, el cual coloca un valor de voltaje determinado cuando existen una concentración de gas CO, dicha concentración no debe sobrepasar 15000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

El MQ-7 va a hacer capaz de percibir un gas específico, debido a que posee una alta sensibilidad configurable para un único contaminante y no permite que influya otro tipo de gas en el valor del sensor.

2.2.1.2. Bloque de Ozono y Dióxido de Nitrógeno

En el bloque de ozono y dióxido de nitrógeno se perciben dos gases, el dispositivo que permite percibir dos polutantes en tiempo real se denomina MQ-131, siendo considerado un contaminante muy peligroso debido a que se puede encontrar en lugares urbanos, en el centro de la ciudad y en diferentes medios de transporte. Este proceso ocurre por la oxidación del nitrógeno atmosférico (Urrego, 2006, pp. 21, 42).

2.2.1.3. Bloque de Dióxido de azufre

Este sensor MQ-136 que se encuentra en el bloque de dióxido de azufre permite obtener un valor del ácido sulfúrico que hay en el ambiente, esto se produce por causa de la lluvia ácida en la atmosfera. Estos procesos contaminantes se generan a partir de los procesos de combustión de combustibles fósiles, todos estos derivados del petróleo presentes en los mecanismos de sistemas autónomos o automáticos para ejecutar un proceso de arranque (Urrego, 2006, p. 44).

2.2.1.4. Bloque de Material particulado

En este bloque se analizan las partículas sólidas y líquidas que están presentes en el medio ambiente, cada una de estas partículas poseen un diámetro muy pequeño, lo cual se clasifica debido a su naturaleza, ya sea mayor o menor a 2 micras de diámetro (Urrego, 2006, p. 47).

2.2.2. Nodo coordinador

En el presente nodo se ejecuta el proceso de comunicación del sistema, es decir, será la interfaz que permita el enlace para el envío y recepción de forma simultánea desde el nodo de adquisición de datos hasta lograr comunicar con la base de datos o nodo de almacenamiento.

El diagrama de bloques que se muestra en el gráfico 2-2, detalla cada uno de los componentes a utilizar para crear el nodo coordinador, mediante el cual se va a unir los dos canales de comunicación o tecnologías como es:

Nodo de adquisición de datos	→	Nodo coordinador (Tecnología LoRaWAN)
Nodo coordinador	→	Nodo de almacenamiento (Tecnología WIFI)

Cada uno de estos bloques representa la función a realizar en el funcionamiento del canal de comunicación, el mismo que se encuentra alimentado con 5 voltios para el funcionamiento de

todos los componentes; la recepción de información de los sensores mediante la tecnología LoRa y el proceso que se desarrolla en las dos placas de desarrollo para la transmisión de datos hacia el nodo coordinador.

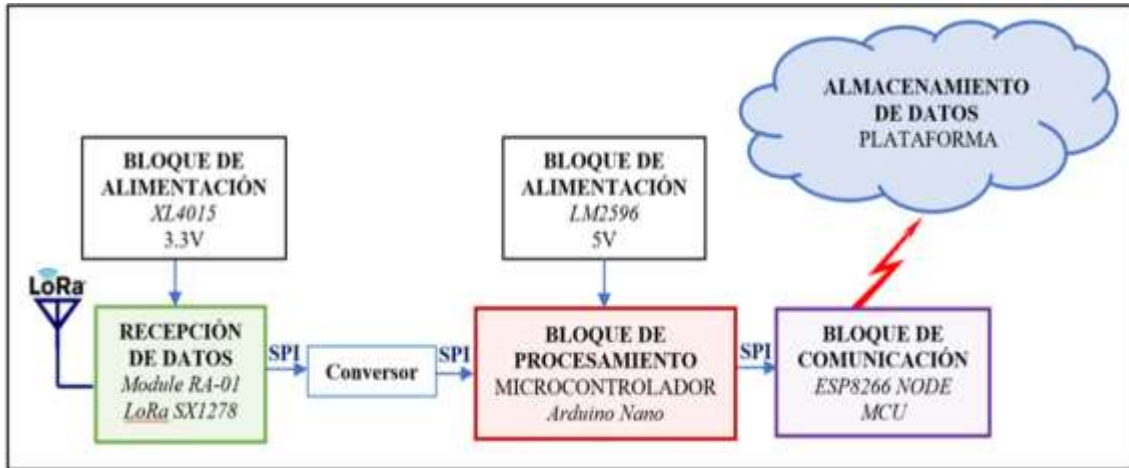


Gráfico 2-2 Diagrama de bloques del Nodo coordinador

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.2.3. *Nodo de almacenamiento*

Debido a la gran cantidad de datos generados por los sensores no es posible almacenarlos en memorias internas de los dispositivos, por lo cual se utiliza una base de datos para lograr el almacenamiento de grandes datos de información con el mismo contexto. El almacenamiento se genera de forma automatizada para su posterior uso.

La adquisición de datos desde el nodo coordinador hasta el nodo de almacenamiento se puede realizar bajo diversos métodos de comunicación entre ellos: cableado o de forma inalámbrica. El método que se va a emplear es bajo el estándar IEEE 802.11, debido a la fácil comunicación que existe entre un sin número de dispositivos, como se puede apreciar en la figura 2-2.

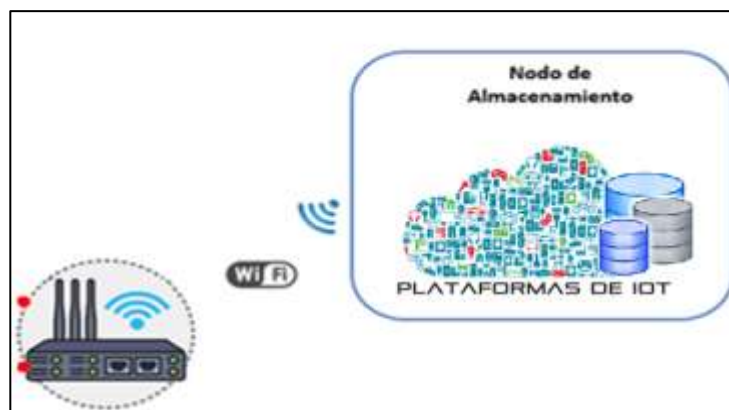


Figura 2-2 Almacenamiento de información vía WIFI

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

El servidor que contenga la base de datos deber estar conectado a la WEB ya que no solo se pretende el análisis del contaminante que existe en el aire, sino también aportar con estos datos para la utilización en nuevos proyectos siendo una plataforma de datos libres.

2.2.4. *Nodo de monitoreo*

Este nodo se encarga de la visualización de cada uno de los niveles de contaminante bajo cualquier software, aplicación o periférico de salida que permita representar un dato de forma numérica o simbólica. Por tal motivo este aplicativo debe ser compatible con una amplia gama de plataformas, de forma que garantice la compatibilidad.

Por lo cual la mejor manera es hacer uso de las actuales herramientas existentes en el mercado informático, entre las más destacables tenemos Aplicativos Phant, ThingSpeak, Ubidots entre otras. Debido a que es un producto que presente gran escalamiento, se procederá a crear y diseñar un aplicativo móvil (App) para una gestión de información de los contaminantes en tiempo real con indicativos de alta concentración de contaminante en el ambiente.

En la figura 3-2 se puede apreciar la imagen del aplicativo móvil que va a hacer utilizada en el presente trabajo de titulación, la cual será basada bajo la plataforma de ThingSpeak IoT que posee una gestión de monitoreo para dispositivos Android y Apple.



Figura 3-2 Aplicativo móvil ThingSpeak IoT

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.3. Requerimientos Hardware del sistema de monitoreo de la calidad del aire

A continuación, se especifican las principales características de los elementos que constituyen los dispositivos del prototipo y una breve explicación de su selección.

2.3.1. SX1278 Ra-01 LoRa

En el presente proyecto, el módulo SX1278 Ra-01 LoRa cumple con las características del prototipo en vista de que, posee ventajas en antibloqueo y adopta tecnología de espectro ensanchado de Lora para proyectar una comunicación de largo alcance (1000 metros) y alta fiabilidad.

Cabe mencionar que en la red LoRaWAN, el dispositivo utilizado pertenece a la Clase C ya que permite la comunicación bidireccional, pero brinda menor ahorro de energía puesto que siempre están en modo de recepción, es decir recibe los datos en cualquier momento, por tal razón en esta clase se requiere el uso de una fuente de alimentación externa para conservar la transmisión. Además, este módulo consta de una antena primavera, como se puede observar en la Figura 4-2.

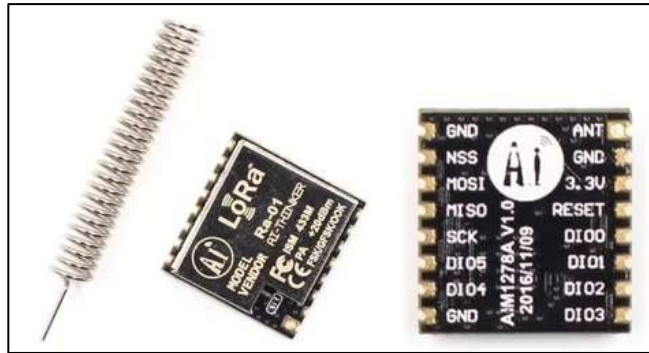


Figura 4-2 Módulo Ra-01 LoRa SX1278

Fuente: (Amazon.in, 2017, p. 1)

Estos elementos están diseñados para cumplir con los protocolos y normas como IEEE 802.15.4g y WMBus. Los transponders RF se emplean para diversas aplicaciones de la banda Médica, Científica e Industrial (ISM) que cuentan con lectores de medidores a larga y corta distancia para diversos elementos naturales. Ver Anexo A. A continuación, en la tabla 1-2 se pueden apreciar las características específicas del módulo.

Tabla 1-2 Módulo Ra-01 LoRa SX1278

Parámetros	Rangos
Estándar Inalámbrico:	433 MHz
Rango de frecuencia:	420-450MHz
Distancia:	10-15 Km
Comunicación SPI:	Half-duplex
RF de potencia de salida:	+ 20dBm-100mW
Sensibilidad:	hasta -148dBm
Rango de fuente de alimentación:	2.5-3.7 V

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.3.2. Tarjeta de desarrollo

2.3.2.1. Arduino NANO

Para elegir la tarjeta de procesamiento para el presente proyecto, se indagaron las diferentes características técnicas por lo que el microcontrolador Arduino cumple con los requerimientos para el prototipo. En vista de que es un dispositivo pequeño, completo y sencillo de utilizar.

Para el bloque de procesamiento se opta por un Arduino Nano principalmente por el bajo costo y tamaño del dispositivo, por el número de terminales de conexión tanto digital como analógica,

por la compatibilidad con otros módulos y cabe resaltar que posee una velocidad de procesamiento de 16MHz, cómo se puede observar en la figura 5-2.

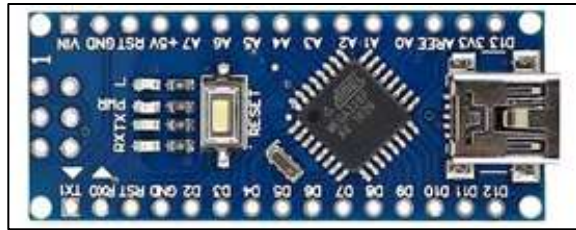


Figura 5-2 Arduino Nano

Fuente: (RobotShop, 2018, p. 1)

2.3.2.2. ESP 8266 NODE MCU

Es una tarjeta de desarrollo creada bajo la interfaz LUA, enfocada a las IoT con características semejantes al hardware Arduino; además, logra un ahorro de energía puesto que se basa en la tecnología ESP8266 que aprovecha los recursos disponibles en la Internet y cuenta con capacidades que permiten integrarse con sensores y dispositivos a través de los terminales GPIO (ESPRESSIF, 2016, p. 2), como se puede observar en la figura 6-2; el datasheet con sus especificaciones y configuración previa en la interfaz de arduino se puede ver en el Anexo B.



Figura 6-2 Tarjeta de desarrollo ESP8266 Node MCU WIFI

Fuente: (HETPRO, 2009)

De igual manera, es capaz de trabajar en entornos industriales gracias a su bajo costo y amplio rango de operación de temperatura, en la tabla 2-2 se puede observar las características específicas de la tarjeta de desarrollo.

Tabla 2-2 ESP8266 NodeMCU WiFi

Parámetros	Rangos
Voltaje de Alimentación (USB):	5V DC
Voltaje de Entrada/Salida:	3.3V DC
Frecuencia de Reloj:	80MHz/160MHz
Conectividad:	IEEE 802.11 b/g/n
Conversor:	USB-Serial CH340

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.3.3. *Sensores para medir la calidad del aire*

En esta sección se detalla las características principales de los sensores que conforman el dispositivo tecnológico:

2.3.3.1. *Sensor MQ-7 (Monóxido de Carbono)*

Este sensor es sencillo de utilizar y capaz de detectar concentraciones de gas CO en cualquier sitio desde 20 a 2000 ppm, además, cuenta con una alta sensibilidad y un ligero tiempo de respuesta. La salida del sensor es una resistencia analógica. Ver Anexo C.

El circuito de accionamiento es muy viable; todo lo que requiere realizar es alimentar la bobina del calentador con 5V, añadir una resistencia de carga y conectar la salida a un ADC (GRobotronics, 2011, p. 1). La representación del dispositivo se muestra en la figura 7-2.



Figura 7-2 Sensor MQ-7

Fuente: (Fábrica Digital, 2018)

En la tabla 3-2 se puede visualizar las especificaciones técnicas del sensor MQ-7, es decir, los parámetros de funcionamiento a los cuales se debe acondicionar al sensor.

Tabla 3-2 Datos Técnicos del Sensor MQ-7

PARÁMETROS	RANGOS
Voltaje de Operación:	5V DC
Corriente consumida	70mA
Resistencia de carga:	Regulable
Resistencia de calentamiento:	330hm
Resistencia a un determinado gas se calcula con (Rs):	$R_s = (V_c / V_{RL} - 1) \times R_L$
Rango de Concentración:	20 a 2000ppm
Temperatura de funcionamiento:	-10 a 50 °C

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.3.3.2. Sensor MQ-131 (Ozono y Dióxido de Nitrógeno)

El sensor posee una alta sensibilidad al ozono y también al NO₂. Cuando hay la presencia de gas ozono, la conductividad del dispositivo se incrementa junto con la concentración de gas que permite un aumento. Este sensor utiliza un circuito eléctrico sencillo, que tiene como fin la conversión del cambio de conductividad para pertenecer a la señal de salida de la concentración de gas (Sensorsportal, 2015, p. 1). Posteriormente, en la figura 8-2 se muestra el sensor.



Figura 8-2 Sensor MQ-131

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

Por otro lado, a más de ser un dispositivo económico, también cuenta con una alta sensibilidad al ozono en un extenso rango de cobertura. Ver Anexo D. En la tabla 4-2 se puede visualizar algunas características específicas del mismo.

Tabla 4-2 Datos Técnicos del Sensor MQ-131

Parámetros	Rangos
Voltaje de Operación:	5V
Rango de Concentración:	10 a 1000ppm
Resistencia de carga:	Ajustable
Resistencia de calentamiento:	310hm ± 30hm
Sensibles a:	Dicloro y Dióxido de Nitrógeno
Temperatura de Operación:	20°C ± 2°C

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.3.3.3. Sensor MQ-136 (Dióxido de Azufre)

El sensor de gas MQ136 asume una alta sensibilidad al gas dióxido de azufre (SO₂) y puede controlar el vapor orgánico. Cuando se presenta el gas SO₂, la conductividad del sensor incrementa a medida que aumenta la concentración de gas y para modificar el cambio de conductividad para retribuir a la señal de salida de la concentración de gas, se lo puede realizar mediante un circuito simple. En la figura 9-2 se observa el sensor que mide dióxido de azufre.



Figura 9-2 Sensor MQ-136

Fuente: (Alibaba, 2018)

Adicionalmente, el sensor de dióxido de azufre (MQ136) tiene ventajas tales como, una larga vida útil, es un dispositivo de bajo costo y simple circuito de manejo, etc. Ver anexo E. En la tabla 5-2 se puede apreciar algunas de las características del sensor.

Tabla 5-2 Datos Técnicos del Sensor MQ-136

Parámetros	Rangos
Voltaje de Operación:	5V
Rango de Concentración:	10 a 1000ppm
Resistencia de carga:	Ajustable
Resistencia de calentamiento:	31Ohm
Tiempo de precalentamiento:	Más de 24 horas

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.3.3.4. Sensor DSM501A (Material Particulado)

El módulo sensor de bajo coste DSM501A que se puede observar en la figura 10-2, es un sistema de medición capaz de detectar muestras de polvo y partículas finas en suspensión en el ambiente según las directrices, cuyo diámetro es inferior a 2.5 µm para PM2.5 y menos de 1 µm para PM1.0 (Diyprojects, 2017, p. 1; Samyoung S&C, 2016, p. 2); por lo que la proporción detectable de la partícula se limita a un mínimo de 0.7 µm.

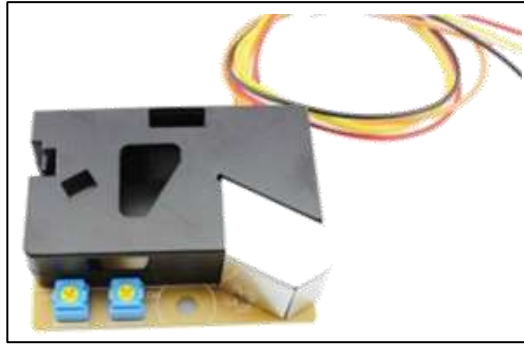


Figura 10-2 Sensor DSM501A

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

Además, se puede destacar que este circuito posee una salida PWM que se encarga de controlar la velocidad de la ventilación para la percepción de partículas en la atmosfera. (Samyoung S&C, 2016, p. 3). El mismo que está conformado por un diodo emisor y un fototransistor que están ubicados en el interior del módulo, en donde, es capaz de captar la luz reflejada del polvo que está presente en el aire. Ver Anexo F.

2.3.4. *Conversor*

Es un dispositivo pequeño que reduce de forma fiable las señales de 5V a 3.3V y aumenta de 3.3V a 5V al mismo tiempo. Cada convertidor de nivel tiene la capacidad de convertir 4 pines en el lado alto a 4 pines en el lado bajo con dos entradas y dos salidas para cada lado como se puede observar en la figura 11-2, son utilizados para I2C o SPI gracias a que funcionan con microcontroladores como Arduino, Pi, Raspberry entre otro (Indiamart, 2014). Es por esta razón que se utilizó este elemento debido a que el ESP8266 trabaja con 3.3V y el Arduino Nano a 5V.

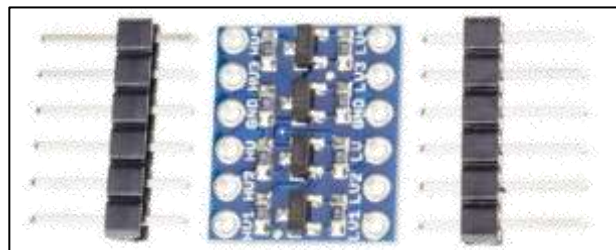


Figura 11-2 Convertidor de nivel lógico

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.3.5. *LCD*

Asimismo, en la elaboración del proyecto se utiliza las pantallas de cristal líquido (LCD) de 16x2, las mismas que son fácil de enlazar con varios circuitos y dispositivos electrónicos. Las pantallas

LCD constan caracteres por línea, como se muestra en la figura 12-2. Este dispositivo tiene dos registros, a saber, Comando y Datos.

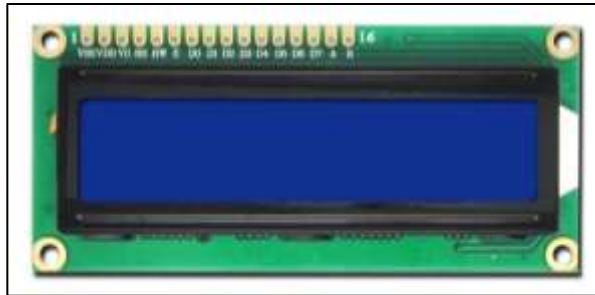


Figura 12-2 Estructura de un LCD

Fuente: (Lelong, 2017)

Se utilizó un LCD 16x2 en cada uno de los nodos de recolección de datos, en los que se puede observar los datos que están siendo captados en tiempo real que están presentes en el aire.

2.3.6. Fuentes de alimentación

En la fase de alimentación se utilizó dos fuentes diferentes para alimentar el microcontrolador y el módulo RF Transceptor Lora Ra-01 Sx1278, debido a las características determinadas que requieren cada uno de ellos.

2.3.6.1. LM2596

En la primera parte de alimentación del prototipo, se empleó una fuente de alimentación conocida como fuentes switching o LM2596, la finalidad de colocar este elemento en el circuito que constituirá el nodo de recolección de datos y el nodo coordinador, es que se tiene la posibilidad de controlar la salida de voltaje que requiere la entrada.

El componente es capaz de soportar hasta 24V con relación a otros reguladores, que para obtener un determinado voltaje fijo desprende mucho calor, son inestables y como consecuencia puede provocar diversos fallos en el funcionamiento del circuito o una inducción térmica en otros componentes.

El componente es muy útil debido a que cuenta con dos entradas y dos salidas de corriente directa (DC), donde el circuito mantiene una corriente superior a 2,5 A (o una potencia de salida de más de 10 W), este elemento se puede visualizar en la figura 13-2.



Figura 13-2 Configuración del módulo LM2596

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.3.6.2. XL4015

Posteriormente, la fuente de alimentación que se utilizó es el módulo XL4015 conocido como Tipo Buck como se muestra en la figura 14-2, este módulo tiene como función entregar a la salida una caída de potencia inferior con respecto a la caída de tensión de la entrada; por tal razón este dispositivo será implementado en el nodo de recolección de datos y en el nodo coordinador para la alimentación del módulo Ra01 Lora SX1278.

El funcionamiento de este elemento tiene una caída de potencial de corriente directa de 3.3V, cabe mencionar que para un adecuado funcionamiento el nivel de voltaje de entrada debe ser mayor en 1.25V al nivel de voltaje de salida, teniendo en cuenta que de no ser así se presentarían inconvenientes de rendimiento y eficiencia.



Figura 14-2 Configuración del módulo XL4015

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.3.7. Diseño y fabricación de las cajas de protección para el sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo está formado por tres componentes denominados: Coordinador, Nodo A y Nodo B, los mismos que fueron diseñados en SolidWorks bajo parámetros y características de miniaturización para cada una de las carcasas.

2.3.7.1. El nodo coordinador

El dispositivo coordinador posee una carcasa con dimensiones de 76.34 mm de largo x 100.34 mm de ancho x 67 mm de alto, como se muestra en la figura 15-2, en la que se observa una vista 3D de la parte exterior de la caja.

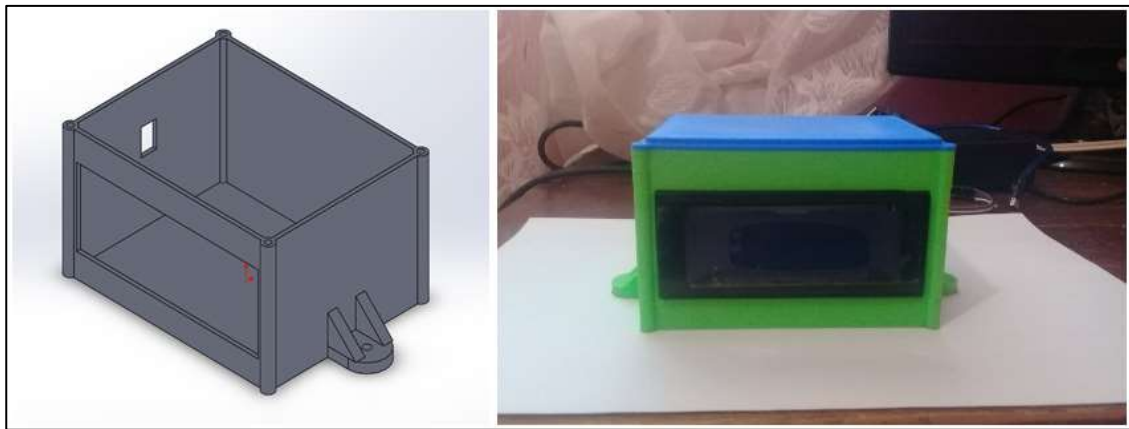


Figura 15-2 Diseño del nodo coordinador

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

2.3.7.2. Nodo A y Nodo B

Las carcasas de los nodos A y B poseen una distribución idéntica en la parte interna, por lo cual fueron creadas con las mismas dimensiones que son de 58 mm de largo x 86.34 mm de ancho x 81.34 mm de alto como se pueden apreciar en la figura 16-2.

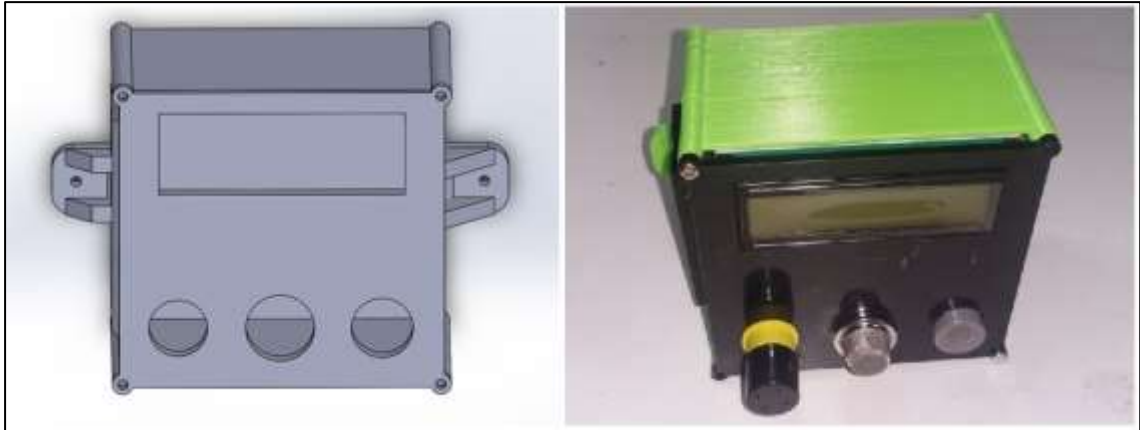


Figura 16-2 Diseño de los nodos de recolección

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

2.4. Comunicación SPI

SPI (interfaz periférica serial) es utilizado para la transferencia de datos entre dispositivos electrónicos; así como también el control que se ejerce entre los componentes que interactúan en el circuito mediante el método Maestro-Esclavo; especialmente hay tres líneas usuales a todos los módulos:

- Master In Slave Out (MISO): la línea Slave para enviar información al maestro,
- Master Out Slave In (MOSI): la línea Master para enviar información a los periféricos,
- Reloj de serie (SCK): los pulsos de reloj que sincronizan la transmisión de la información gestionada por el maestro;

y una línea específica para cada módulo que es la Selección de esclavo (SS), es decir, el pin en cada dispositivo que el maestro consigue usar para habilitar y deshabilitar dispositivos específicos (Arduino, 2017).

2.5. Pruebas de funcionamiento del sistema

Las pruebas de evaluación son enfocadas para comprobar el correcto funcionamiento de cada dispositivo, así como la distancia donde interactúan o captan información para el envío de datos a la base de datos. Las pruebas a realizar para proyectos desarrollados con la tecnología LoRaWAN según los autores (Perez García; Rodríguez Munca) son las siguientes:

- Prueba 1: Rango de funcionamiento de los sensores
- Prueba 2: Alcance de la tecnología LoRaWAN

- Prueba 3: Consumo energético del dispositivo LoRaWAN
- Prueba 4: Análisis de costo
- Prueba 5: Grado de satisfacción del usuario final

2.5.1. Prueba 1: Rango de funcionamiento de los sensores

Con esta prueba se evalúa el funcionamiento individual de cada sensor en los nodos recolectores (Nodo A y Nodo B), determinando la longitud máxima de su sensibilidad para percibir los contaminantes.

2.5.2. Prueba 2: Alcance de la tecnología LoRaWAN

En esta prueba se determina la distancia de funcionamiento entre los dispositivos de transmisión y el Gateway que debe ser capaz de transmitir y recibir información mediante los módulos RA01 LoRa SX1278 a distancias largas.

2.5.3. Prueba 3: Consumo energético del dispositivo LoRaWAN

Esta prueba tiene como finalidad, examinar el bajo consumo energético que posee la tecnología LoRaWAN al realizar la comunicación entre el transmisor y receptor. Además, se realizará una comparativa con dispositivos de la tecnología ZigBee.

2.5.4. Prueba 4: Análisis de costo

Esta prueba tiene como objetivo comparar el valor económico del sistema implementado con otro sistema existente en el mercado, destacando las características de cada uno de los sistemas de la calidad de aire.

2.5.5. Prueba 5: Grado de acogida del usuario final

Para conocer la valoración del nivel de acogida que recibe el sistema de monitoreo de la calidad del aire en la Unidad Educativa, se realiza encuestas enfocadas a los estudiantes, docentes y personal administrativo, con el propósito de saber cuan conformes se encuentran con el servicio brindado e implementación del dispositivo a los usuarios de la Institución.

2.6. Diagramas de conexión

2.6.1. Conexión de Arduino Nano y LoRa RA01 LORA SX1278

Las conexiones entre los módulos LoRa con la tarjeta de desarrollo se puede apreciar en la figura 17-2, donde cada dispositivo posee un datasheet en el cual se basa para conocer el tipo de comunicación que permite manejar el dispositivo LoRa ya sea (I2C o SPI). Para este caso se utiliza la comunicación SPI.

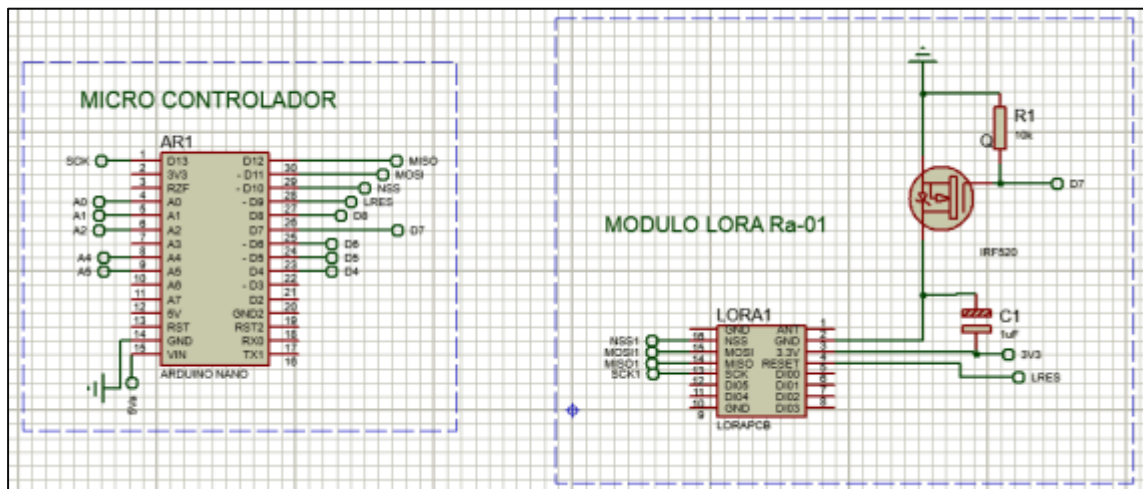


Figura 17-2 Conexión de Arduino Nano y LoRa RA01 LoRa SX1278

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

Las conexiones de los dispositivos LoRa RA01 SX1278 y Arduino Nano se puede apreciar en la tabla 6-2, donde se detallan cada uno de los pines de comunicación y alimentación respectivamente.

Tabla 6-2 Conexión de Arduino Nano y LoRa RA01 SX1278

Arduino Nano	LoRa Ra01
- D10 (PIN28)	NSS1 (PIN 15)
- D11 (PIN 29)	MOSI1 (PIN 14)
D12 (PIN 30)	MISO1 (PIN 13)
D13 (PIN 1)	SCK1 (PIN 12)
- D9 (PIN 27)	LRES (PIN 4)
VCC 5Va (PIN 15)	VCC 3.3 (PIN 3)
GND (PIN 14)	GND (PIN 16)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

Los pines de conexión de la alimentación corresponden a el pin 14 (negativo) y pin 15 (positivo), mientras que para el envío y recepción de datos se realiza con los pines de comunicación (NSS, MOSI, MISO) en un determinado tiempo de reloj establecido por (SCK).

2.6.2. Conexión del sensor MQ-136 y Arduino Nano

En la figura 18-2 se puede apreciar las conexiones del sensor MQ-136 con el microcontrolador Arduino Nano, donde la señal (A1) generada por el sensor va a hacer enviada al primer pin analógico del microcontrolador.

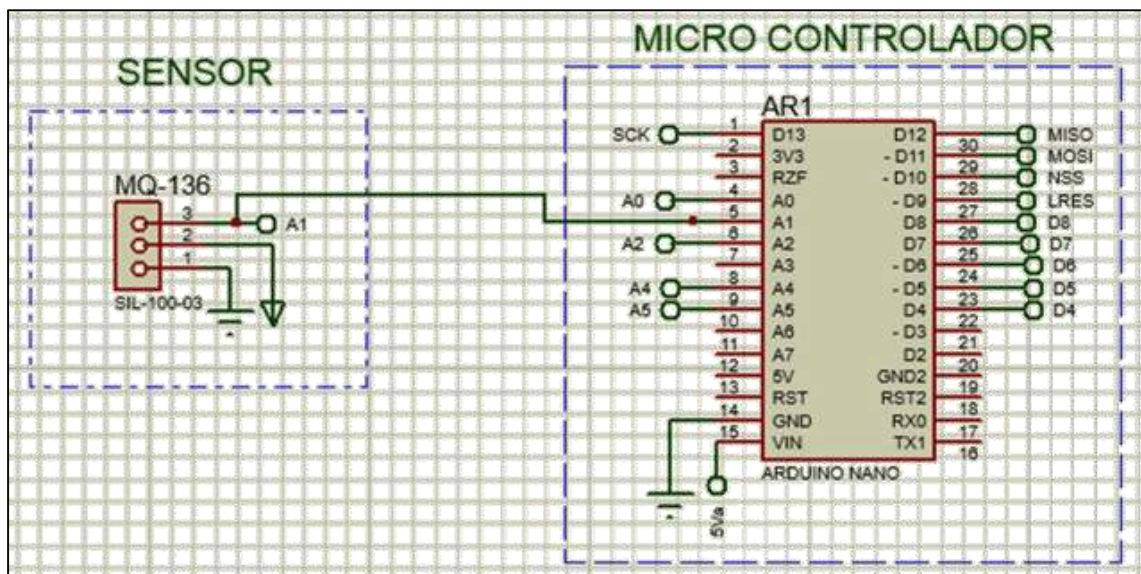


Figura 18-2 Conexión del sensor MQ-136 y Arduino Nano

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

En la tabla 7-2 se observan las conexiones mediante los pines de comunicación de forma detallada entre el sensor de dióxido de azufre y la tarjeta de desarrollo.

Tabla 7-2 Conexión del sensor MQ-136 y Arduino Nano

MQ-136	Arduino Nano
SEÑAL A1 (PIN 3)	A1 (PIN 5)
VCC (PIN 2)	VIN (PIN 15)
GND (PIN 1)	GND (PIN 14)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.6.3. Conexión del sensor MQ-7 y Arduino Nano

En la figura 19-2 se puede observar la conexión que se realiza entre el Arduino Nano y el sensor MQ-7, el cual obtiene el nivel de contaminante de monóxido de carbono que capta del ambiente; esta señal se recepta por el PIN analógico 4 o también denominado (A0) en la placa.

El nivel de monóxido de carbono que se encuentra en el ambiente será evaluado en la placa controladora para determinar si la cantidad de polutante es tolerable o perjudicial para el ser humano.

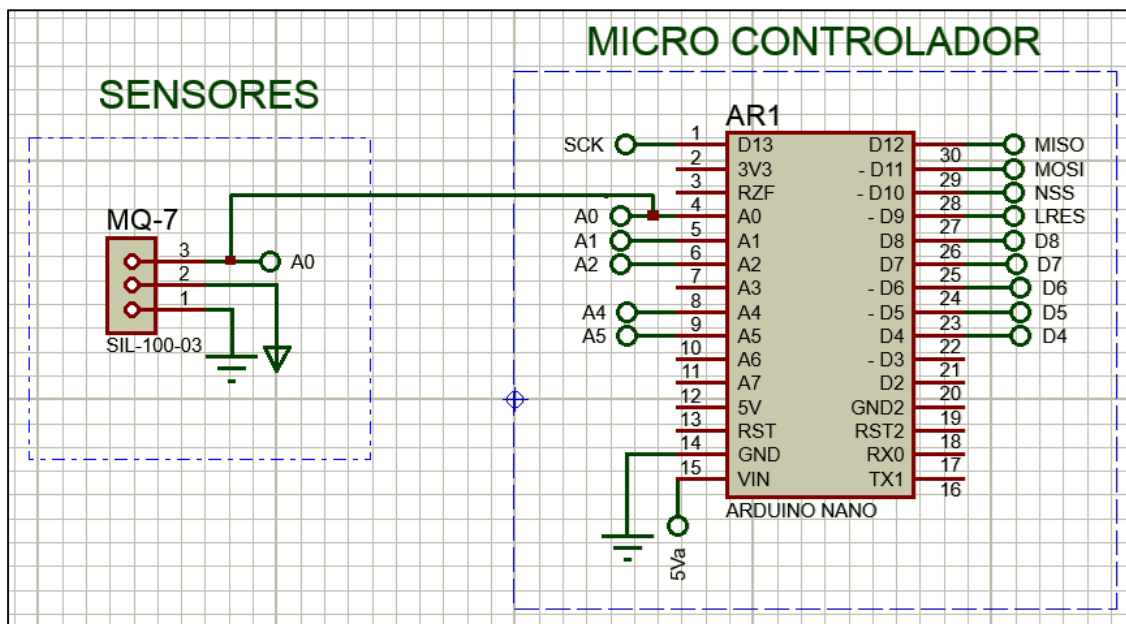


Figura 19-2 Conexión del sensor MQ-7 y Arduino Nano

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

En la tabla 8-2 se indica las conexiones a realizarse entre el sensor de monóxido de carbono y el microcontrolador (Arduino Nano).

Tabla 8-2 Conexión del sensor MQ-7 y Arduino Nano

MQ-7	Arduino Nano
SEÑAL A0 (PIN 3)	A0 (PIN 4)
VCC (PIN 2)	VIN (PIN 15)
GND (PIN 1)	GND (PIN 14)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.6.4. Conexión del sensor MQ-131 y Arduino Nano

En la figura 20-2 se observa cómo se conectan los dos dispositivos para la adquisición de ozono y dióxido de nitrógeno estas señales son receptadas por el PIN 3 que remite la señal analógica al PIN 6 (A2).

La polarización de este sensor es una parte importante; ya que, el voltaje que utiliza de alimentación es 5V, los cuales no deben sobrepasar el valor establecido para evitar modificaciones en su configuración inicial y así evitar datos erróneos.

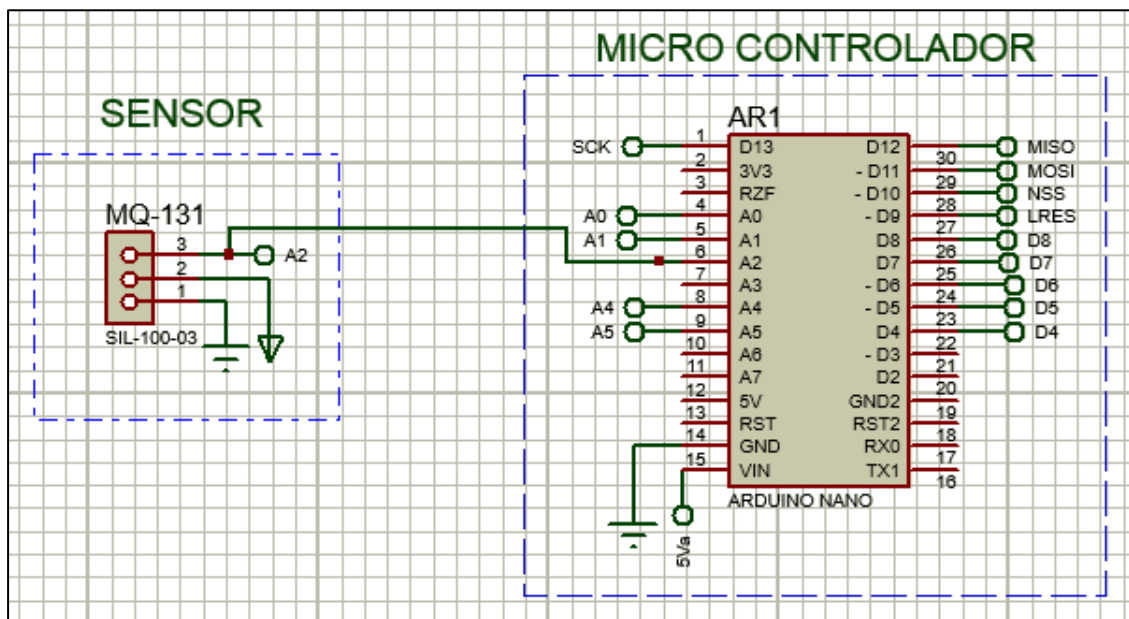


Figura 20-2 Conexión del sensor MQ-131 y Arduino Nano

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

En la tabla 9-2 se muestra las conexiones a realizarse con los dispositivos para obtener los datos de los sensores de Ozono y Dióxido de Nitrógeno.

Tabla 9-2 Conexión del sensor MQ-131 y Arduino Nano

MQ-131	Arduino Nano
SEÑAL A2 (PIN 3)	A2 (PIN 6)
VCC (PIN 2)	VIN (PIN 15)
GND (PIN 1)	GND (PIN 14)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.6.5. Conexión del sensor DSM501A y Arduino Nano

En la figura 21-2 se detalla la conexión realizada entre la tarjeta de desarrollo Arduino Nano y el sensor DSM501A, el cual mide el tamaño de la partícula de polvo suspendida en el aire. Así mismo, este sensor envía la información que viene etiquetada como señal D8 en el PIN 3 hacia el PIN 26 del microcontrolador.

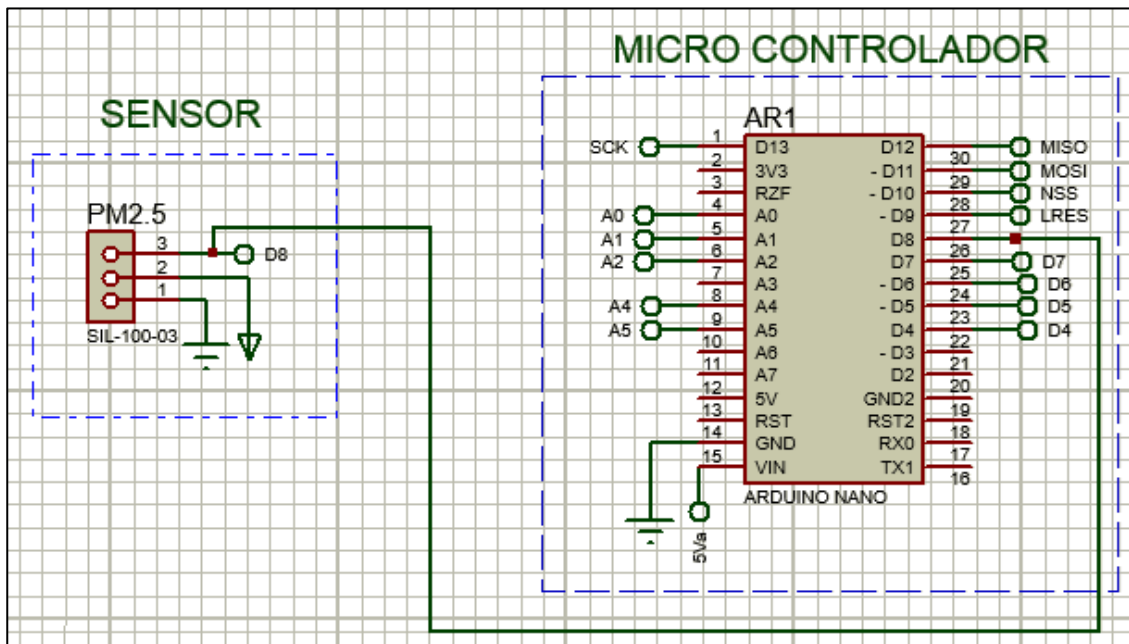


Figura 21-2 Conexión del sensor DSM501A y Arduino Nano

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

En la tabla 10-2 se puede observar las conexiones a realizarse detalladamente entre la tarjeta programable y sensor de material particulado.

Tabla 10-2 Conexión del sensor DSM501A y Arduino Nano

DSM501A	Arduino Nano
SEÑAL D8 (PIN 3)	D8 (PIN 26)
VCC (PIN 2)	VIN (PIN 15)
GND (PIN 1)	GND (PIN 14)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.7. Requerimientos Software del sistema de monitoreo de la calidad del aire

2.7.1. Plataforma ThingSpeak IoT

Es una plataforma web que ofrece servicios de almacenamiento, consumo de datos y monitoreo para desarrolladores que permite capturar fácilmente datos de sensores y convertirlos en información útil, los cuales se pueden gestionar mediante un aplicativo móvil, siendo ideal para lo que se pretende con la investigación como se ve en la figura 22-2.

Se utiliza la plataforma ThingSpeak IoT para enviar datos a la nube desde cualquier dispositivo que tenga acceso a la Internet, la misma que es capaz de configurar tareas y alertas en tiempo real por medio de herramientas visuales. Con esta aplicación se logra generar o colocar cualquier elemento y conectarlo con alguna determinada tecnología debido a que permite una amplia gama de componentes de comunicación para la interconexión.

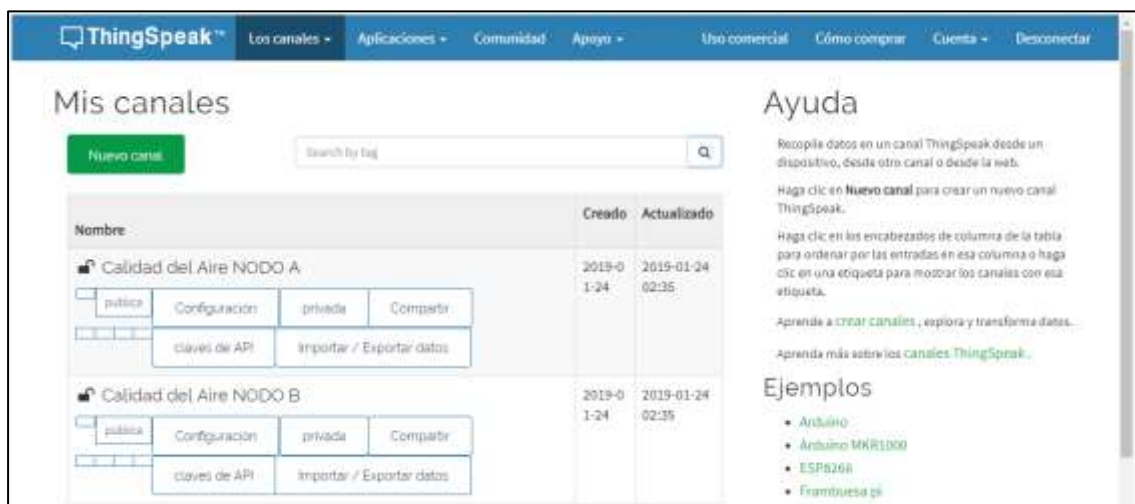


Figura 22-2 Interfaz Gráfica de ThingSpeak IoT

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

La plataforma proporciona una clave API a cada usuario, la cual funciona como un identificador de autenticación al momento de transmitir los datos obtenidos por los sensores de los contaminantes a la nube, como se puede apreciar en la figura 23-2. Esta plataforma admite reconocer hasta 8.219 datos diarios de manera gratuita; si se pretende registrar una mayor cantidad de datos al mes, se puede elegir un plan de servicio pagado que oferta la plataforma según sean las necesidades del usuario (Ossa, 2017, p. 7).



Figura 23-2 Claves API de ThingSpeak IoT

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.7.2. IDE de Arduino

Arduino es una herramienta empleada para la construcción de aplicativos electrónicos, el mismo consta de una placa física programable en un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) que se gestiona en un ordenador mediante un conjunto de librerías para la ejecución de componentes electrónicos mediante una comunicación serial.

2.7.3. Instalación de la placa para el funcionamiento del ESP8266 NODE MCU

Para la conexión del ESP8266 NODE MCU con el IDE de Arduino es fundamental instalar el programa para examinar y operar las placas ESP, por tal razón procedemos a cumplir con los siguientes pasos:

1. Teniendo en cuenta el acceso a la IDE de Arduino, se da clic en **Archivo**, en el cual se despliega un menú y se escoge la opción **Preferencias** dando como resultado lo que se muestra en la figura 24-2, luego se procede a vincular con el siguiente enlace: http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json, http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json y para concluir se da clic en OK.

Este procedimiento se lo realiza para informar al programa de la ruta de donde debe descargarse y ejecutarse las distintas librerías.

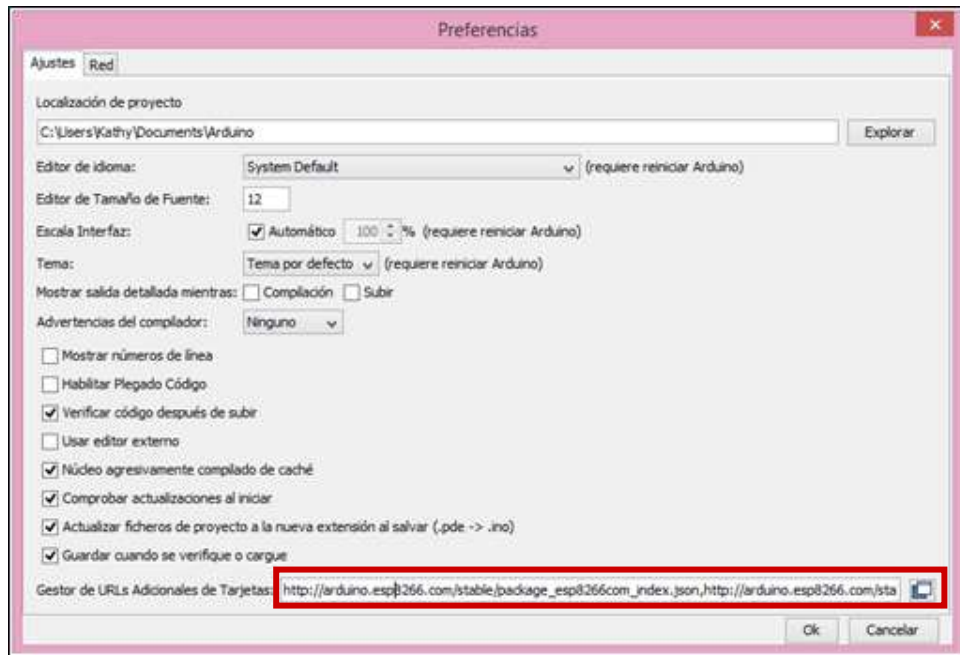


Figura 24-2 Configuración de la URL para ESP8266

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2. A continuación, se da clic en **Herramientas** y en el menú desplegado se selecciona la opción **Placa**, seguido se elige **Gestor de Tarjetas** como se indica en la figura 25-2.

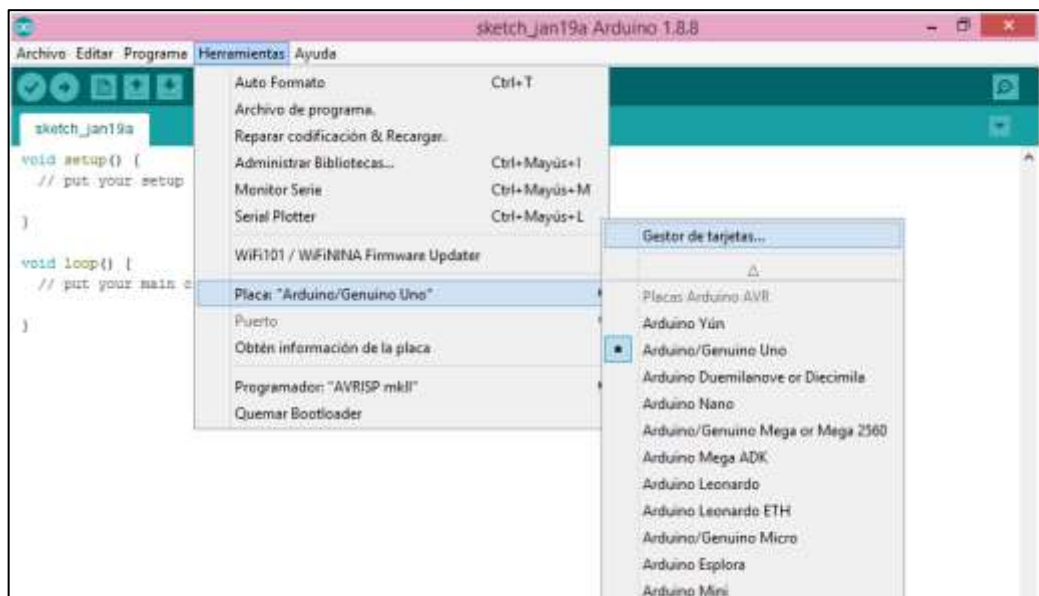


Figura 25-2 Configuración para descarga de la placa NODE MCU

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

3. Una vez abierta la ventana **Gestor de Tarjetas** se procede a buscar la librería ESP8266, se elige la primera opción y se instala como se muestra en la figura 26-2. Una vez instalada correctamente se cierra la ventana sin problema alguno.

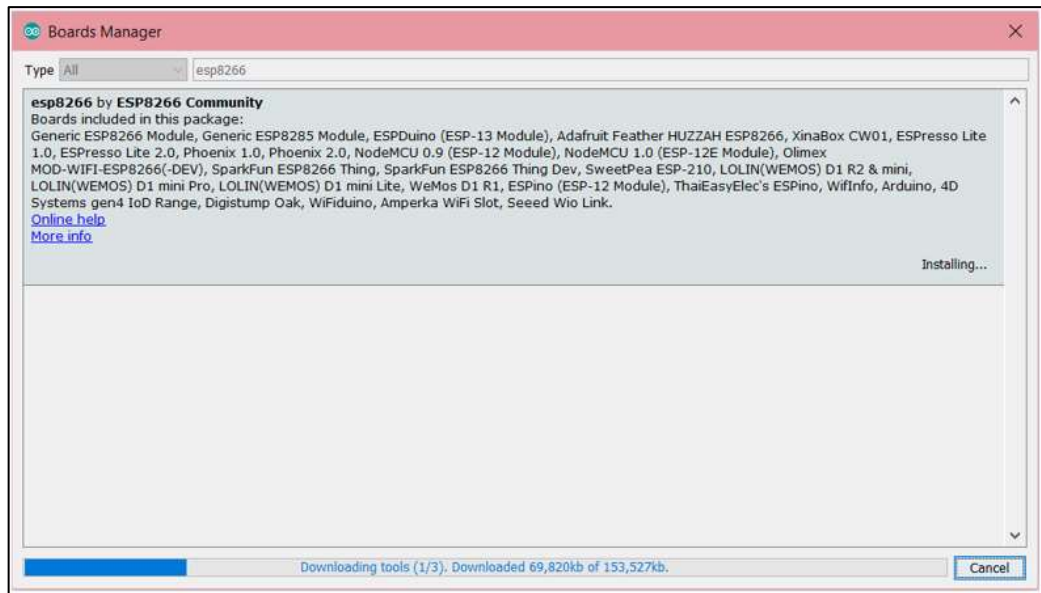


Figura 26-2 Instalación de la placa y librerías ESP8266

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

4. Por último, en la figura 27-2 se puede observar la interfaz del IDE Arduino ajustada con los diferentes módulos de la familia ESP8266; la placa NodeMCU 1.1 es la que se va a manejar en el presente trabajo de titulación.

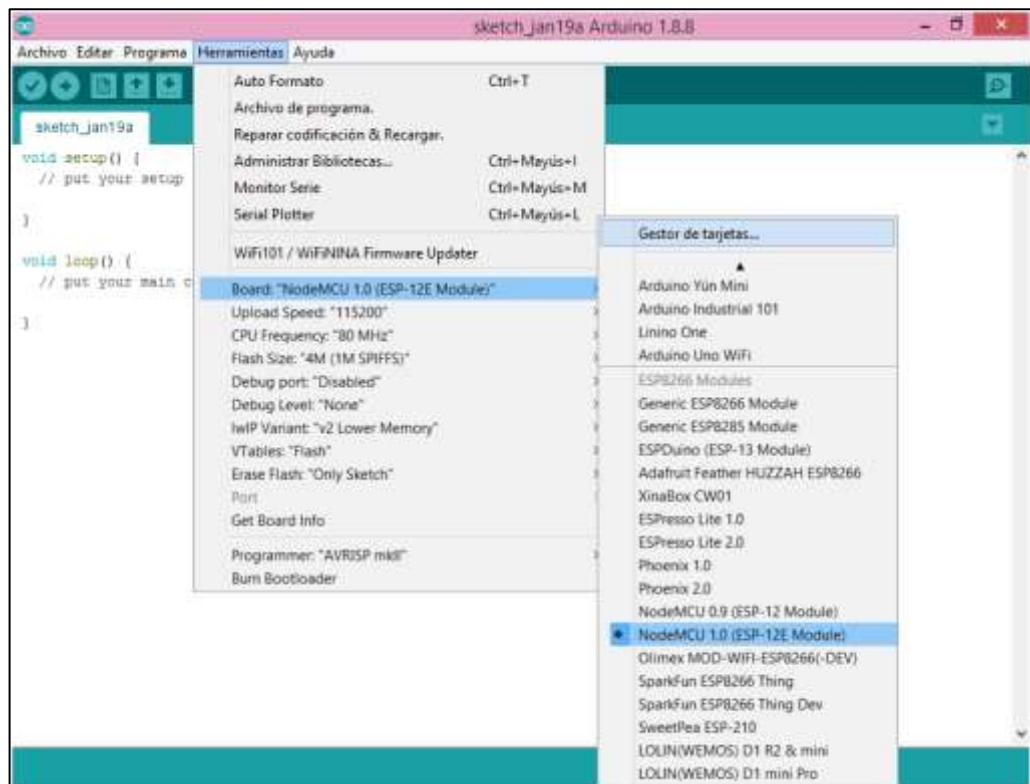


Figura 27-2 Interfaz de IDE Arduino

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.7.4. Librerías

Con la finalidad de realizar la comunicación, interacción y funcionamiento de los dispositivos mencionados con anterioridad, es preciso definir algunas librerías que permitan realizar dichas tareas. Las librerías que admiten la habilitación de los dispositivos se muestran en la tabla 11-2, junto a las funciones que realiza cada una con los dispositivos utilizados; además, se menciona la fuente de donde se adquirieron las librerías externas.

Tabla 11-2 Librerías para el funcionamiento del sistema

Dispositivo	Librería por Defecto	Librería Externa	Url Externa	Descripción
IDE ARDUINO	<SPI>	-	-	Permite comunicación de forma serial
	<wire.h>	-	-	Permite funciones básicas de comunicación con dispositivos I2C / TWI
LoRa	-	<LoRa.h>	https://github.com/sandeepmisra/arduino-LoRa	Permite la transmisión y recepción de datos LoRa.
ESP8266 NODE MCU	-	<ESP8266WiFi.h>	http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json	Permite la comunicación entre la placa esp y los dispositivos WIFI
	-	<WiFiClient.h>	http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json	Habilitar la conexión como clientes a las diferentes redes WIFI
	-	<ESP8266WebServer.h>	http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json	Permite que el dispositivo actúe como un servidor
LCD CON I2C	-	<LiquidCrystal_I2C.h>	https://github.com/marcoschwartz/LiquidCrystal_I2C	Permite la comunicación I2C

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.7.4.1. Instalación de la librería LoRa

Para la instalación de la librería LoRa; primero se selecciona el menú desplegable **Programa**, a continuación, se elige la opción **Incluir Librería** y luego **Administrar Bibliotecas**, en el campo de búsqueda se escribe LoRa y una vez encontrada la librería se procede a instalar como se indica en la figura 28-2.

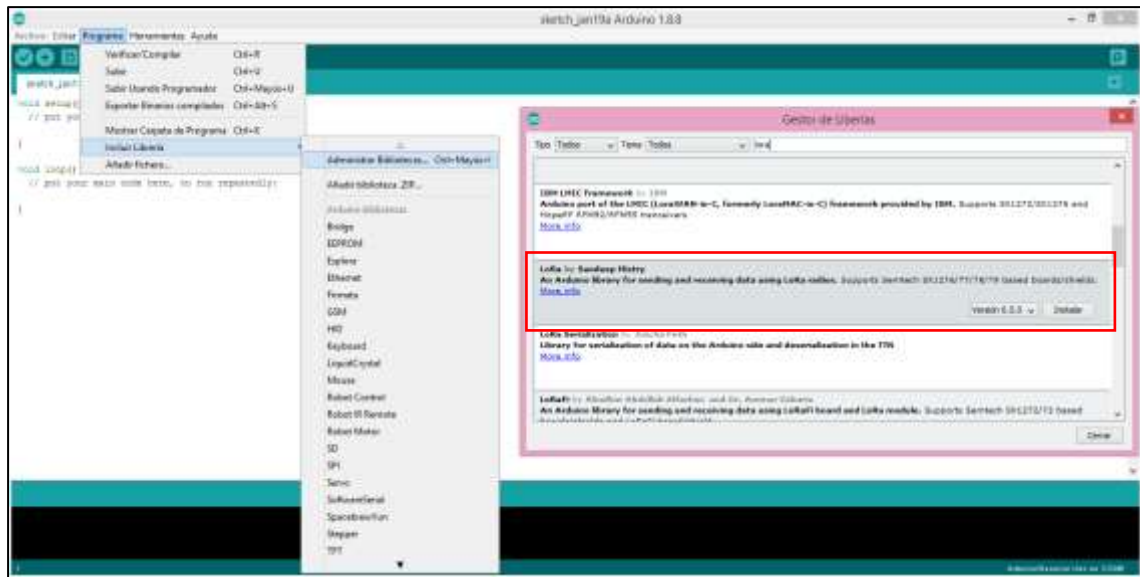


Figura 28-2 Instalación de la librería LoRa

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.8. Diagrama de flujo del sistema de monitoreo

En el diagrama de flujo que se aprecia en la gráfica 3-2, se detalla los pasos que se siguieron para la ejecución del sistema de monitoreo; el mismo que, comienza definiendo las variables que se van a utilizar en el desarrollo del proceso al momento de iniciar el microcontrolador, luego procedemos con la adquisición y lectura de los valores que proporcionan los sensores para después pasarlos a la etapa de procesamiento, donde se analizarán las concentraciones existentes en el ambiente y se va a generar una trama de datos, los mismo que serán enviados al microcontrolador y comparados por las directrices ya establecidas por la NECA para medir la calidad del aire.

Por otro lado, si cumplen con las directrices mencionadas anteriormente se procederá a visualizar el nivel de contaminante en el LCD, caso contrario solo se va a mostrar el nivel de contaminante que está presente en el aire.

Por consiguiente, los datos que son recolectados se lo envían al servidor para su almacenamiento y visualización mediante una base de datos en la nube (Plataforma IoT) y finalmente los resultados obtenidos de la etapa de recolección se podrán mostrar mediante un aplicativo móvil el cual estará a disposición de los usuarios para el monitoreo del nivel de contaminante que existe en el aire en tiempo real en la Unidad Educativa.

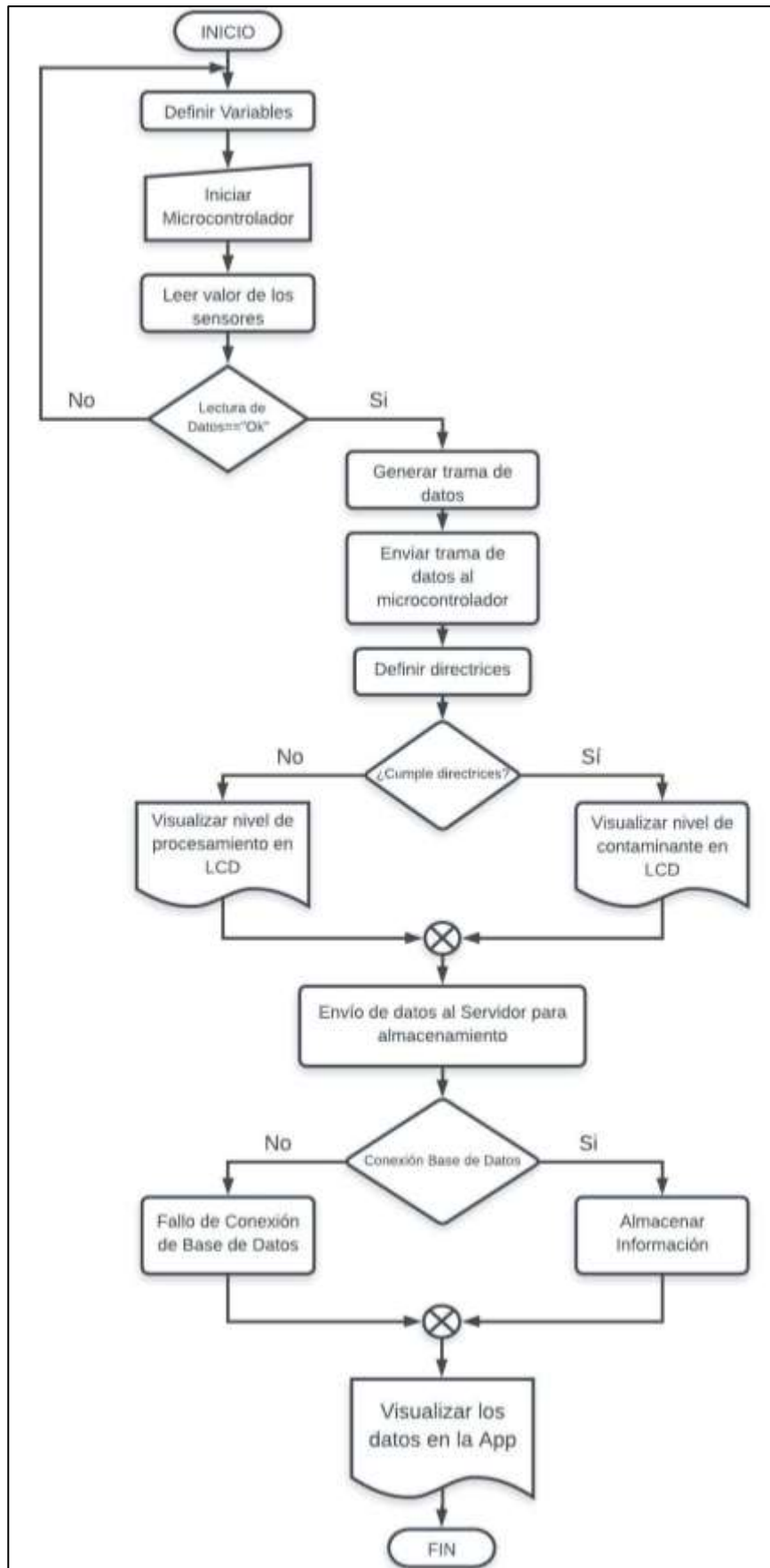


Gráfico 3-2 Diagrama de flujo del sistema de monitoreo

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.9. Código para la comunicación de la tecnología LoRa

Para la comunicación entre los dispositivos, cabe mencionar que la velocidad de datos por bit se estableció en una tasa de transmisión de 9600 baudios, que es la velocidad de comunicación a la que el sistema interactuará con los diferentes dispositivos.

La transmisión LoRa permitió el envío de cuatro cadenas de datos por minuto, cada una contiene treinta y uno datos, los cuales están constituidos por una variable que determine el inicio y fin de la cadena de cada nodo y cada dato está separado por un carácter (,), la misma que se puede observar en la figura 29-2.

A	,	1	2	3	4	5	,	1	2	3	,	1	2	3	4	,	1	2	3	4	,	1	2	3	,	1	2	3	,	Z
B	,	1	2	3	4	5	,	1	2	3	,	1	2	3	4	,	1	2	3	4	,	1	2	3	,	1	2	3	,	Y

Figura 29-2 Cadena de envío de caracteres de los nodos A y B

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

2.9.1. Receiver

Constituye la interfaz de comunicación o el canal por el cual se emplea la tecnología LoRa para la recepción de los datos. En el Anexo G se puede apreciar el código utilizado para la comunicación mediante los dispositivos LoRa RA01 X1278 con la tarjeta de desarrollo, donde los paquetes se van a recibir mediante la función `Lora.parsePacket`, para lo cual se necesita que la comunicación permanezca disponible para la recepción y transmisión de datos.

2.9.2. Sender

Para inicializar la comunicación mediante la tecnología LoRa, se utiliza el condicionamiento `Lora.begin()` establecida bajo los parámetros de frecuencia de 915 MHz, con lo que se puede conseguir únicamente las señales de los componentes configurables a la misma frecuencia de operación. La codificación que se utilizó para cada módulo de envío se puede ver en Anexo H.

2.9.3. Sender 2

Cada uno de los módulos, está conformado por la misma condición de la frecuencia del sender 1, la diferencia entre estos dos es que el sender 2 necesita ser activado mediante un pulso en alto,

una vez activado, el puerto empezara a recibir la comunicación de los paquetes LoRa con el código que se puede apreciar en el Anexo I.

2.10. Ubicación del sistema de monitoreo de la calidad de aire

Para la implementación del trabajo de titulación denominado “ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE LA TECNOLOGÍA LORAWAN APLICADO AL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE”, se ha obtenido los permisos y documentación necesaria de la Institución para la colocación de los dispositivos, ver anexo J, la cual se encuentra ubicada en la Av. Gonzalo Dávalos S/N y Nogales de la ciudad de Riobamba.

Los tres dispositivos conocidos como Coordinador, Nodo A y Nodo B, se encuentran localizados dentro de la Institución en puntos específicos con coordenadas de latitud y longitud que se presentan en la tabla 12-2.

Tabla 12-2 Latitud y Longitud de la localización de los dispositivos

Dispositivo	Latitud	Longitud
Coordinador	1°39'36.8"S	78°39'21.3"W
Nodo A	1°39'38.33"S	78°39'20.47"W
Nodo B	1°39'33.9"S	78°39'20.2"W

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

En el gráfico 4-2 se puede apreciar una imagen panorámica de la ubicación de los tres dispositivos colocados dentro de la Unidad Educativa, cada uno de los dispositivos se encuentran a una distancia mayor a los 40 metros.

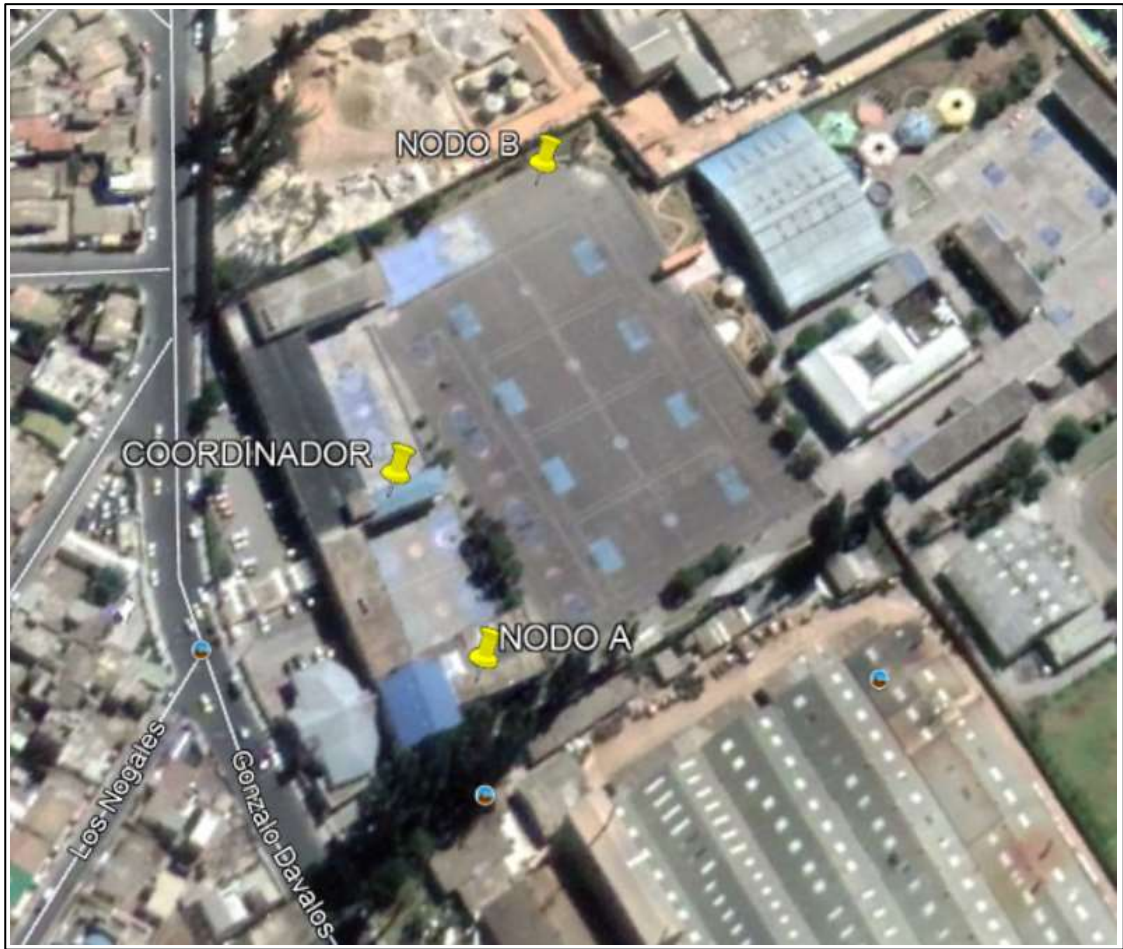


Gráfico 4-2 Ubicación de los dispositivos de monitoreo en la Unidad Educativa

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

CAPITULO III

3. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA

Una vez concluido con el proceso de implementación del sistema de monitoreo de calidad de aire, se puso a prueba cada uno de los componentes del sistema como: el censado, comunicación, procesamiento, almacenamiento y monitoreo, comprobando el funcionamiento del dispositivo en cada etapa para posteriormente realizar el análisis comparativo a nivel hardware y software entre otros sistemas, dispositivos y tecnologías. Así mismo, se comprobó el correcto funcionamiento del registro en la base de datos y el monitoreo en la aplicación móvil.

3.1. Instalación del sistema de monitoreo de la calidad del aire

En la figura 1-3 se puede observar la ubicación de los nodos transmisores A, B y el dispositivo coordinador dentro de la Unidad Educativa con sus respectivas distancias entre cada uno de ellos.



Figura 1-3 Ubicación de los dispositivos dentro de la Unidad Educativa

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Los nodos transmisores A, B y el Gateway se pueden observar en la figura 2-3, los cuales están listos para su respectiva colocación en los puntos establecidos.



Figura 2-3 Nodos transmisores A, B y Gateway

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Para colocar el nodo coordinador, se estableció un punto medio entre los dos nodos transmisores y con línea de vista para garantizar la comunicación, por lo cual se procedió a instalar en la parte alta de la azotea del bloque de aulas como se aprecia en la figura 3-3.



Figura 3-3 Colocación del nodo coordinador en la Unidad Educativa

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

En la figura 4-3 se muestra la colocación del nodo transmisor A en la parte alta de los bloques donde están ubicados los servicios higiénicos, debido a que se encuentra contiguo a las calderas de la Empresa Cerámica S.A.



Figura 4-3 Colocación del nodo A en la Unidad Educativa

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Para la colocación del nodo transmisor B se debió realizar la sujeción al poste, debido a que se encuentra contiguo a las calderas de la Empresa Cerámica como se visualiza en la figura 5-3.



Figura 5-3 Colocación del nodo B en la Unidad Educativa

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

3.2. Almacenamiento de datos en la plataforma IoT ThingSpeak

La información recopilada se visualizó en la plataforma IoT, donde las gráficas de cada uno de los polutantes, muestra los niveles de contaminación en tiempo real. Cabe mencionar que, la actualización de datos en la base de ThingSpeak es 40 segundos en promedio por políticas del servidor y retrasos en la programación.

Las gráficas muestran en el eje “y” el nombre del contaminante y en el eje “x” se observa la fecha en que se recolectó el polutante, ver gráfico 1-3. En el anexo K y L se muestran las gráficas detalladas de los nodos transmisores A y B, respectivamente.



Gráfico 1-3 Ejemplo de visualización de los gráficos de NO2 y SO2

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

3.2.1. Visualización de la información en la aplicación móvil

La interfaz gráfica de la aplicación móvil denominada ThingView es similar al GUI presentado en la página web; las gráficas de todos los contaminantes obtenidos muestran el último valor sentido, la fecha y hora exacta. En el gráfico 2-3 se puede visualizar la vista del aplicativo móvil añadido los dos nodos transmisores.



Gráfico 2-3 Visualización de los polutantes en la interfaz de la aplicación móvil
Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Finalmente, se realizó la configuración pertinente en la plataforma IoT para que pueda mostrar un mensaje de notificación a los usuarios, en caso de que los contaminantes hayan excedido los niveles de emergencia. En la figura 6-3 se observa la notificación que se recibe en el celular.

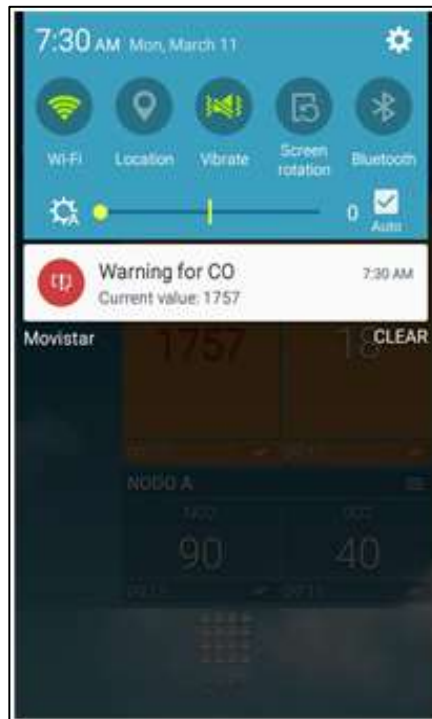


Figura 6-3 Notificación recibida del contaminante.
Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

3.3. Funcionamiento del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo de la calidad de aire instalado en la Unidad Educativa estuvo empezó su funcionamiento el 25 de febrero del 2019, lo primero que apreciamos fue la recolección de valores tomados por los 4 sensores que poseen los nodos A y B, esto se visualiza en el LCD colocado en cada dispositivo.

Los nodos A y B poseen transmisores LoRa que envían los datos al Gateway donde, el módulo ESP8266 NODE MCU procesa la información para posteriormente enviarla al servidor web mediante tecnología Wireless que almacena en tiempo real todos los valores obtenidos en la base de datos propia de la plataforma ThingSpeak; este servidor de almacenamiento IoT, permite visualizar dichos datos en la página web y en el aplicativo móvil para Android, indicando los mensajes de alerta, alarma y emergencia.

3.4. Pruebas de funcionamiento

Se efectuaron pruebas para constatar el correcto funcionamiento del prototipo y para caracterizar el sistema mediante la comunicación, el alcance, el consumo energético y throughput de datos; en los siguientes apartados se darán a conocer detalladamente cada una de estas pruebas.

3.4.1. Prueba 1: Funcionamiento de los sensores

3.4.1.1. Calibración del sensor MQ-7

En la figura 7-3 se observa la curva de sensibilidad del sensor MQ-7 para distintos gases, donde se escogió los valores respectivos al gas de CO para obtener la gráfica con tendencia potencial en función de PPM y R_s/R_o .

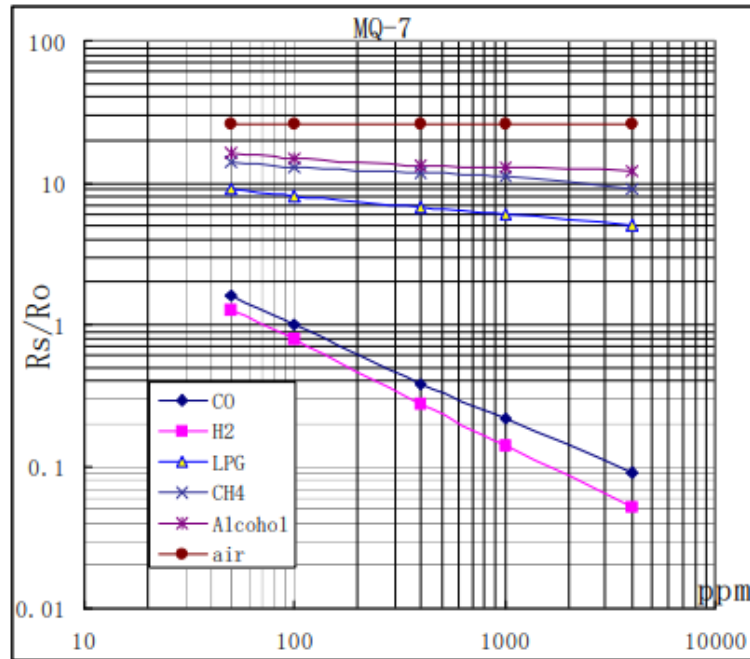


Figura 7-3 Curva de sensibilidad del sensor MQ-7

Fuente: (HANWEI ELECTRONICS CO., 2016a, p. 3)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

En la parte izquierda del gráfico 3-3 se muestra los valores que se obtuvieron de la curva de sensibilidad del sensor y en la parte derecha su aproximación, donde la ecuación que se halló fue $y=103,22x^{-1,49}$ con un coeficiente de correlación de 0,9988 el cual tiende a 1, es decir una buena aproximación.

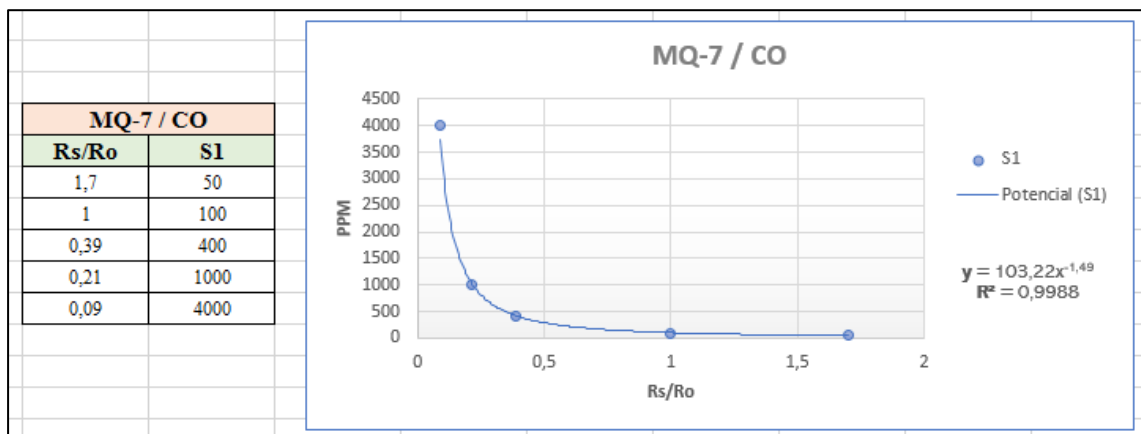


Gráfico 3-3 Obtención de la curva con tendencia potencial para el gas CO

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

3.4.1.2. Calibración del sensor MQ-131

En la figura 8-3 se observa la curva de sensibilidad del sensor MQ-131 para distintos gases, donde se escogió los valores respectivos al gas de O₃ para obtener la gráfica con tendencia potencial en función de PPM y Rs/Ro.

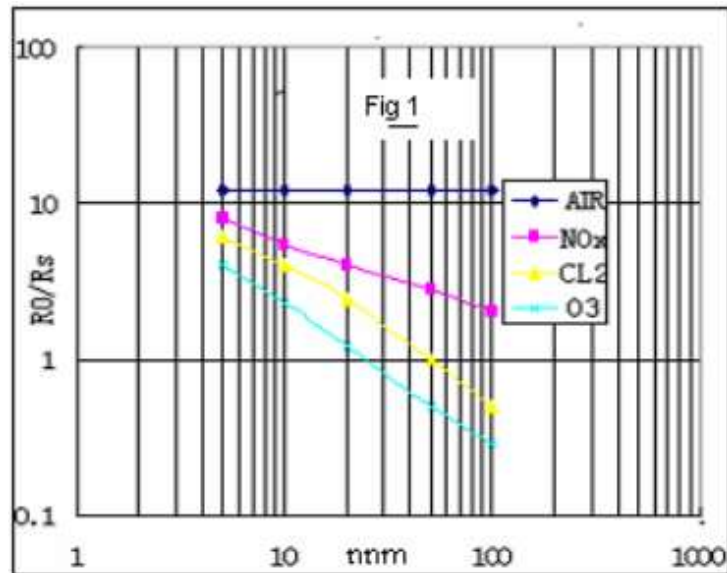


Figura 8-3 Curva de sensibilidad del sensor MQ-131

Fuente: (HANWEI ELECTRONICS CO., 2016b)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

En la parte izquierda del gráfico 4-3 se muestra los valores que se obtuvieron de la curva de sensibilidad del sensor y en la parte derecha su aproximación, donde la ecuación que se halló fue $y=37,359x^{-1,069}$ con un coeficiente de correlación de 0,9727 el cual tiende a 1.

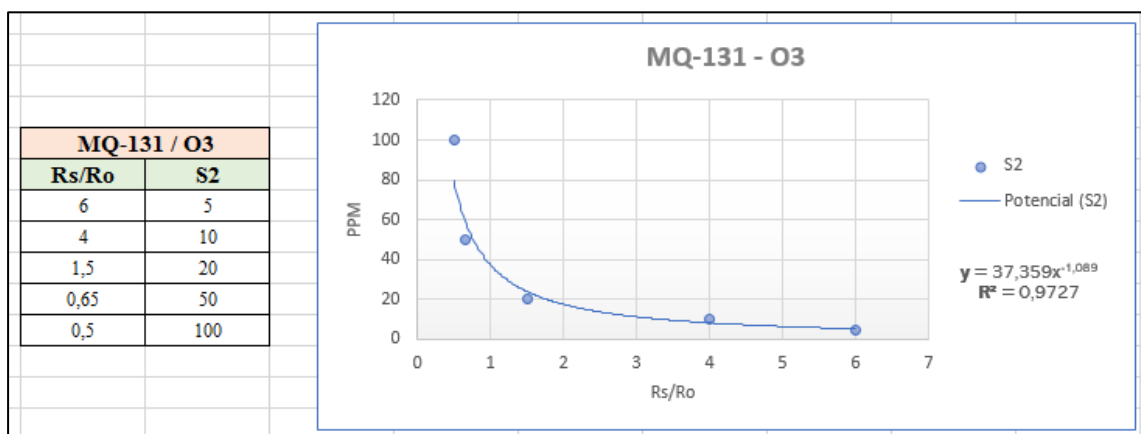


Gráfico 4-3 Obtención de la curva con tendencia potencial para el gas O₃

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

De la figura 8-3 se escogió los valores respectivos del gas NO₂ para obtener la gráfica con tendencia potencial en función de PPM y Rs/Ro.

En la parte izquierda del gráfico 5-3 se muestra los valores que se obtuvieron de la curva de sensibilidad del sensor y en la parte derecha su aproximación, donde la ecuación que se halló fue $y=11456x^{-3,433}$ con un coeficiente de correlación de 0,9901 el cual tiende a 1.

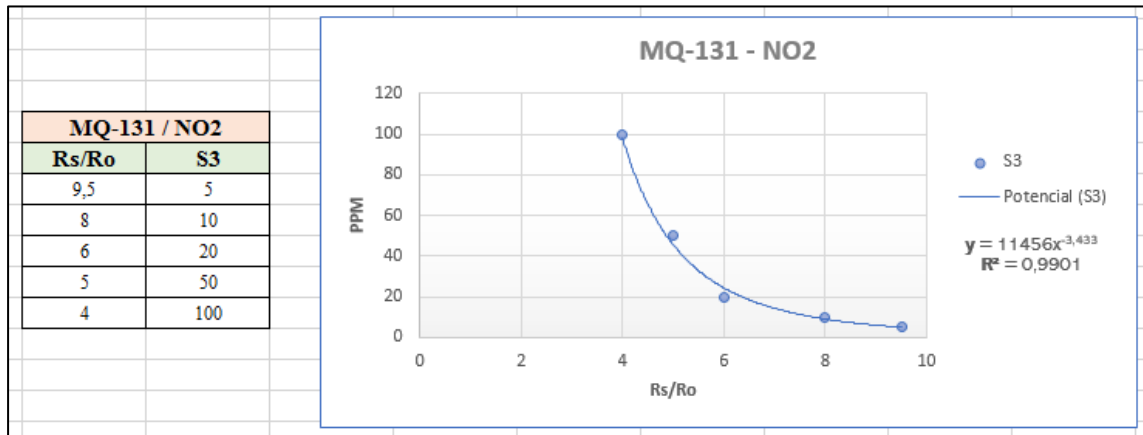


Gráfico 5-3 Obtención de la curva con tendencia potencial para el gas O₃

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

3.4.1.3. Calibración del sensor MQ-136

En la figura 9-3 se observa la curva de sensibilidad del sensor MQ-136 para distintos gases, donde se escogió los valores respectivos al gas de SO₂ para obtener la gráfica con tendencia potencial en función de PPM y Rs/Ro.

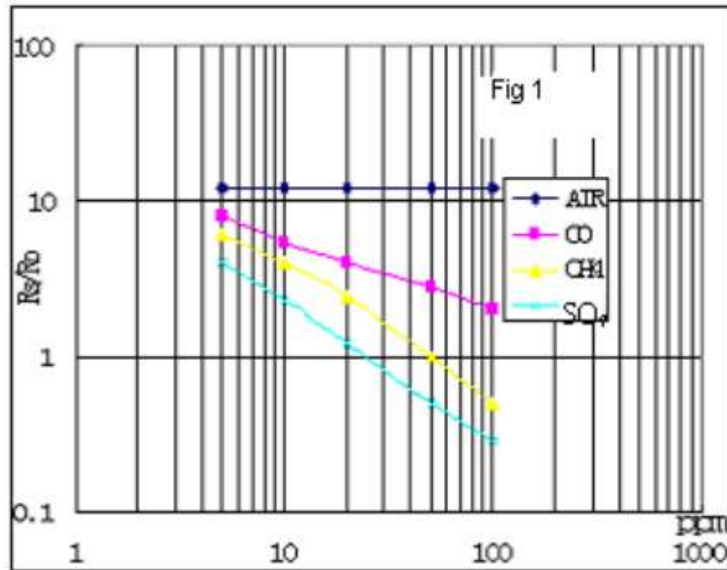


Figura 9-3 Curva de sensibilidad del sensor MQ-136

Fuente: (Sh&wRange, 2016, p. 2)

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

En la parte izquierda del gráfico 6-3 se muestra los valores que se obtuvieron de la curva de sensibilidad del sensor y en la parte derecha su aproximación, donde la ecuación que se halló fue $y=38,687x^{-1,076}$ con un coeficiente de correlación de 0,9668 el cual tiende a 1.

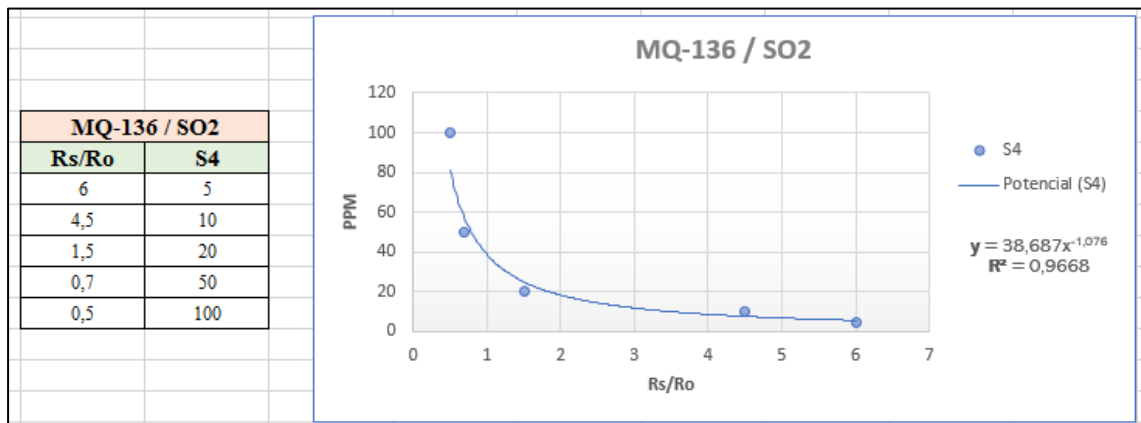


Gráfico 6-3 Obtención de la curva con tendencia potencial para el gas SO₂

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

3.4.1.4. Rango de funcionamiento de los sensores

Los dispositivos de adquisición de datos se dividieron en dos nodos transmisores (nodo A y nodo B) los cuales se encontraban a una distancia mayor de 100 metros entre ellos, dichos nodos fueron realizados con los mismos componentes para la recolección de datos e iguales características tanto externas como internas.

Los sensores detallados con anterioridad poseen una alta sensibilidad, pero debido a que están en un ambiente abierto, las partículas pueden dispersarse y no tomar los valores de una forma adecuada. Para conocer el rango de funcionamiento de los sensores fue necesario generar una fuente contaminadora, la misma que se detalla en la tabla 1-3.

A continuación, se muestra las diferentes fuentes contaminadoras que se utilizó para probar los gases en cada uno de los sensores. Así como, para generar CO se prendió un tabaco ya que esta fuente nos proporciona una gran concentración del gas, para provocar O3 se quemó diferentes residuos domésticos (restos de comida y alimentos), a fin de obtener PM se encendió un incienso (resinas aromáticas vegetales), el uso de aerosoles nos dio como resultado un nivel elevado de SO2.

Por otro lado, gracias a las propiedades orgánicas que posee el carbón vegetal al momento de su incineración, nos mostró como resultado una concentración de NO2 y PM; finalmente, la quema de gasolina nos dio como efecto valores en los gases de CO y O3.

Tabla 1-3 Fuente contaminadora de cada contaminante

Fuente Contaminadora	Contaminante
Humo de Tabaco	CO
Quema de Carbón	NO2, PM
Quema de Residuos Domésticos	O3
Quema de Inciensos	PM
Aerosol	SO2
Quema de Gasolina	CO, O3

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Con mediciones tomadas por los sensores MQ-7, MQ-131, MQ-136 Y DSM501A a diferentes distancias de la fuente contaminadora, se obtuvieron los valores de censado que se pueden apreciar en el Anexo M, con los cuales se analizó y se llegó a las conclusiones mostradas en la tabla 2-3.

Tabla 2-3 Rango de operación de los sensores

Distancia de operación (metros)	MQ7	MQ-131	MQ-136	DSM501A
0 m a 6 m	Recepción adecuada 100% de datos adquiridos.	Recepción adecuada 99% de datos adquiridos.	Recepción adecuada 98% de datos adquiridos.	Recepción adecuada 98% de datos adquiridos.
6m a 10 m	Recepción del 86% de datos adquiridos.	Recepción del 88.33% de datos adquiridos.	Recepción del 78.33% de datos adquiridos.	Recepción de 81.67% de datos adquiridos.
10 m en adelante	Casi no censa valores 8% de datos adquiridos.	Casi no censa valores 28% de datos adquiridos.	Casi no censa valores 53.33% de datos adquiridos.	Casi no censa valores 50% de datos adquiridos.

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

De los datos mostrados en la tabla, se analizó que:

- En una distancia de 0 m a 6 m, los sensores pueden captar valores de concentraciones de contaminantes de forma adecuada con una pérdida de datos del 0% al 3%.
- En distancias comprendidas entre 6 m y 10 m, los sensores pueden captar valores de concentraciones de contaminantes, pero con pérdida de 3% al 18% de los datos.
- Mientras que, en distancias de más de 10 metros, no se realiza la recolección de datos de una manera adecuada ya que existen pérdidas desde el 41% al 92% de datos.

En el gráfico 3-3 se observa la curva de como a medida que va aumentando la distancia entre el sensor y la concentración del contaminante, se va perdiendo una cantidad de datos al momento de obtener el censo del valor.

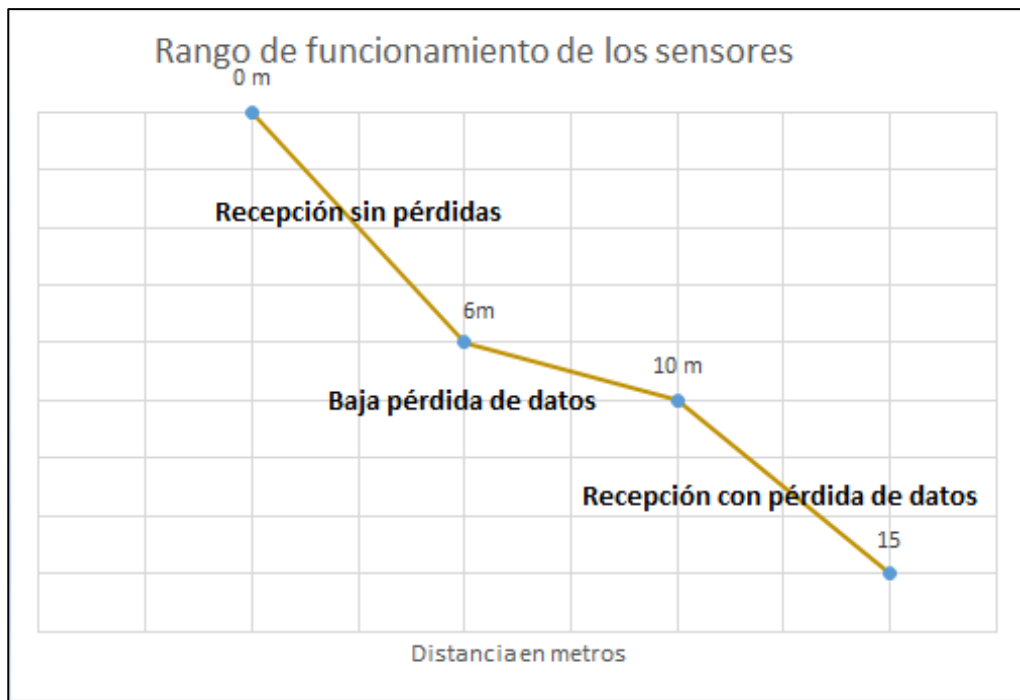


Gráfico 7-3 Rango de funcionamiento de los sensores

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

3.4.2. Prueba 2: Alcance de la tecnología LoRaWAN

El sistema Maestro (gateway) - Esclavo (nodos) se enlazó con la tecnología LoRa para la realización de pruebas de alcance, receptando la información de los nodos A y B; como se observa en la figura 7-3, los dispositivos se encuentran a diferentes distancias, el Nodo A se encuentra a 190.13 metros y el nodo B se encuentra a 107.85 metros, los dos con relación al Gateway.



Figura 10-3 Diagrama de ubicación con sus respectivas distancias del sistema Maestro-Eslavo
Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

En el gráfico 4-3 se puede apreciar los rangos de distancia donde existe transferencia de información; también, se observa que existe comunicación entre los transmisores y receptores debido a que la tecnología LoRaWAN permite comunicarse a grandes distancias, pero en el presente sistema de monitoreo de calidad de aire no es posible transmitir datos, si la posición entre el coordinador y el nodo recolector sobrepasa los 200 metros de distancia debido a que es limitado por la potencia de entrada en los módulos LoRa, además de la longitud y ganancia que la antena posee.

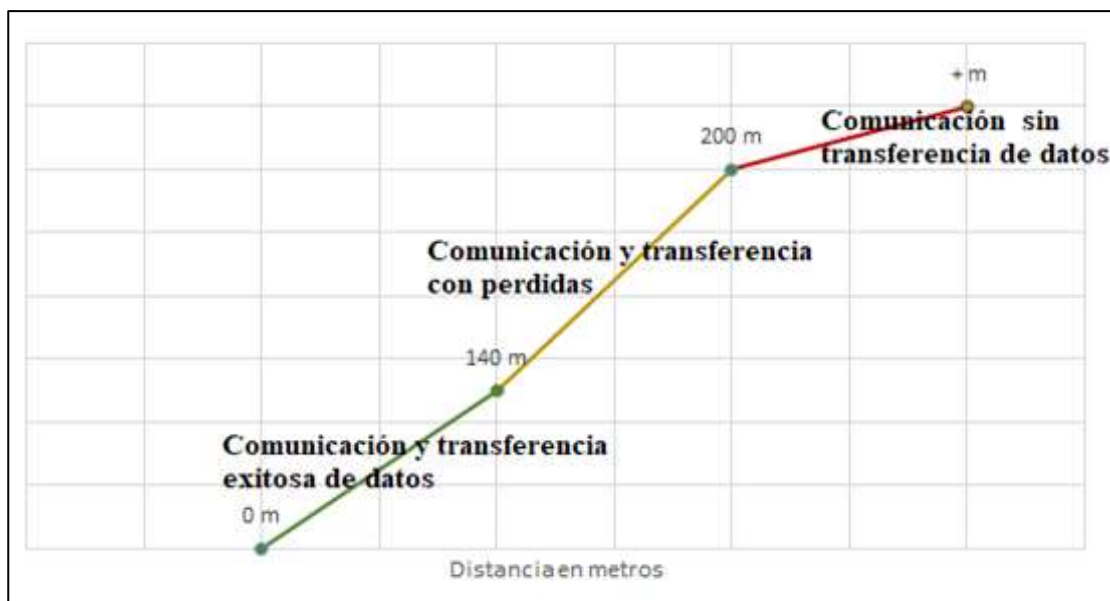


Gráfico 8-3 Diagrama representativo de la aplicación desarrollada: Maestro-Esclavo

Realizado por: Cantuña & Satián, 2018

En la tabla 3-3 se puede observar los rangos de funcionamiento, en los cuales existen comunicación y se produce la transferencia de información con pérdidas y sin pérdidas de datos.

Tabla 3-3 Rango de funcionamiento de los módulos LoRa

Distancia (m)	Tecnología LoRa		
	Comunicación	Número de datos	Trasferencia de Datos
30	100%	124	Sin pérdidas
60	100%	124	Sin pérdidas
90	100%	124	Sin pérdidas
120	100%	124	Sin pérdidas
140	100%	124	Sin pérdidas
150	100%	112	Pocas pérdidas
180	100%	112	Pocas pérdidas
190	100%	100	Pérdidas de datos
200	100%	96	Pérdidas de datos
230	100%	-	Error!
260	100%	-	Error!

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Para el sistema de monitoreo de calidad del aire, existe una comunicación y transferencia de información de forma exitosa entre los 0 a 140 metros de distancia, mientras que, pasado de los 140 metros hasta los 200 metros existe comunicación, pero se pierden algunos datos; cabe

mencionar que la comunicación entre la tecnología LoRaWAN puede estar conectada o enlazada en distancia mayores a 200, pero no se recepta la información.

3.4.3. Prueba 3: Consumo energético del módulo LoRa SX1278 Ra-01

La fórmula matemática para determinar la potencia necesaria para transmitir y recibir datos está dada por:

$$P_E = V_{CC} * I_{CC}$$

Donde:

P_E : Potencia eléctrica necesaria para transmitir o recibir datos.

V_{CC} : Voltaje nominal de alimentación. Según especificaciones técnicas de los módulos LoRa.

I_{CC} : Corriente consumida cuando el dispositivo transmite o recibe datos.

Con los datos proporcionados por el datasheet del módulo LoRa SX1278 Ra-01, se realizaron los cálculos mostrados en la tabla 4-3, obteniendo un consumo de potencia para recepción y transmisión de 5.28mW y 5.94mW respectivamente.

Tabla 4-3 Cálculo del consumo energético del dispositivo LoRa

Consumo Energético/Datasheet			
Modo	Suministro de corriente (mA)	Voltaje (V)	Potencia (mW)
Rx	1.6	3.3	5.28
Tx	1.8	3.3	5.94

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Para el análisis del consumo energético de la tecnología LoRaWAN se realizó una comparativa con respecto al consumo energético de la tecnología ZigBee. En la tabla 5-3 se puede apreciar los resultados obtenidos con las mediciones efectuadas con multímetro al dispositivo, los cuales presenta un consumo de energético de 6,51mW para transmitir y de 4.78mW para recibir.

Tabla 5-3 Cálculo del consumo energético del dispositivo LoRa SX1278 Ra-01 según mediciones realizadas.

Consumo Energético/Mediciones Realizadas			
Modo	Suministro de corriente (mA)	Voltaje (V)	Potencia (mW)
Rx	1.49	3.21	4.78
Tx	2.03	3.21	6.51

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Según las mediciones realizadas por (Campos) en la caracterización del consumo en redes con la tecnología ZigBee, arrojaron como resultado un consumo energético de 111.8mW para recepción y 115.3 mW para transmitir, como se muestra en la tabla 6-3.

Tabla 6-3 Cálculo del consumo energético del módulo CC2480 ZigBee.

Consumo Energético/Mediciones Realizadas			
Modo	Suministro de corriente (mA)	Voltaje (V)	Potencia (mW)
Tx	38.45	2.99	115.3
Rx	37.28	2.99	111.8

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

De acuerdo con la tabla 5-3 y tabla 6-3, se puede apreciar que el consumo energético cuando el dispositivo se encuentra en modo transmisión es superior en el módulo CC2480 ZigBee con respecto al módulo LoRa SX1278 Ra-01, lo mismo sucede cuando el dispositivo se encuentra en modo recepción. La diferencia significativa entre estos dos dispositivos es mayor a los 100mW; en relación con ZigBee, la tecnología LoRaWAN tiene un menor consumo energético.

3.4.4. Prueba 4: Análisis de costos

A continuación, en la tabla 7-3 se detallan los elementos utilizados en la elaboración de los nodos transmisores y coordinador (Gateway) del sistema de monitoreo de calidad de aire con sus respectivos costos, dando un costo general de \$ 382.80.

Tabla 7-3 Detalle de los componentes que conforman el Nodo y Coordinador.

CANT.	DESCRIPCION	UNIDAD	TOTAL
3	Lora SX1278 Ra-01	\$20.00	\$60.00
2	Sensor PM	\$10.00	\$20.00
4	Sensor MQ136-131	\$40.00	\$160.00
2	Sensor MQ7	\$5.00	\$10.00
1	ESP8266 NODE MCU	\$5.00	\$5.00
2	Cables de conexión	\$2.00	\$4.00
3	Reguladores lm7805	\$0.70	\$2.10
2	Disipadores	\$0.50	\$1.00
6	Resistencias	\$0.05	\$0.30
3	Fuente reguladora XL4015	\$6.00	\$18.00
3	Fuente reguladora LM2596	\$4.50	\$13.50
1	Convertidor	\$3.00	\$3.00
3	Arduino Nano	\$7.00	\$21.00
6	Leds (verde y rojo)	\$0.10	\$0.60
2	Lcd 16 x 2 con i2c	\$5.00	\$10.00
3	Caja de filamento PLA	\$15.00	\$45.00
3	Fuentes de alimentación	\$3.00	\$9.00
2	Conectores para arduino	\$0.50	\$1.00
TOTAL		\$127.35	\$382.80

Realizado por: Cantuña & Satián

El valor del sistema implementado es de bajo costo en comparación a sistemas similares con la misma tecnología como lo es SMARTHUMAN AIR QUALITY MONITOR LORA, el cual se puede apreciar en la figura 11-3.

Figura 11-3 Precio en el mercado de SMARTHUMAN AIR QUALITY MONITOR LORA

Fuente: (Mc Electronics, 2018)

En la tabla 8-3 se describen los diferentes parámetros que proporciona cada uno de los sistemas desarrollados con dispositivos LoRaWAN y sus respectivas características.

Tabla 8-3 Comparación entre el sistema de monitoreo y Smarthuman Air Quality Monitor

Características	Sistema de Monitoreo	SmartHuman Air Quality Monitor
Precio	\$382.80	\$8950
Número de Gases que mide	CO, NO2, SO2, O3, PM	Temperatura, CO2, Humedad
Clase de dispositivo	Clase C	Clase A
Antena	Externa	Externa
Plataforma	Gratuita	Gratuita
Número de usuarios	Ilimitados	Único
Caja de protección	Si	No

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

3.4.5. Prueba 5: Grado de satisfacción del usuario final

Como parte fundamental de este trabajo de titulación, se optó por hacer una prueba en base al grado de satisfacción; para el correcto desarrollo de la prueba propuesta, se realizó encuestas a una muestra de la población total (estudiantes de la Unidad Educativa).

Para sacar la muestra se confirmó con las autoridades de la Institución el número exacto de escolares matriculados, los cuales nos manifestaron que existen 2340 miembros. Para el cálculo de la muestra necesaria, se utilizó la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * P * Q}{e^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * P * Q}$$

Donde los datos utilizados se detallan en la tabla 9-3.

Tabla 9-3 Datos necesarios para determinar la muestra

Símbolo	Significado	Valor
N	Tamaño de la población	2340
Z_α	Parámetro estadístico que depende del Nivel de Confianza (NC)	1,96
P	Probabilidad de que si ocurra el evento	50%
Q	Probabilidad de que no ocurra el evento	50%
e	Margen de error	5%

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

$$n = \frac{2340 * 1.96^2 * 50 * 50}{5^2 * (2340 - 1) + 1.96^2 * 50 * 50}$$

$$n = \frac{22473360}{25 * 2339 + 9604}$$

$$n = \frac{22473360}{58475 + 9604}$$

$$n = \frac{22473360}{68079}$$

$$n = 331 \text{ encuestas}$$

3.4.5.1. Resultados de la encuesta dirigida a los estudiantes de la Unidad Educativa Santo Tomás Apóstol

- **Pregunta 1: ¿Se siente afectado por los gases emanados de las calderas de la Empresa Cerámica?**

En la tabla 10-3 se observa la frecuencia y porcentaje con respecto a la primera pregunta realizada en la encuesta sobre los gases emanados.

Tabla 10-3 ¿Se siente afectado por los gases emanados de las calderas de la Empresa Cerámica?

Nº	Alternativa	Frecuencia	Porcentaje
1	SI	262	79,2%
2	NO	69	20,8%
	TOTAL	331	100%

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Interpretación de resultados: Con referente a los datos obtenidos en la tabla 10-3, el 79,2% de los estudiantes reconocen que se sienten afectados por los gases emanados por la Empresa y tan solo el 20,8% no sienten ninguna afectación, ni presentan inconformidad.

En el gráfico 5-3 se visualiza la estadística en porcentaje de contestación con referente a la emanación de gases.

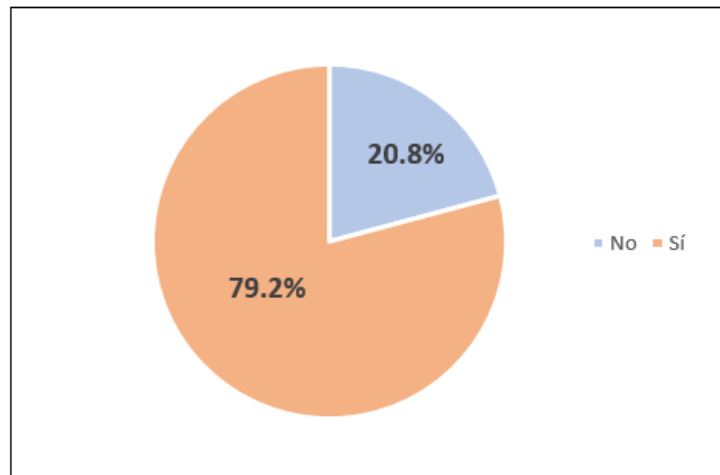


Gráfico 9-3 ¿Se siente afectado por los gases emanados de las calderas de la Empresa Cerámica?

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Análisis: La mayoría de los estudiantes consideran sentirse afectados por los gases tóxicos emanados por parte de la Empresa; por lo cual, la empresa debería estar situada en un lugar de acuerdo con la actividad industrial que realiza y no situarse en el centro de la ciudad.

- **Pregunta 2: ¿Considera importante tener un sistema de monitoreo de calidad de aire en su Institución funcionando permanentemente?**

En la tabla 11-3 se observa la frecuencia y porcentaje con respecto a la segunda pregunta realizada en la encuesta sobre la importancia del sistema.

Tabla 11-3 ¿Considera importante tener un sistema de monitoreo de calidad de aire en su Institución funcionando permanentemente?

Nº	Alternativa	Frecuencia	Porcentaje
1	SI	278	84%
2	NO	53	16%
	TOTAL	331	100%

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Interpretación de resultados: Con referente a los datos obtenidos en la tabla 11-3, el 84% de los estudiantes reconocen que es importante que el sistema instalado funcione permanentemente para estar prevenidos de la contaminación y tan solo el 16% no sienten que sea necesario el sistema.

En el gráfico 6-3 se visualiza la estadística en porcentaje de contestación con referente a la importancia de poseer un sistema de calidad ambiental.

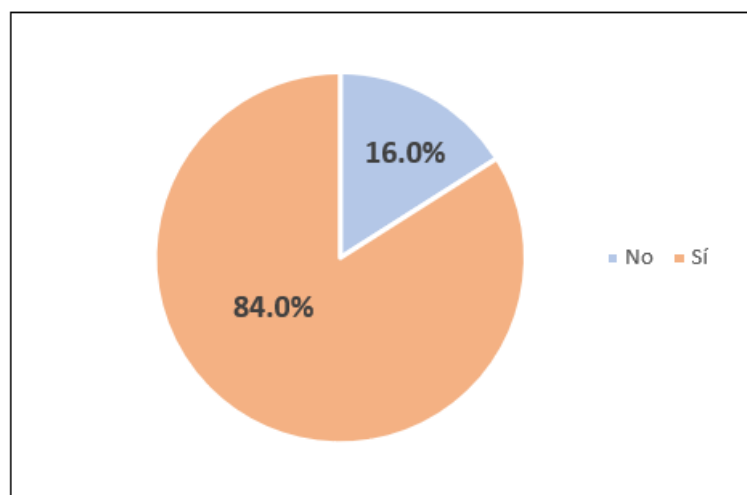


Gráfico 10-3 ¿Considera importante tener un sistema de monitoreo de calidad de aire en su Institución funcionando permanentemente?

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Análisis: Los estudiantes encuestados de la Unidad Educativa, piensan que es importante tener instalado un sistema de monitoreo en su Institución funcionando permanentemente ya que, gracias al dispositivo podrían estar informados sobre los contaminantes existentes.

- **Pregunta 3: ¿Es importante para Ud. recibir mensajes de alerta, cuando la contaminación ambiental supera los límites establecidos?**

En la tabla 12-3 se observa la frecuencia y porcentaje con respecto a la tercera pregunta realizada en la encuesta sobre la importancia de los mensajes de alerta del sistema.

Tabla 12-3 ¿Considera importante tener un sistema de monitoreo de calidad de aire en su Institución funcionando permanentemente?

N°	Alternativa	Frecuencia	Porcentaje
1	SI	274	82,8%
2	NO	57	17,2%
	TOTAL	331	100%

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Interpretación de resultados: Con referente a los datos obtenidos en la tabla 12-3, el 82,8% de los estudiantes afirman que es de suma importancia recibir mensajes de alerta y el restante de estudiantes no creen que sea necesario las alertas.

En el gráfico 7-3 se visualiza la estadística en porcentaje de contestación con referente a la importancia de recibir mensajes de alerta.

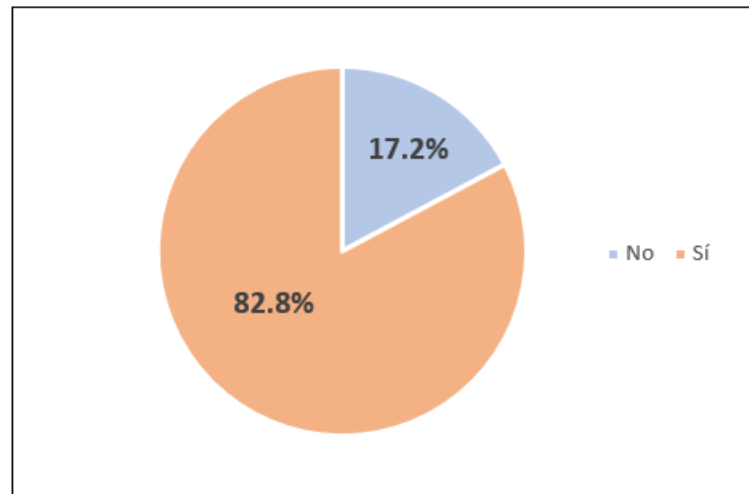


Gráfico 11-3 ¿Es importante para Ud. recibir mensajes de alerta, cuando la contaminación ambiental supera los límites establecidos?

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Análisis: Los estudiantes de la Unidad Educativa dan a conocer que es importante recibir mensajes de alerta cuando la contaminación del aire supera los límites establecidos por la NECA ya que, gracias a estos mensajes podrían los alumnos tomar las debidas precauciones para proteger su salud.

- **Pregunta 4: ¿Considera que la app ThingView es fácil de manejar y comprender?**

En la tabla 13-3 se observa la frecuencia y porcentaje con respecto a la cuarta pregunta realizada en la encuesta sobre el fácil manejo y comprensión de la aplicación utilizada.

Tabla 13-3 ¿Considera que la app ThingView es fácil de manejar y comprender?

N°	Alternativa	Frecuencia	Porcentaje
1	SI	259	78,2%
2	NO	72	21,8%
	TOTAL	331	100%

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Interpretación de resultados: Con referente a los datos obtenidos en la tabla 13-3, el 78,2% del alumnado perteneciente a la Institución aseguran que la aplicación utilizada es fácil de manejar y comprender, pero el 21,8% no comprenden como manejarla.

En el gráfico 8-3 se visualiza la estadística en porcentaje de contestación con referente al manejo de la aplicación.

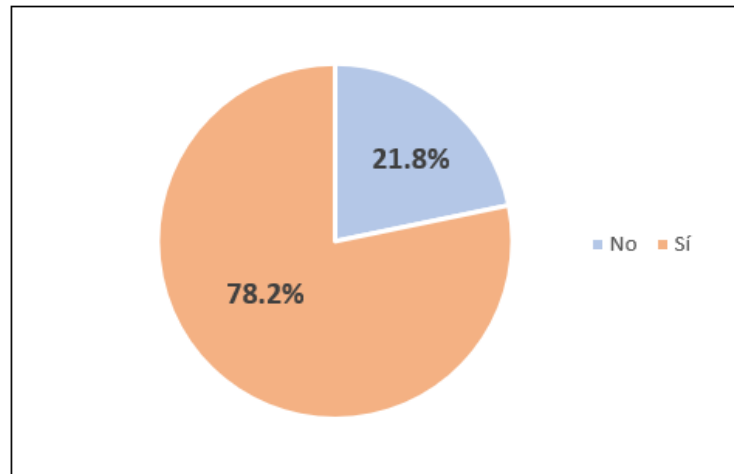


Gráfico 12-3 ¿Considera que la app ThingView es fácil de manejar y comprender?

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Análisis: La mayoría del alumnado opina que la App ThingView es fácil de manejar y comprender ya que, pueden visualizar y comprender la información proporcionada a través de medios multimedia.

- **Pregunta 5: ¿Los datos proporcionados por el sistema de monitoreo muestran los valores en tiempo real?**

En la tabla 14-3 se observa la frecuencia y porcentaje con respecto a la quinta pregunta realizada en la encuesta sobre la visualización de datos en tiempo real.

Tabla 14-3 ¿Los datos proporcionados por el sistema de monitoreo muestran los valores en tiempo real?

N°	Alternativa	Frecuencia	Porcentaje
1	SI	250	75,5%
2	NO	81	24,5%
	TOTAL	331	100%

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Interpretación de resultados: Con referente a los datos obtenidos en la tabla 14-3, el 75,5% de los encuestados afirman que los valores proporcionados por la aplicación son en tiempo real y tan solo el 24,5% dicen que no son en tiempo real.

En el gráfico 9-3 se visualiza la estadística en porcentaje de contestación con referente a la visualización de datos en tiempo real.

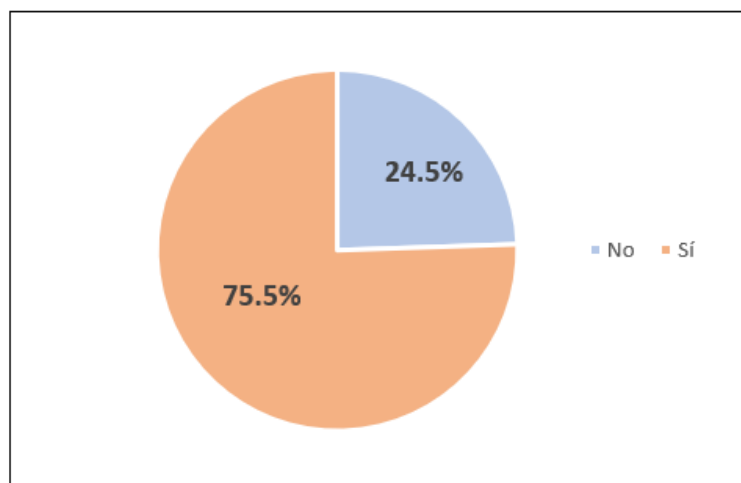


Gráfico 13-3 Los datos proporcionados por el sistema de monitoreo muestran los valores en tiempo real?

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Análisis: Los alumnos de la Unidad Educativa Santo Tomás Apóstol constataron que los datos proporcionados por el sistema de monitoreo a través de la aplicación móvil muestran los valores en tiempo real y que serán de gran ayuda hacia los estudiantes ya que, podrán estar monitoreando en cualquier momento la calidad de aire que están respirando.

- **Pregunta 6: ¿Se siente satisfecho con el beneficio brindado por el sistema de monitoreo?**

En la tabla 15-3 se observa la frecuencia y porcentaje con respecto a la sexta pregunta realizada en la encuesta sobre la satisfacción de los estudiantes con el servicio brindado por el sistema de monitoreo implementado en su Institución.

Tabla 15-3 ¿Se siente satisfecho con el beneficio brindado por el sistema de monitoreo?

Nº	Alternativa	Frecuencia	Porcentaje
1	SI	272	82,2%
2	NO	59	17,8%

	TOTAL	331	100%
--	--------------	------------	-------------

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Interpretación de resultados: Con referente a los datos obtenidos en la tabla 15-3, el 82,2% de los alumnos están satisfechos con el servicio brindado por el sistema de monitoreo y el porcentaje restante de estudiantes no se sienten bien con el servicio ofrecido.

En el gráfico 10-3 se visualiza la estadística en porcentaje de contestación con referente a la satisfacción con el servicio brindado por el sistema de monitoreo.

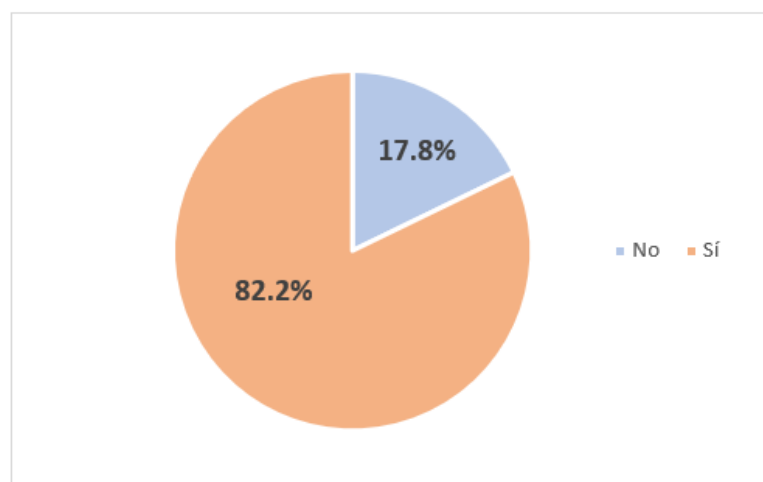


Gráfico 14-3 Se siente satisfecho con el beneficio brindado por el sistema de monitoreo?

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Análisis: Los estudiantes y personal administrativo de la Institución se encuentran satisfechos con el beneficio brindado por el sistema de monitoreo puesto que, el presente proyecto proporciona información eficiente, oportuna e inmediata acerca de la calidad de aire.

3.5. Resultados obtenidos del sistema de monitoreo

La plataforma IoT ThingSpeak permite la exportación de datos, los cuales son compatibles con otros softwares como Excel; se obtuvieron datos en bruto de cada uno de los contaminantes, durante los 10 días en que se desarrollaron las pruebas del sistema de monitoreo del aire.

Las pruebas a los dispositivos empezaron el día lunes 25 de febrero del 2019 hasta el día miércoles 6 de marzo del año en curso; cabe mencionar que 7 días es el tiempo recomendado según (Reina Aibar, 2014) y (Reyes, 2014), pero se realizó 3 días adicionales para poder tener más datos y

realizar un análisis más confiable. La información recolectada fue exportada de la base de datos a un archivo Excel, cuyos valores fueron alrededor de 29195 datos del Nodo A y de 25307 datos en el Nodo B.

La variación de datos recolectados por los nodos se debe a la ubicación del nodo A con respecto al nodo coordinador, se encuentran a una distancia más cercana (108 metros); mientras, el Nodo B con el nodo coordinador se encuentra a una distancia de más de 190 metros donde existe pérdida de datos.

3.5.1. Análisis en el Nodo A (desde el 25 de febrero al 06 de marzo del 2019)

Día uno: Los datos tomados el 25 de febrero se puede apreciar en el gráfico 15-3, donde se identifica cada uno de los contaminantes presentes en el aire; el contaminante que llega a niveles de alerta es el CO ya que se encuentra en el rango de 15000-30000 ug/m³ en dos lapsos del día, 00h00 - 04h30 y 12h00 - 15h30.

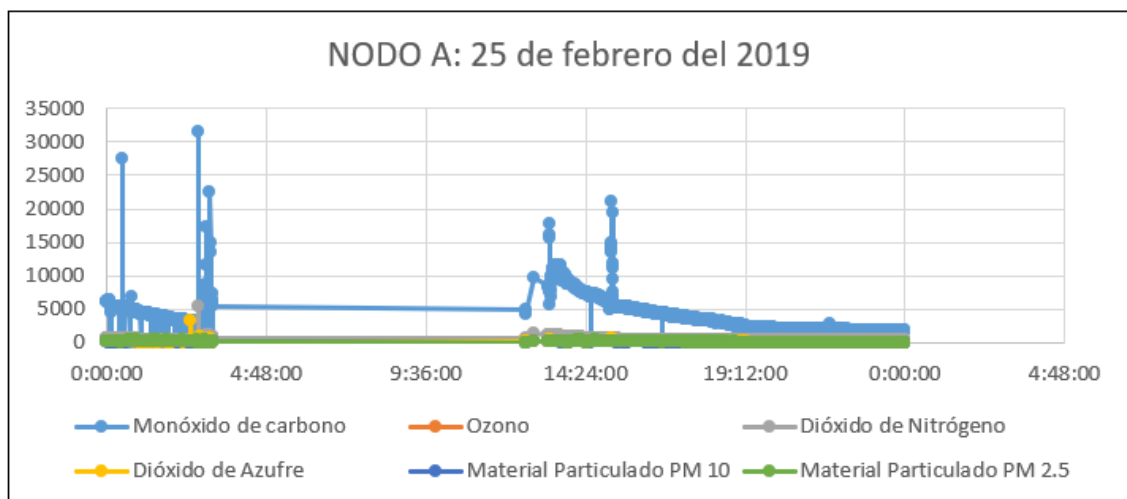


Gráfico 15-3 Contaminantes tomados el 25/02/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día dos: Los datos tomados el 26 de febrero se puede apreciar en el gráfico 16-3, donde el CO es el gas que se presenta en cortos lapsos de tiempo durante el día ya que toma valores superiores a los 15000 ug/m³.

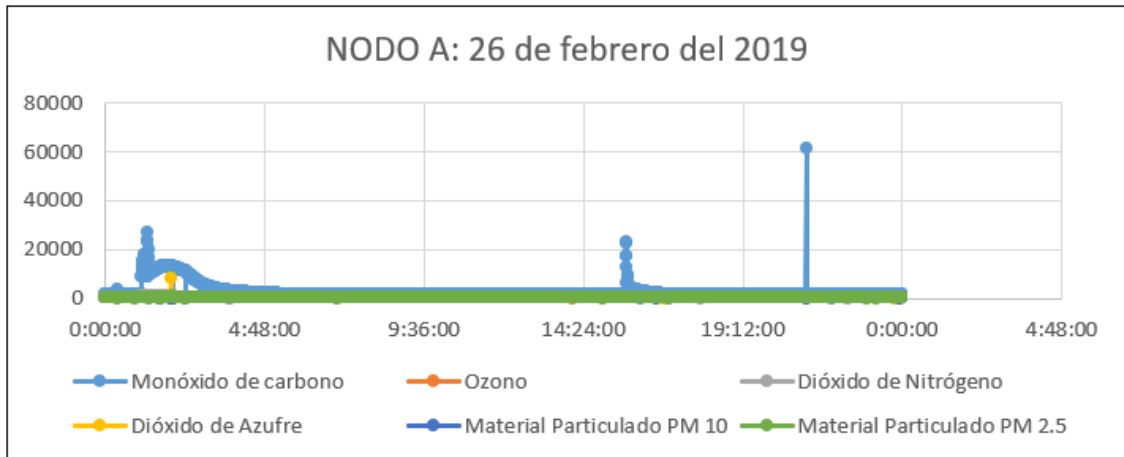


Gráfico 16-3 Contaminantes tomados el 26/02/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día tres: Los datos tomados el 27 de febrero se puede apreciar en el gráfico 17-3, donde el contaminante CO presentó altos niveles de concentración a partir del mediodía en adelante, llegando a un estado de alerta.

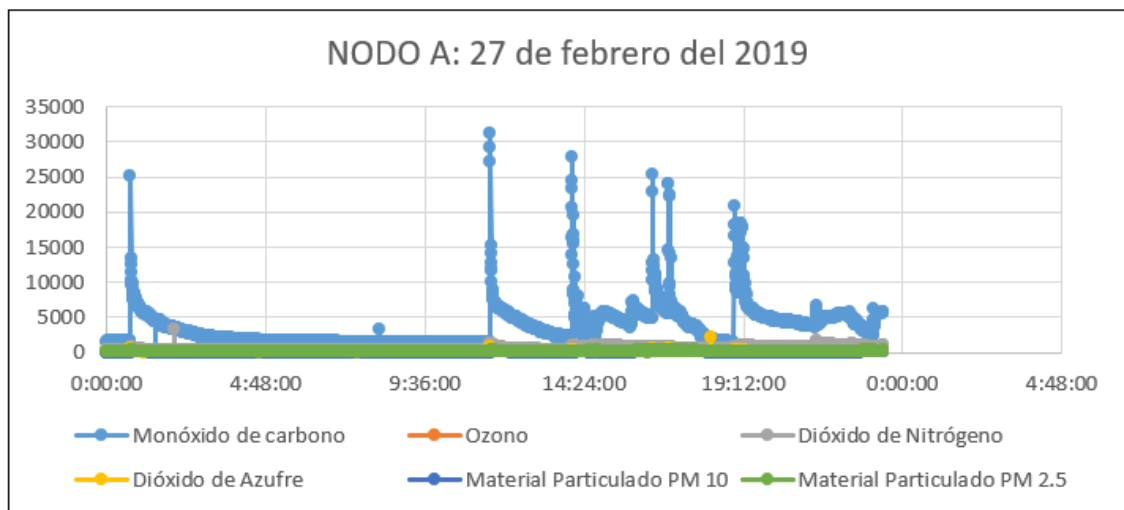


Gráfico 17-3 Contaminantes tomados el 27/02/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día cuatro: Los datos tomados el 28 de febrero se puede apreciar en el gráfico 18-3, donde durante el periodo de tiempo de 15h00 a 23h00 se presentó altos valores de los gases CO y SO₂, ya que sobrepasaron los 40000 ug/m³ y 1800 ug/m³ respectivamente entrando así a un nivel de emergencia.

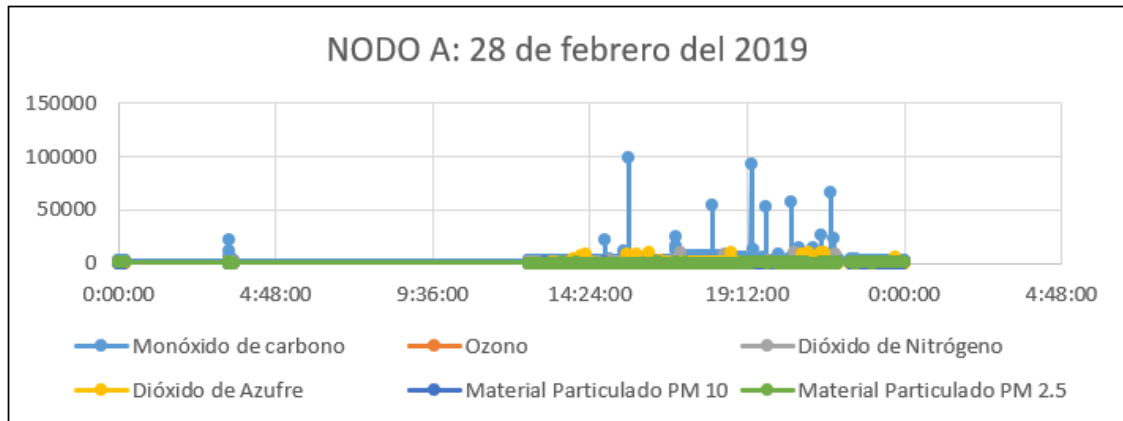


Gráfico 18-3 Contaminantes tomados el 28/02/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día cinco: Los datos tomados el 1 de marzo se puede apreciar en el gráfico 19-3, donde se observa un pico sobresaliente que corresponde al incremento de CO, además se notó que hubo la presencia de Material Particulado durante todo el día con niveles adecuados los cuales no afectan a la salud de los estudiantes.

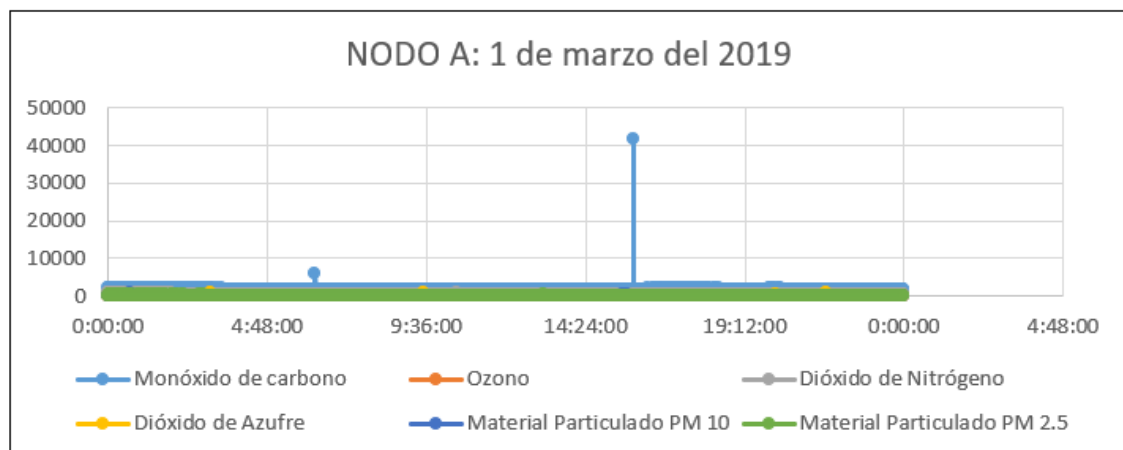


Gráfico 19-3 Contaminantes tomados el 01/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día seis: Los datos tomados el 2 de marzo se puede apreciar en el gráfico 20-3, donde se observó la presencia del gas SO₂ y PM, los cuales no sobrepasan las directrices establecidas para un nivel de alarma.

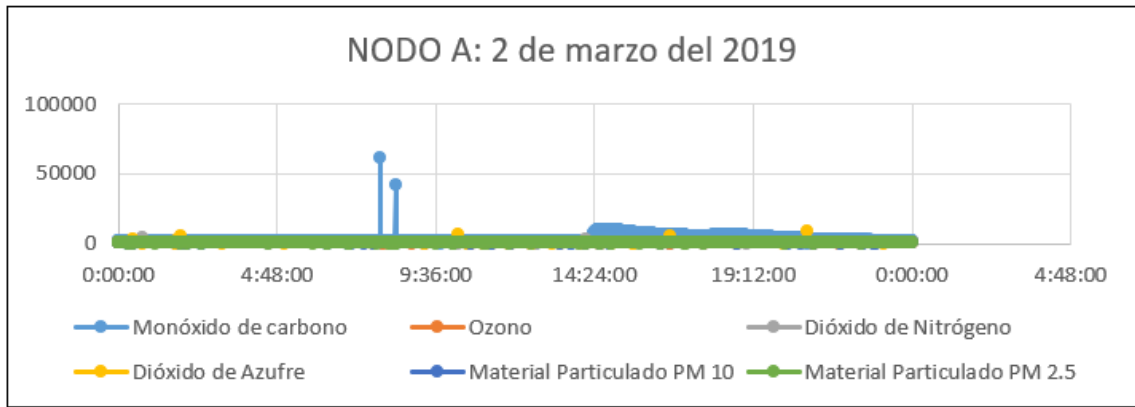


Gráfico 20-3 Contaminantes tomados el 02/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día siete: Los datos tomados el 3 de marzo se puede apreciar en el gráfico 21-3, donde los gases más concurrentes durante el día fueron el PM y el CO con un ligero incremento en los valores obtenidos por los sensores.

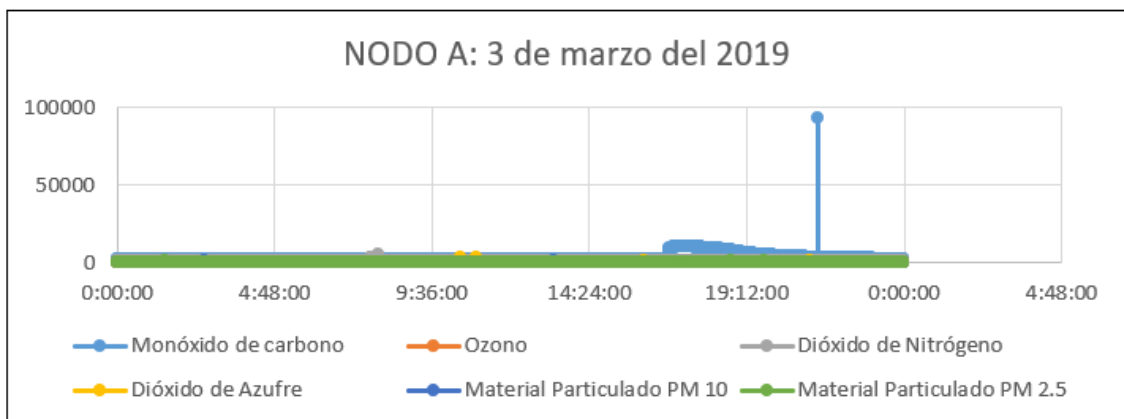


Gráfico 21-3 Contaminantes tomados el 03/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día ocho: Los datos tomados el 4 de marzo se puede apreciar en el gráfico 22-3, donde se identifica cambios del contaminante CO durante la tarde y a su vez, el gas PM se mantiene en un nivel normal.

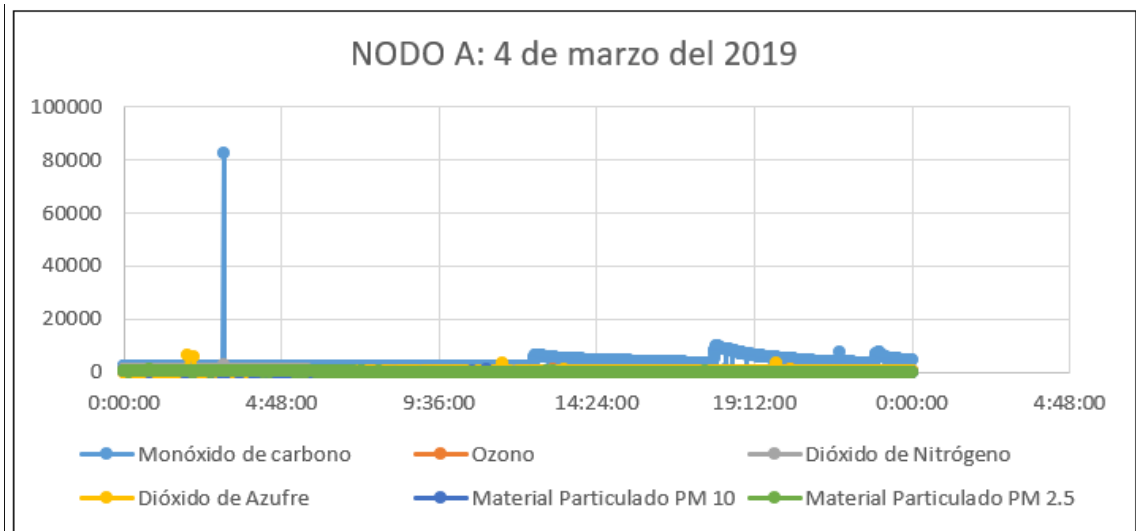


Gráfico 22-3 Contaminantes tomados el 04/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día nueve: Los datos tomados el 5 de marzo se puede apreciar en el gráfico 23-3, donde los niveles de SO₂ variaron a lo largo del día, pero sin llegar a niveles de emergencia; mientras que, el NO₂ no sobrepasó al nivel de alarma.

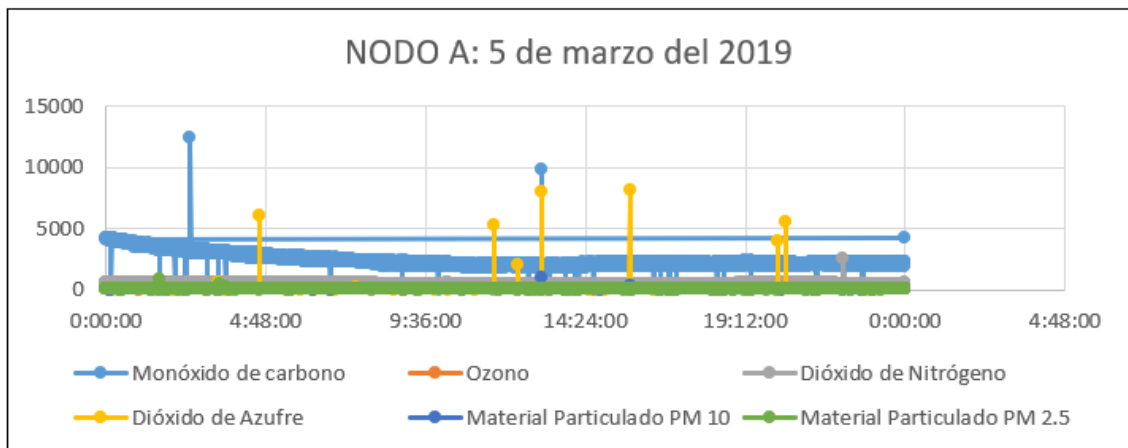


Gráfico 23-3 Contaminantes tomados el 05/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día diez: Los datos tomados el 6 de marzo se puede apreciar en el gráfico 24-3, donde el nivel que más varió fue el del gas PM manteniéndose durante el día en un estado de alarma, así como también, los gases SO₂ y NO₂ en cortos periodos de tiempo.

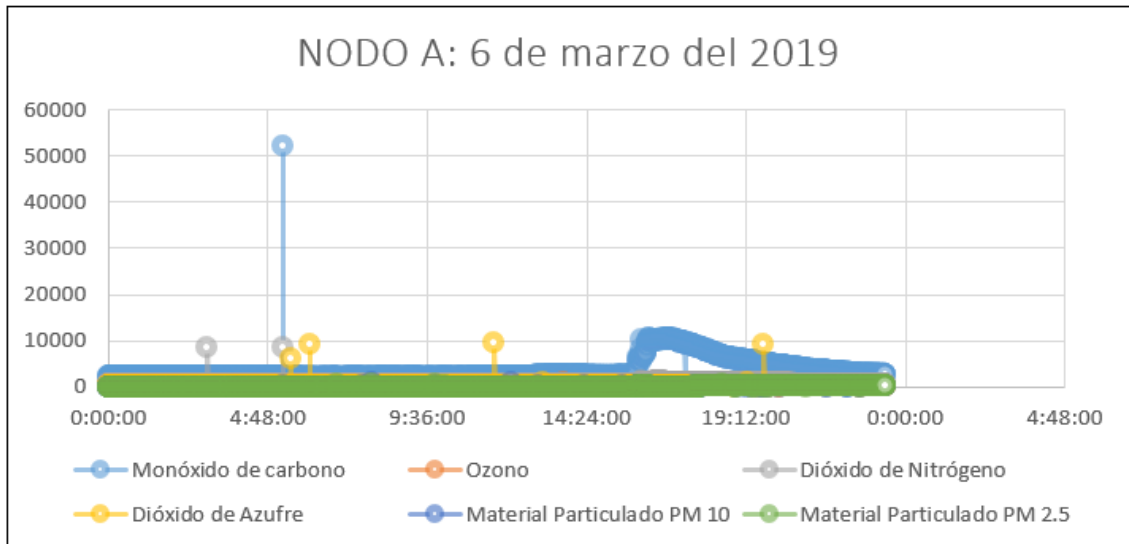


Gráfico 24-3 Contaminantes tomados el 06/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Una vez analizados los contaminantes que más inciden, se llegó a la conclusión que el polutante Monóxido de Carbono se presentó con un 38.89% con respecto a los otros gases, la hora de mayor incidencia se presencié a partir del mediodía.

3.5.2. Análisis en el Nodo B (desde el 25 de febrero al 06 de marzo del 2019)

Día uno: Los datos tomados el 25 de febrero se pueden apreciar en el gráfico 25-3, donde el contaminante CO permaneció en un estado de alerta desde las 12h00 en adelante; mientras que el SO₂ mostró contaminación en horas de la madrugada.

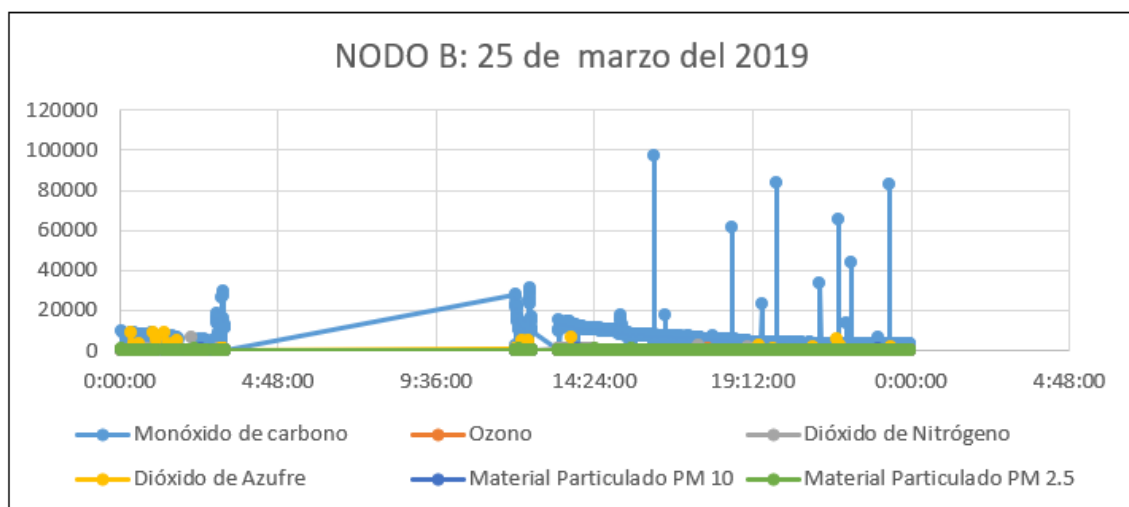


Gráfico 25-3 Contaminantes del nodo B tomados el 25/02/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día dos: Los datos tomados el 26 de febrero se pueden apreciar en el gráfico 26-3, donde se identifica cada uno de los gases contaminantes. Lo que más sobresale en la gráfica, es el incremento de CO durante todo el día sobrepasando los 30000 ug/m³ que corresponden a niveles de alarma, también se observa la presencia de SO₂ y NO₂ por períodos de tiempo muy cortos.

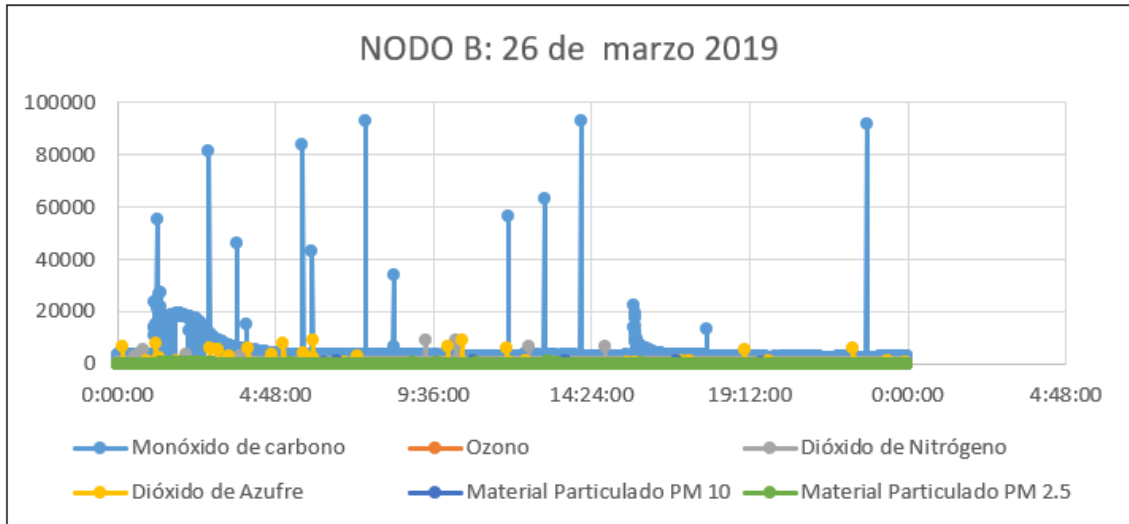


Gráfico 26-3 Contaminantes del nodo B tomados el 26/02/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día tres: Los datos tomados el 27 de febrero se pueden apreciar en el gráfico 27-3, donde el mayor registro de contaminación corresponde al gas CO que sobrepasa los niveles de emergencia y los gases NO₂ y SO₂ variaron a un estado de alerta pocas veces durante todo el día.

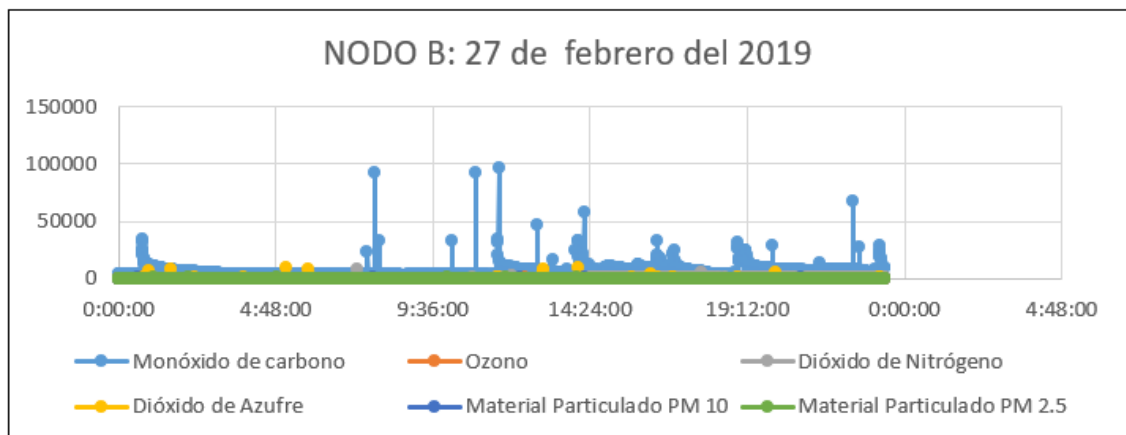


Gráfico 27-3 Contaminantes del nodo B tomados el 27/02/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día cuatro: Los datos tomados el 28 de febrero se pueden apreciar en el gráfico 28-3, donde se observa a los gases CO, NO₂, SO₂ y PM en estado de alarma ya que superaron las directrices establecidas.

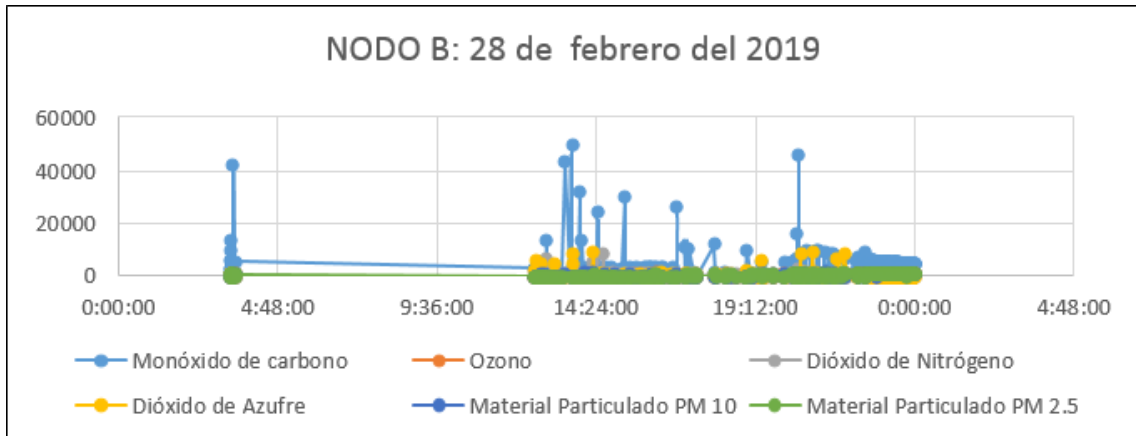


Gráfico 28-3 Contaminantes del nodo B tomados el 28/02/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día cinco: Los datos tomados el 1 de marzo se pueden apreciar en el gráfico 25-3, donde los niveles de PM alcanzaron un estado de alerta y en cortos periodos de tiempo el gas SO₂ alcanzó un nivel de alarma.

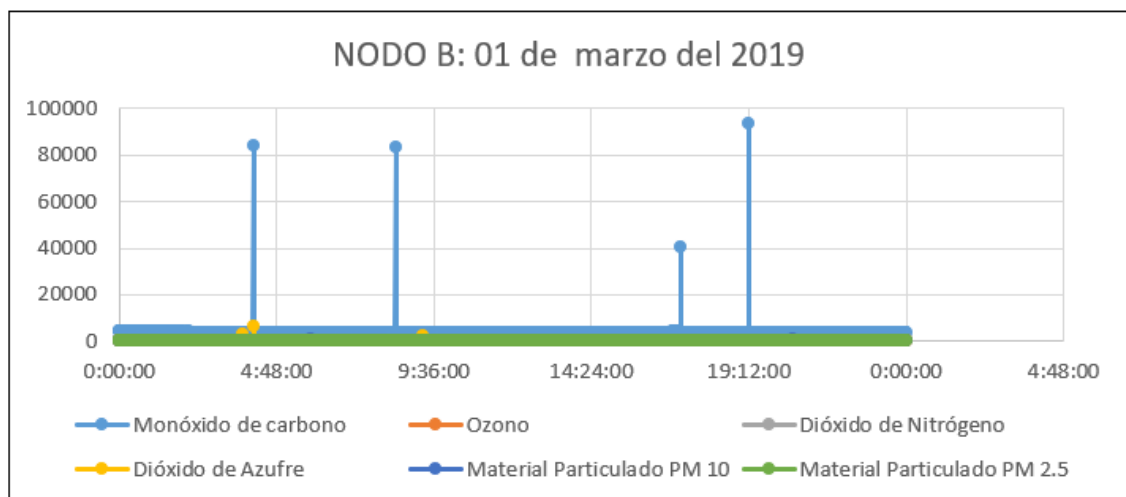


Gráfico 29-3 Contaminantes del nodo B tomados el 01/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día seis: Los datos tomados el 2 de marzo se pueden apreciar en el gráfico 30-3, donde se identifica cada uno de los contaminantes. Lo que más sobresale en la gráfica es el incremento del gas CO en la institución sobrepasando los 15000 ug/m³ alrededor de las 15h30 y el resto del día

permaneció en niveles adecuados; también se observa que el NO_2 estuvo presente en horas de la tarde entrando en el rango de nivel de alerta.

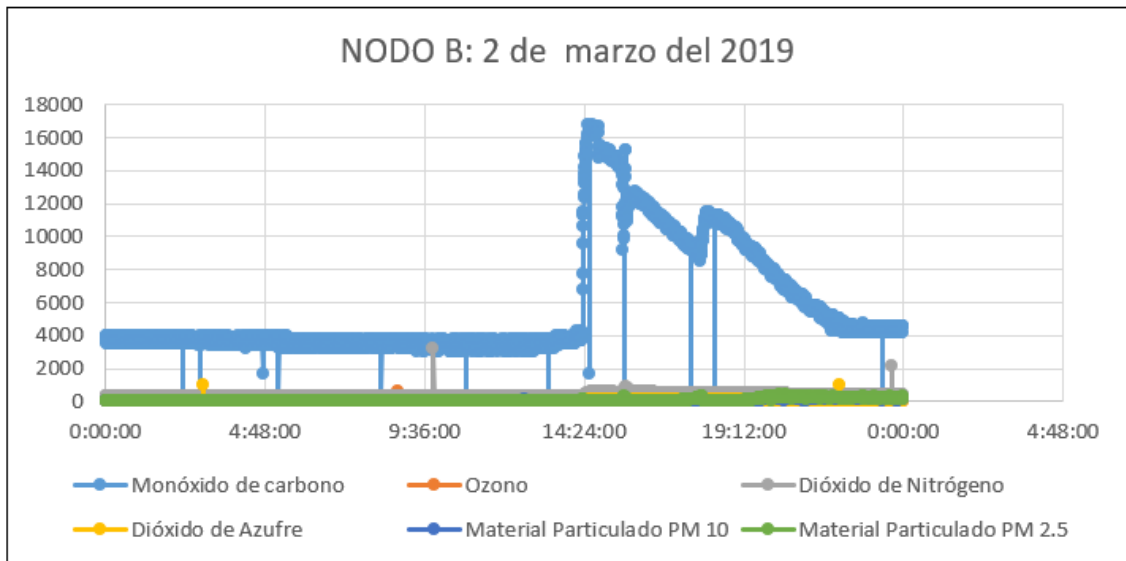


Gráfico 30-3 Contaminantes del nodo B tomados el 02/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día siete: Los datos tomados el 3 de marzo se pueden apreciar en el gráfico 31-3, donde el SO_2 , NO_2 , CO y O_3 llegaron a un estado de alerta durante la tarde del día.

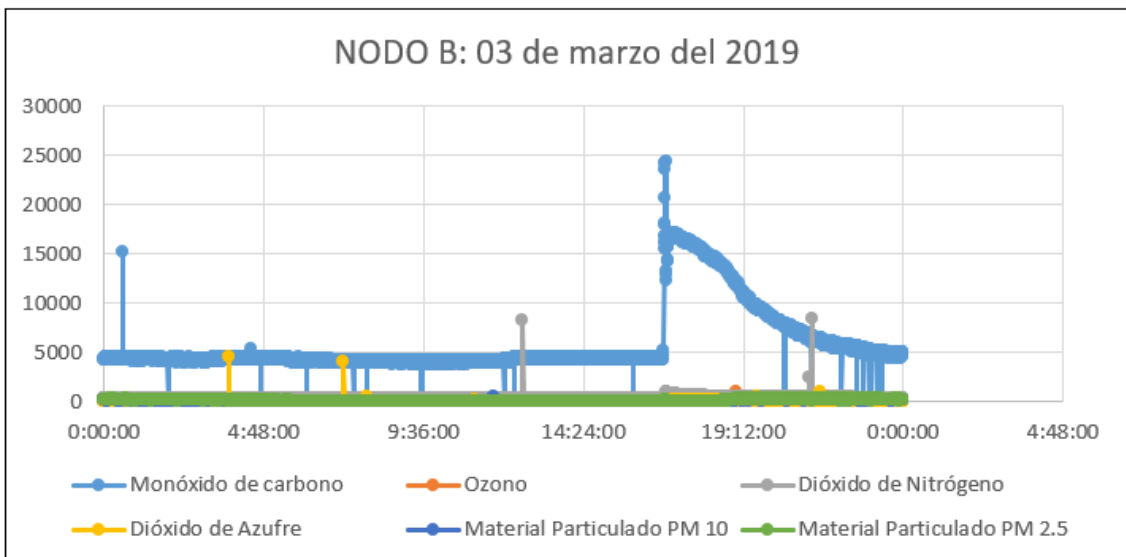


Gráfico 31-3 Contaminantes del nodo B tomados el 03/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día ocho: Los datos tomados el 4 de marzo se pueden apreciar en el gráfico 32-3, donde se ve un incremento del polutante CO en horas de la tarde permaneciendo en estado de alerta hasta la noche, se registró un estado SO₂ en horas de la madrugada.

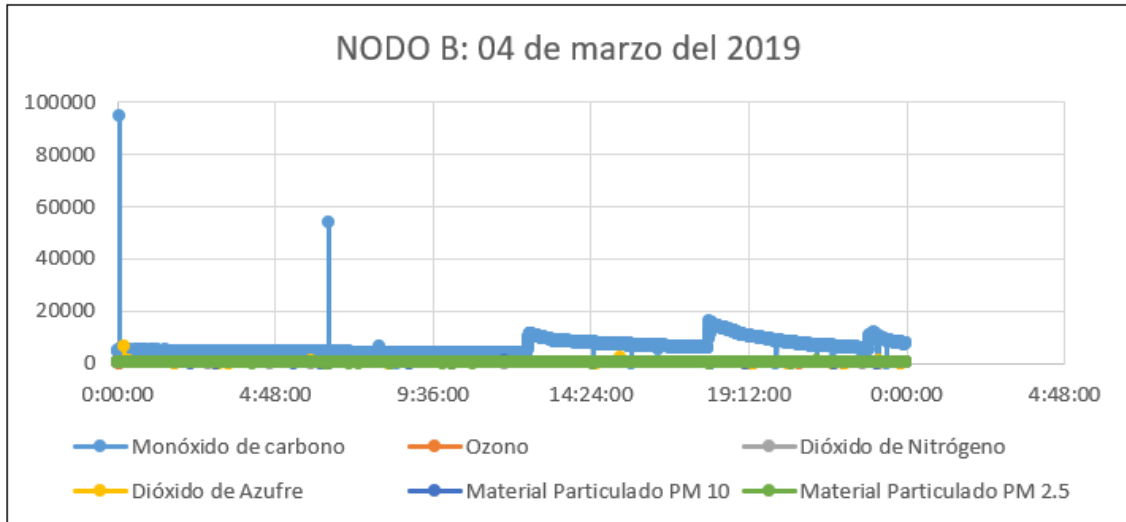


Gráfico 32-3 Contaminantes del nodo B tomados el 04/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día nueve: Los datos tomados el 5 de marzo se pueden apreciar en el gráfico 33-3, donde los niveles de CO variaron a lo largo del día, pero sin llegar a niveles de alerta; en diferentes horas el polutante SO₂ alcanzó un nivel alarma por periodos cortos de tiempo y el gas NO₂ permaneció en un nivel de alerta durante todo el día.

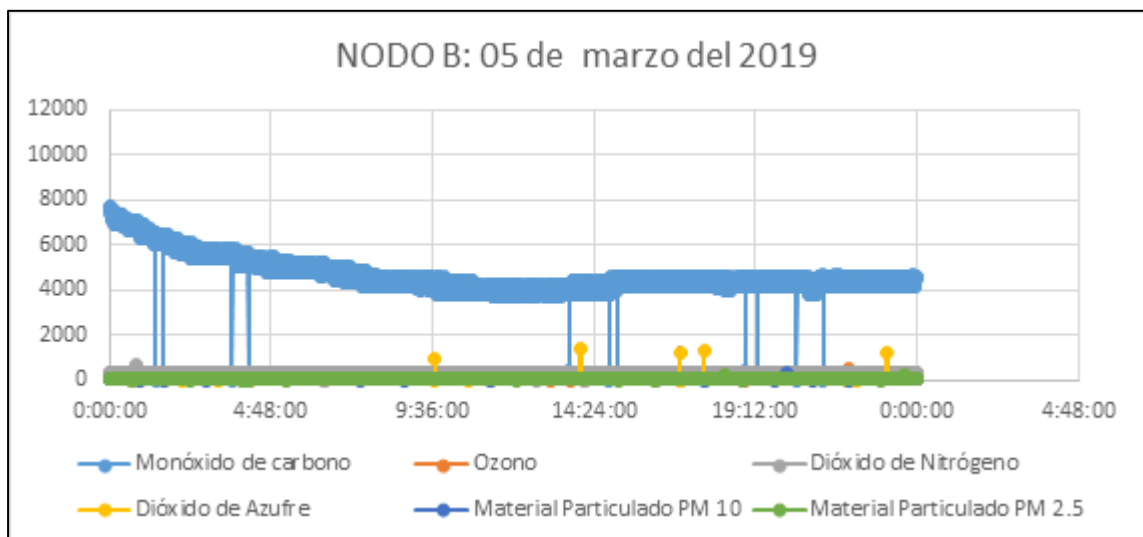


Gráfico 33-3 Contaminantes del nodo B tomados el 05/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Día diez: Los datos tomados el 6 de marzo se pueden apreciar en el gráfico 34-3, donde se observa dos picos pertenecientes al gas CO los cuales llegan a un nivel de alerta y que el gas SO₂ durante todo el día, permanece también en un estado de alerta.

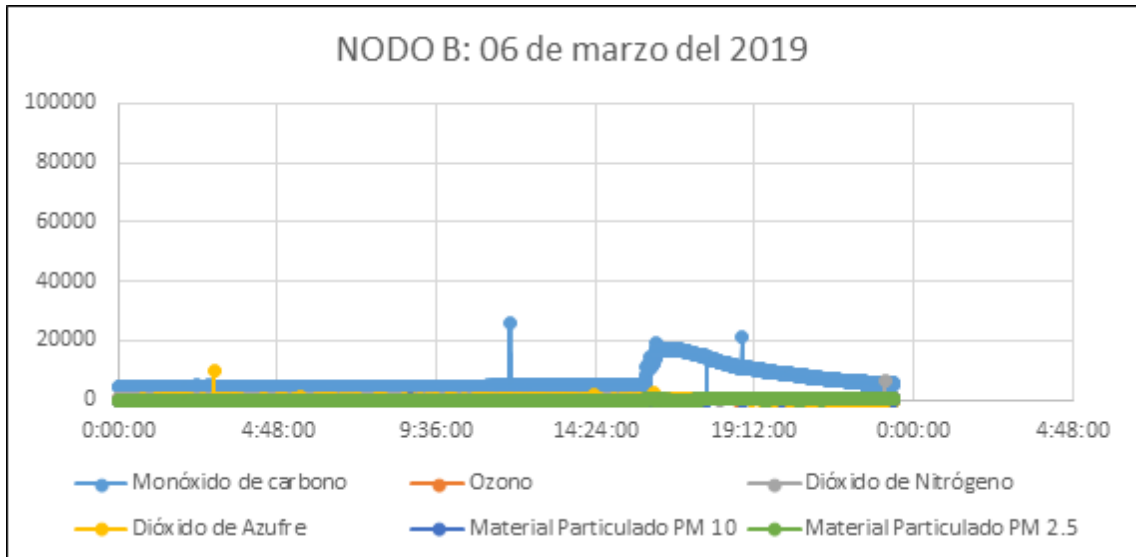


Gráfico 34-3 Contaminantes del nodo B tomados el 06/03/2019

Realizado por: Cantuña & Satián, 2019

Una vez analizados los contaminantes que más inciden, se llegó a la conclusión que los polutantes con mayor incidencia fueron el SO₂ con el 34,61% y el Monóxido de Carbono con un 30.77%, la hora de mayor incidencia se presentó en horas de la tarde.

CONCLUSIONES

- En la elaboración del presente trabajo de titulación, se ha investigado las características, topologías, modulación, clases de dispositivos LoRaWAN y parámetros de rendimiento aplicado a la tecnología, para definir una infraestructura de red adecuada a los requerimientos del sistema. De la misma manera, se realizó una revisión bibliográfica de artículos de investigación a nivel mundial y nacional, para dar a conocer el gran potencial y ventajas que puede proporcionar esta nueva tecnología en diferentes áreas aplicativas.
- Se diseñó la estructura adecuada para el prototipo propuesto, tomando en cuenta las condiciones ambientales en las que van a estar expuestos los dispositivos para la implementación del sistema de monitoreo de la calidad del aire en la Unidad Educativa Santo Tomás Apóstol Riobamba, el mismo que es capaz de recolectar datos en tiempo real para dar a conocer niveles de alerta, alarma y emergencia cuando existe una alta concentración de gases tóxicos en el aire mediante una aplicación móvil y página web.
- Los contaminantes que se midieron en la Unidad Educativa Santo Tomás Apóstol Riobamba según la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire fueron el Monóxido de Carbono, Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno, Ozono y Material Particulado; luego de la recolección y análisis de los datos se determinó de que en el Nodo A, la presencia de los gases que más se registraron durante los diez días de pruebas fueron: el CO con un porcentaje del 38.89%, seguido del PM con un 27.78%, luego el SO₂ con el 22.22% y el NO₂ con un 11.11% del total de los contaminantes, cabe mencionar que en el Nodo Transmisor A no hubo la presencia del polutante O₃ en los días de toma de datos. Por el contrario, en el Nodo B, la presencia de gases registrados dieron como resultado el SO₂ con un 34.61%, el CO con un 30.77%, el NO₂ con un 23.08%, luego el PM con un 7.69% y por último el O₃ con un 3.85% del total de los contaminantes; llegando a la conclusión que el gas que mayor incidencia tuvo en la Institución, fue el Monóxido de Carbono registrado por los nodos transmisores.
- Las pruebas realizadas con el fin de evaluar el funcionamiento del sistema implementado, mostraron los siguientes resultados, con respecto a la prueba de rango de funcionamiento de sensores, se concluye que a una distancia mayor a 10 metros de la fuente contaminadora los datos captados por los sensores se pierden en un 58.83%, en la prueba de alcance de la tecnología LoRaWAN, los resultados obtenidos garantizan el funcionamiento de la tecnología en un entorno urbano hasta una distancia máxima de

200m, cabe resaltar que las características técnicas proporcionadas por el datasheet del módulo menciona que el alcance es de 4km para el mismo entorno. Al realizar las mediciones correspondientes para la ejecución de la prueba de consumo energético, se llegó a la conclusión que la tecnología LoRaWAN es de bajo consumo debido a que, se hizo una comparativa entre el módulo LoRa SX1278 Ra-01 y el módulo CC2480 ZigBee, arrojando como resultado un consumo bajo para transmisión y recepción de 6.51mW y 4.78mW respectivamente para LoRaWAN en comparación a ZigBee, que presenta un consumo para transmitir y recibir datos de 115.3mW y 111.8mW respectivamente. Para realizar el análisis de costos, se cotejó parámetros similares del sistema de monitoreo implementado con el sistema SmartHuman Air Quality Monitor existente en el mercado, donde el primer sistema mide cinco gases y el segundo mide tan solo tres gases, teniendo una diferencia alta con respecto a su valor económico; y por último, para saber el grado de satisfacción de los 2340 alumnos se tomó una muestra de 331 para realizar una encuesta donde el 82.20% afirma que se siente satisfecho con el beneficio brindado por parte del sistema implementado.

- El sistema de monitoreo de la calidad de aire desarrollado con la tecnología LoRaWAN orientada al uso de la plataforma IoT ThingSpeak, permitió que las comunicaciones fuesen más interactivas y estables al momento de brindar información eficaz y oportuna a los estudiantes en tiempo real en comparación a otros sistemas inalámbricos existentes.
- El sistema de monitoreo implementado no se logró comparar con un equipo certificado ya que se presentaron algunos inconvenientes como: la toma de mediciones con el sistema certificado del laboratorio CESSTA de la ESPOCH tienen altos costos, debido a que las 5 muestras tienen un valor de \$616. La Estación de Monitoreo de Aire del GAD Municipalidad de Ambato también colabora con las prestación de los equipos certificados pero el inconveniente que presenta es la demora en los trámites para prestar su servicio al igual que el laboratorio ambiental de Quito ALS Corplabec S.A.

RECOMENDACIONES

- Cambiar la antena que viene por defecto en los módulos Ra-01 LoRa SX1278, por una antena denominada peregrine semiconductor RF que posee una mayor ganancia, obteniendo una mayor cobertura sin elevar el voltaje en el transmisor.
- Indagar sobre las posibles formas de encriptación AES 128 que podrían realizarse en la tecnología LoRaWAN, para la transmisión y recepción de información confidencial en cada una de sus capas; además, la utilización de AES para las IoT.
- Al utilizar los dispositivos electrónicos (Arduino, ESP8266 NODE MCU), se debe utilizar una fuente de alimentación externa de 3.3 debido que, Arduino utiliza un regulador interno para variar el voltaje porque usa 5 voltios para los pines de control y comunicación SPI; mientras que, los transceivers LoRa solo funcionan a 3.3 voltios.
- Al comprar los módulos LoRa es recomendable tener en cuenta la frecuencia de operación y la normativa de radio frecuencia de bandas libres o permitidas en el país donde se realizará el proyecto, debido a que pueden interferir en otras frecuencias ya utilizadas y tener inconvenientes legales.
- Con la información obtenida del sistema de monitoreo de la calidad de aire, se podría realizar charlas de prevención y elaboración de planes de contingencia para tomar las debidas precauciones en caso de presentarse niveles altos de los gases contaminantes.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

ADC	Analogic Digital Converter (Conversor Analógico/Digital)
API	Application Programming Interface (Interfaz de Programación de Aplicaciones)
BLE	Bluetooth Low Energy (Bluetooth de Baja Energía)
BW	Bandwith (Ancho de Banda)
CF	Carrier Frequency (Frecuencia de Portadora)
CO	Monóxido de Carbono
CR	Coding Rate (Tasa de Codificación)
CSS	Chirp Spread Spectrum
DC	Direct Current (Corriente Directa)
GPIO	General Purpose Input/Output (Entrada/Salida de Propósito General)
GUI	Graphical User Interface (Interfaz Gráfica de Usuario)
HTTP	Hypertext Transfer Protocol (Protocolo de Transferencia de Hipertexto)
I2C	Inter Integrated Circuits (Circuito Inter-Integrado)
IDE	Integrated Development Environment (Entorno de Desarrollo Interactivo)
IOT	Internet of Things (Internet de las Cosas)
ISM	Industrial, Scientific and Medical Frequency Band (Banda de Frecuencia para el Área Industrial, Científica y Médica)
LAN	Local Area Network (Red de Área Local)
LCD	Liquid Cristal Display (Pantalla de Cristal Líquido)
LORA	Long Range Modulation (Modulación de Espectro Expandido)
LPWAN	Low-Power Wide-Area Network (Red de Área Amplia de Baja Potencia)
M2M	Machine to Machine (Máquina a Máquina)
MCU	Microcontroller Unit (Microcontrolador)
MISO	Master Input Slave Output (Salida de Datos del Esclavo y Entrada de Datos al Máster)
MOSI	Master Output Slave Input (Salida de Datos del Máster y Entrada de Datos del Esclavo)
NECA	Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire
NFC	Near Field Communication (Comunicación de Campo Cercano)
NO₂	Dióxido de Nitrógeno
O₃	Ozono
PM	Material Particulado
REST	Representational State Transfer (Transferencia de Estado Representacional)
RF	Radiofrecuencia

SO₂	Dióxido de Azufre
SPI	Serial Peripheral Interface (Interfaz Periférica Serial)
SS	Slave Selection (Selección de Esclavo)
TP	Transmission Potency (Potencia de Transmisión)
UDP	User Datagram Protocol (Protocolo de Datagramas de Usuario)
WAN	Wide Area Network (Red de Área Amplia)
WSN	Wireless Sensor Networks (Redes de Sensores Inalámbricos)

BIBLIOGRAFÍA

ACCENT SYSTEMS. ¿Qué es el IOT?, [en línea] 2012. [Consulta: 20 agosto 2018]. Disponible en: <https://accent-systems.com/es/que-es-iot/>.

ALIBABA. Mq-136 Hydrogen Sulfide Sensor Module Mq136 Hydrogen Sulfide Detecting Sensor - Buy Hydrogen Sulfide Sensor Module, Hydrogen Sulfide Detecting Sensor, Mq-136 Hydrogen Sulfide Sensor Module Product [en línea], 2018. [Consulta: 28 noviembre 2018] Disponible en: https://www.alibaba.com/product-detail/MQ-136-hydrogen-sulfide-sensor-module_60190410074.html.

AMAZON.IN. Ai-Thinker Ra-01, LoRa Module, RF Wireless Transceiver based on SX1278, 10KM Ultra Long Range for IOT: Amazon.in: Industrial & Scientific [en línea], 2017. [Consulta: 28 noviembre 2018] Disponible en: <https://www.amazon.in/Ai-Thinker-Module-Wireless-Transceiver-SX1278/dp/B073T3CX57>.

ARDUINO. Arduino - SPI [en línea], 2017. [Consulta: 28 noviembre 2018] Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>.

AUGUSTIN, A., Yi, J., Clausen, T., Townsley, W. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors* 16, 1466, [en línea], 2016. [Consulta: 28 noviembre 2018] Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s16091466>.

AVILA, P. Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricas con LoRaWAN en ambientes forestales (trabajo de titulación). [en línea], Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. 2017. [Consulta: 28 noviembre 2018] Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28504>

BOR, M., Roedig, U. "LoRa Transmission Parameter Selection, in: 2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)", *IEEE*, [en línea], 2017, (Ottawa), pp. 27–34. [Consulta: 28 noviembre 2018] Disponible en: <https://doi.org/10.1109/DCOSS.2017.10>.

BORRERO, J., Fernández, G., Rodríguez, C. Aplicación de la tecnología LoRaWAN en la agricultura. *ResearchGate*. [en línea], 2018, [Consulta: 28 diciembre 2018] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24492.77443>.

BRAVO, B., Belduma, L. Diseño de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo del tránsito vehicular y la contaminación CO2 dentro de un sector urbano [en línea] (trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador., 2017 [Consulta: 28 diciembre 2018] Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14153/1/UPS-CT006969.pdf>

CAMPAÑA, S., Londoño, J. "Estudio de redes de sensores y aplicaciones orientadas a la recolección y análisis de señales biomédicas". *Rev. GTI 12*. [en línea], 2013, pp. 85–99. [Consulta: 28 diciembre 2018] Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagti/article/view/3558>

CAPELLA, J.V. Redes inalámbricas de sensores: una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos [en línea] (trabajo de titulación). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. 2010. [Consulta: 16 enero 2019] Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8417/tesisUPV3326.pdf>

CAZCO Castelli, F., Mitigación de la contaminación del aire por material particulado y gases de combustión de automotores en el centro comercial de Riobamba [en línea] (trabajo de titulación). Universidad Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2012. [Consulta: 12 diciembre 2018] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4232>

CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR. Calidad ambiental [en línea], 2013 [Consulta: 11 febrero 2019] Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/sociedad-y-ambiente/sistema-de-calidad-ambiental.html>

CORPORACIÓN MEDIUM. Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 1.- ¿Qué es LoRa y LoRaWAN? [en línea], 2017. [Consulta: 16 agosto 2018] Disponible en: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-cap%C3%ADtulo-1-qu%C3%A9-es-lora-y-lorawan-8c08d44208e8>.

CRUZ, M., Oliete, P., Morales, C., González, C., Cendón, B., Hernández, A. Las tecnologías IOT dentro de la industria conectada: Internet of things. [en línea], 2015. [Consulta: 20 agosto 2018] Disponible en: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/21125/las-tecnologias-iot-dentro-de-la-industria-conectada-40>

DELGADO, J. Derecho a vivir en un ambiente sano frente a la contaminación de la “Empresa Cerámica.” [en línea] (trabajo de titulación), UNIANDES, Riobamba, Ecuador. 2016. [Consulta: 29 agosto 2018] Disponible en: <http://dspace.uniandes.edu.ec/handle/123456789/4405>

DIYPROJECTS. Calculate the Air Quality Index (IAQ, IQA) with a DSM501 on Arduino or ESP8266 • DIY Projects [en línea]. 2017. [Consulta: 28 noviembre 2018] Disponible en: https://diyprojects.io/calculate-air-quality-index-iaq-iqa-dsm501-arduino-esp8266/#.W_79Z2gzZPZ

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Fundamentos del índice de la calidad del aire (AQI) [en línea]. 2016 [Consulta: 17 agosto 2018] Disponible en: https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi_sp.

ESPRESSIF. ESP8266 Overview | Espressif Systems [en línea]. 2016. [Consulta: 17 agosto 2018] Disponible en: <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>.

FÁBRICA DIGITAL, 2018. Sensor de monóxido de carbono (CO) MQ-7 – [en línea]. 2018 [Consulta: 17 agosto 2018] Disponible en: <https://fabricadigital.org/tienda/sensor-de-monoxido-de-carbono-co-mq-7/>.

FERNÁNDEZ, R., Ordieres, J., Martínez, F., González, A., Alba, F., Lostado, R., Pernía, A. Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica, (trabajo de titulación) [en línea]. 2009. Universidad de la Rioja Servicio de Publicaciones. ed. Madrid. [Consulta: 17 agosto 2018] Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/377564.pdf>

GAYBOR, M.A., Maridueña, M.D. Diseño de un sistema de adquisición de datos de una red de sensores inalámbricos que miden variables oceanográficas en el perfil costanero de Santa Elena, usando tecnologías oceanográficas en el perfil costanero de Santa Elena, usando tecnología LoRa. (trabajo de titulación) [en línea]. 2017. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. [Consulta: 17 agosto 2018] Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/44445>

GERBER, A. Construir ciudades conectadas con tecnologías de IoT nuevas y existentes [en línea]. 2017. [Consulta: 17 agosto 2018] Disponible en: <http://www.ibm.com/developerworks/ssa/library/iot-lp201-iot-connected-cities/index.html> (accessed 8.20.18).

GROBOTRONICS. Carbon Monoxide Sensor MQ-7 [en línea]. 2011. [Consulta: 11 agosto 2018] Disponible en: <https://grobotronics.com/carbon-monoxide-sensor-mq-7.html?sl=en>.

HANSON, M., Powell, H., Barth, A., Ringgenberg, K., Calhoun, B., Aylor, J., Lach, J. Body Area Sensor Networks: *Challenges and Opportunities* 42. [en línea]. 2009. [Consulta: 11 agosto 2018] Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MC.2009.5>

HETPRO. Tarjeta de desarrollo NodeMCU ESP8266 0.9 | HeTPro [WWW Document]. [Consulta: 28 noviembre 2018] Disponible en: <https://hetpro-store.com/tarjeta-de-desarrollo-nodemcu-esp8266-0.9/>

HUIDROBO, J. Redes de sensores inalámbricos [en línea]. 2014. Zonamovilidad.es. [Consulta: 28 noviembre 2018] Disponible en: <https://www.zonamovilidad.es/noticia/6731/reportajes/redes-de-sensores-inalambricos.html>.

INDIAMART. 5v To 3.3v Logic Level Converter [en línea]. 2014. indiamart.com. [Consulta: 01 noviembre 2018] Disponible en: <https://www.indiamart.com/proddetail/5v-to-3-3v-logic-level-converter-13956458991.html>

INGENIATIC. WSN (Wireless Sensor Networks) [en línea]. 2010. *Ingeniatic*. [Consulta: 01 noviembre 2018] Disponible en: <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/669-wsn-wireless-sensor-networks>.

KODALI, R.K. Radio data infrastructure for remote monitoring system using lora technology, in: 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), [en línea]. 2017. pp. 467–472. [Consulta: 01 noviembre 2018] Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2017.8125884>.

LELONG. 1602 16x2 Character LCD Display Module: Best Price in Malaysia [en línea]. 2016. Lelong.my. [Consulta: 01 noviembre 2018] Disponible en: <https://www.lelong.com.my/1602-16x2-character-lcd-display-module-sainapse-io-F810736-2007-01-Sale-I.htm>.

LI, L., Ren, J., Zhu, Q. On the application of LoRa LPWAN technology in Sailing Monitoring System, in: 2017 13th Annual Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS). Presented at the 2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand

Network Systems and Services (WONS), [en línea]. 2017. pp. 77–80. [Consulta: 01 noviembre 2018] Disponible en: <https://doi.org/10.1109/WONS.2017.7888762>

LORA ALLIANCE™. Technical Overview of LoRa and LoRaWAN™ [en línea]. 2015. [Consulta: 10 noviembre 2018] Disponible en: <https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers>.

MATUS, P., Lucero, R. Norma Primaria de calidad del aire. Rev. Chil. Enfermedades Respir. 18, 112–122. [en línea]. 2002. [Consulta: 10 noviembre 2018] Disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0717-73482002000200006>.

MC ELECTRONICS. Smart Human for makers [en línea]. 2018. [Consulta: 29 febrero 2019] Disponible en: <http://mcelectronics.com.ar/site/producto/smart-human-for-makers/>.

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE. Monitoreo ambiental [WWW Document]. Argentina.gob.ar. [en línea]. 2018. [Consulta: 10 noviembre 2018] Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/preservacion-control/monitoreo>.

MUNICIPIO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. Índice Quiteño de Calidad del Aire IQCA [en línea]. 2004.. [Consulta: 16 noviembre 2018] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsci/fulltext/IQCA.pdf>

NETROTTER CONNECTING THINGS. Tecnología Sigfox [en línea]. 2014. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: <https://www.netrotter.io/index.php/it/our-company-it/tecnologia-sigfox>.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, 2018. Calidad del aire ambiente (exterior) y salud [en línea]. 2018. World Health Organ. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, 2014. OMS | Los efectos sobre la salud [en línea]. 2014. WHO. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/

ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO. Actualización de estadísticas de banda ancha de la OCDE - OECD [en línea]. 2017. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en:

<https://www.oecd.org/centrodemexico/medios/actualizaciondeestadisticasdebandaanchadelaocde.htm>.

PICKERING, P. Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance [en línea]. 2017. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: <https://www.digikey.es/es/articles/techzone/2017/jun/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>.

QUIÑONES, M., González-Jaramillo, V., Torres, R., Jumbo, M. Sistema De Monitoreo de Variables Medioambientales Usando Una Red de Sensores Inalámbricos y Plataformas De Internet De Las Cosas. ENFOQUE UTE 8, pp. 329–343. [en línea]. 2017 [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.139>

REYES, D. Diseño de la red de sensores inalámbricos mediante la evaluación del desempeño de las plataformas Arduino y Wasmote bajo el protocolo de comunicaciones Zigbee para el monitoreo de los embalses de Agoyán y Pisayambo. ESPOCH(trabajo de titulación). [en línea]. 2014. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3556?mode=full>

RF WIRELESS WORLD. LoRaWAN Classes | Class A,Class B,Class C | RF Wireless World [en línea]. 2012. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: <http://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LoRaWAN-classes.html> (accessed 2.6.19).

ROBOTSHOP. Arduino Nano USB Microcontroller v3 [en línea]. 2018. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: <https://www.robotshop.com/en/arduino-nan-v-3.html>.

RODRÍGUEZ, E.S., López, V.F. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTELIGENTE PARA UN EDIFICIO MEDIANTE IOT UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN LORAWAN(trabajo de titulación). [en línea]. 2014. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7394/1/RodriguezMorenoEdwardStiven2017.pdf>

RODRÍGUEZ Munca, J.D. DISPOSITIVO LoRa DE COMUNICACIÓN A LARGO ALCANCE Y BAJO CONSUMO ENERGÉTICO PARA APLICACIONES DEL ÁMBITO DEL DESARROLLO. Universidad de Politecnica de Madrid, Madrid. [en línea]. 2016. [Consulta: 13

noviembre 2018] Disponible en:
http://oa.upm.es/44890/1/TFM_JOSE_DANIEL_RODRIGUEZ_MUNCA.pdf

ROHDE & SCHWARZ. A propósito del IoT: LoRaWAN, mediciones de sensibilidad del receptor - Solution [en línea]. 2017. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en:
https://www.rohde-schwarz.com/lat/soluciones/test-and-measurement/wireless-communication/iot-m2m/seminarios-web-y-videos-iot-m2m/a-prop-sito-del-iot5-lorawan-medidas-de-sensibilidad-del-receptor_231342.html.

SABAS. Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 1.- ¿Qué es LoRa y LoRaWAN? Medium. [en línea]. 2017. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-cap%C3%ADtulo-1-qu%C3%A9-es-lora-y-lorawan-8c08d44208e8>.

SAIGUA, S., Villafuerte, M. Evaluación de las topologías físicas de WSN mediante la implementación de un prototipo de medición de variables ambientales para el G.E.A.A. - ESPOCH. (trabajo de titulación) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. [en línea]. 2003. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3241>

SECRETARÍA DE AMBIENTE. Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire [en línea]. 2003. [Consulta: 18 noviembre 2018] Disponible en:
<http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/norma-ecuatoriana-de-la-calidad-del-aire>.

SECRETARÍA DE AMBIENTE. Los Contaminantes Comunes del Aire y sus Efectos sobre la Salud Humana [en línea]. 2013. [Consulta: 11 diciembre 2018] Disponible en:
<http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/informes>

SECRETARÍA GENERAL-ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO. Resolución 582.CP.2012 [en línea]. 2013. [Consulta: 11 agosto 2018] Disponible en:
http://oldwww.esPOCH.edu.ec/Descargas/facultadpub/RESOLUCION_582_5a97d_3b492.pdf

SEMTECH CORPORATION. AN1200.22 LoRa Modulation Basics. [en línea]. 2015. [Consulta: 15 noviembre 2018] Disponible en :
<https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>

SEYE, M.R., Gueye, B., Diallo, M. An evaluation of LoRa coverage in Dakar Peninsula, in: 2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication

Conference (IEMCON). *Presented at the 2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, [en línea], 2017. pp. 478–482. [Consulta: 18 enero 2019] Disponible en: <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2017.8117211>.

SILVA, J. de C., Rodrigues, J.J.P.C., Alberti, A.M., Solic, P., Aquino, A.L.L. LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities, in: 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech). *Presented at the 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, [en línea], 2017. pp. 1–6. [Consulta: 20 enero 2019] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8019271/>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE. Indicadores de la calidad del aire [en línea], 2017. [Consulta: 17 agosto 2018] Disponible en: <http://sinaica.inecc.gob.mx/scica/>.

THINGSPEAK. IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things [en línea], 2017. [Consulta: 4 enero 2019] Disponible en: https://thingspeak.com/pages/learn_more.

UBIMAKER. Como Controlar Un LED Remotamente Con Arduino Y Ubidots [en línea]. 2015. [Consulta: 4 abril 2019] Disponible en: <https://www.instructables.com/id/Como-controla-un-LED-remotamente-con-Arduino-y-Ubi/>.

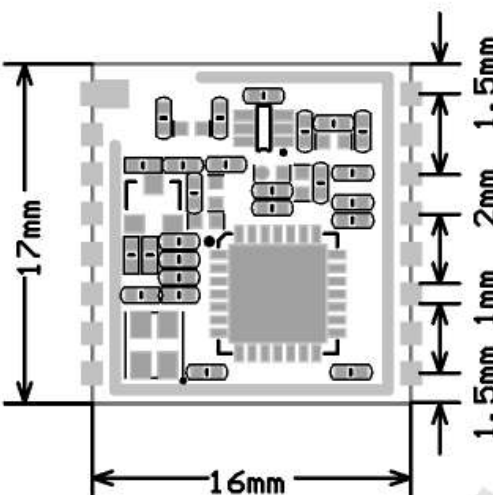
URREGO, M.M.S. ESTABLECER LA ASOCIACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS TEMPERATURA, VELOCIDAD DEL VIENTO Y PRECIPITACIÓN Y LAS CONCENTRACIONES DE PM10 REGISTRADAS EN LA RED DE CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ D.C. 171 [en línea], 2006. Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia [Consulta: 15 febrero 2019] Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14805/00798291.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

VANGELISTA, L. Frequency Shift Chirp Modulation: "The LoRa Modulation". *IEEE Signal Process*. pp. 1818–1821. [en línea], 2017. [Consulta: 15 febrero 2019] Disponible en: <https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2762960>.

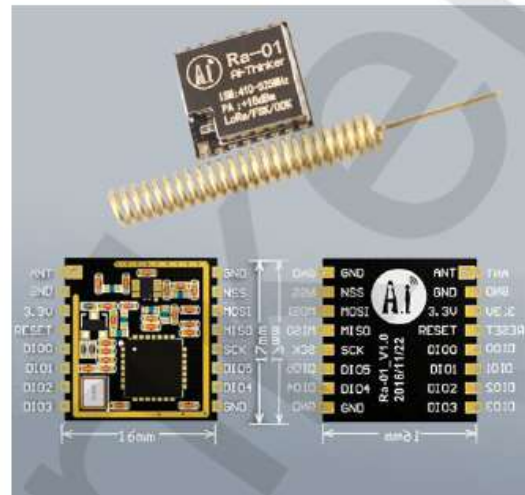
ANEXOS

Anexo A: Datasheet SX1278 Ra-01 LoRa Module

Ra-01 LoRa Module



17mm
16mm
1.5mm 1mm 2mm 1.5mm



ANT 3.3V RESET D100 D101 D102 D103 GND NSS NCST HT50 SCK D105 D104 GND GND NSS T304 NCST MI50 D07H X38 D105 D104 GND ANT 3.3V RESET T303H 0010 1010 1010 1010

16mm 16mm

Features

Overview

- LoRa™ spread spectrum modulation technology
- Receive sensitivity as low as -141 dBm
- Excellent resistance to blocking
- Supports preamble detection
- Supports half-duplex SPI communication
- Programmable bit rate up to 300Kbps
- Supports FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa™ and OOK modulation modes
- Supports automatic RF signal detection, CAD mode and ultra high speed AFC
- Packets with CRC, up to 256 bytes
- Small package with double volume stamps

Ra-01 can be used for ultra-long distance spread spectrum communication, and compatible FSK remote modulation and demodulation quickly, to solve the traditional wireless design can not take into account the distance, anti-interference and power consumption.

Ra-01 can be widely used in a variety of networking occasions, for automatic meter reading, home building automation, security systems, remote irrigation systems, is the ideal solution for things networking applications.

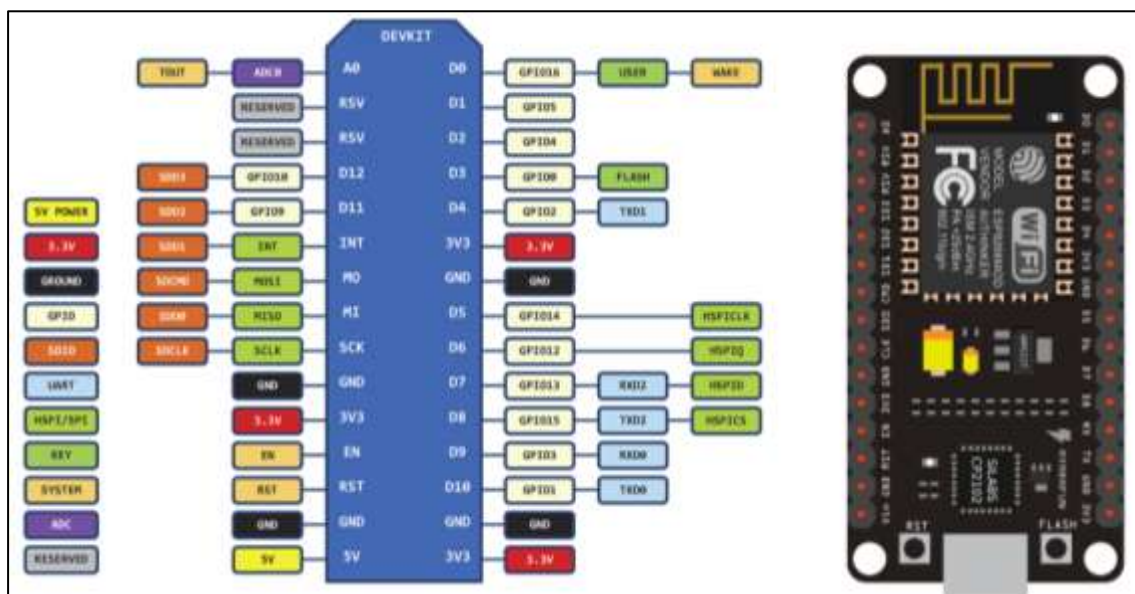
Product Specifications

Module Model	Ra-01
Package	SMD-16
Size	17*16*(3.2 ± 0.1) mm
Interface	SPI
Programmable bit rate	UP to 300Kbps
Frequency Range	410-525 MHz
Antenna	Spring antenna with gain of 2.5 dBi
Max Transmit Power	18±1 dBm
Power (Typical Values)	433MHz: TX:93mA RX:12.15mA Standby:1.6mA 470MHz: TX:97mA RX:12.15mA Standby:1.5mA
Power Supply	2.5~3.7V, Typical 3.3V
Operating Temperature	-30 °C ~ 85 °C
Storage Environment	-40 °C ~ 90 °C , < 90%RH
Weight	0.45g

Receive Sensitivity

Frequency	Spread factor	SNR	Sensitivity
433MHz	7	-7	-125
	10	-15	-134
	12	-20	-141
470MHz	7	-7	-126
	10	-15	-135
	12	-20	-141

Anexo B: ESP8266 NODE MCU



Anexo C: Datasheet Sensor de Gas MQ-7

SPECIFICATIONS			
A. Standard work condition			
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remark
Vc	circuit voltage	5V ± 0.1	Ac or Dc
VH (H)	Heating voltage (high)	5V ± 0.1	Ac or Dc
VH (L)	Heating voltage (low)	1.4V ± 0.1	Ac or Dc
RL	Load resistance	Can adjust	
RH	Heating resistance	33 Ω ± 5%	Room temperature
TH (H)	Heating time (high)	60 ± 1 seconds	
TH (L)	Heating time (low)	90 ± 1 seconds	
PH	Heating consumption	About 350mW	
b. Sensitivity characteristic			
symbol	Parameters	Technical parameters	Remark
Rs	Surface resistance Of sensitive body	2-20k	In 100ppm Carbon Monoxide
α (300/100ppm)	Concentration slope rate	Less than 0.5	Rs (300ppm)/Rs(100ppm)
Standard working condition	Temperature	-20°C ± 2°C	relative humidity 65% ± 5%
	Vc: 5V ± 0.1V VH: 5V ± 0.1V VH: 1.4V ± 0.1V		RL: 10K Ω ± 5%
Preheat time	No less than 48 hours	Detecting range: 20ppm-2000ppm carbon monoxide	

Anexo D: Datasheet Sensor de Gas MQ-131

Technical Data				Basic test loop	
Model No.		MQ131			
Sensor Type		Semiconductor			
Standard Encapsulation		Bakelite (Black Bakelite)			
Detection Gas		Ozone			
Concentration		10-1000ppm Ozone		<p>The above is basic test circuit of the sensor. The sensor need to be put 2 voltage, heater voltage (VH) and test voltage (VC). VH used to supply certified working temperature to the sensor, while VC used to detect voltage (VRL) on load resistance (RL) whom is in series with sensor. The sensor has light polarity, Vc need DC power. VC and VH could use same power circuit with precondition to assure performance of sensor. In order to make the sensor with better performance, suitable RL value is needed:</p>	
Circuit	Loop Voltage	Vc	≤24V DC		
	Heater Voltage	VH	5.0V±0.2V AC or DC		
	Load Resistance	RL	Adjustable		
Character	Heater Resistance	RH	31Ω±3Ω (Room Tem.)		
	Heater consumption	PH	≤900mW		
	Sensing Resistance	Rs	50KΩ-500KΩ(in 50ppm O ₃)		
	Sensitivity	S	Rs(in air)/Rs(in 50ppm O ₃)≥3		
	Slope	α	(Rs20ppm/Rs10ppm O ₃)		
Condition	Tem. Humidity	20°C ± 2°C ; 65% ± 5%RH			
	Standard test circuit	Vc: 5.0V ± 0.1V; VH: 5.0V ± 0.1V			
	Preheat time	Over 48 hours			
Power of Sensitivity body(Ps): $P_s = V_c^2 \times R_s / (R_s + R_L)^2$ Resistance of sensor(Rs): $R_s = (V_c / V_{RL} - 1) \times R_L$					

Anexo E: Datasheet Sensor de Gas MQ-136

SPECIFICATIONS			
A. Standard work condition			
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
R _L	Load resistance	can adjust	
R _H	Heater resistance	31Ω ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 800mw	
B. Environment condition			
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%
C. Sensitivity characteristic			
Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
R _s	Sensing Resistance	30KΩ-200KΩ (10ppm H ₂ S)	Detecting concentration scope: 1-100ppm H ₂ S
$\frac{\Delta R_s}{R_s}$ (20/5) H ₂ S	Concentration Slope rate	<0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: 20°C ± 2°C Humidity: 65%± 5%	V _c : 5V± 0.1 V _H : 5V± 0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

Anexo F: Datasheet Sensor de Polvo DSM501A

4. Electrical characteristics

4 - 1. Supply voltage	: DC5V±10%
4 - 2. Power consumption	: 90mA
4 - 3. Operating temperature range	: -10~ +65°C
4 - 4. Operating humidity range	: 95%RH or less (without dew condensation)
4 - 5. Recommend storage condition	: -20~ +80°C
4 - 6. Dimension	: W59 * H45 * D20 (mm)
4 - 7. Detectable particle size	: approx. 1µm (minimum)
4 - 8. Detectable range of concentration	: 0 - 1.4mg/m ³
4 - 9. Output signal	: PWM (pulse width modulation)
4 - 10. Time for stabilization	: 1 minute after power turned on
4 - 11. Sensor characteristics	: To be maintained in between the upper limit and lower limit of the standard dust sensor unit

5. Device overview

The dust sensor module DSM501 is a compact sized particle density sensor.

- * Quantitative particle density measurement with the principle of particle counter
- * Fine particles of bigger than one micron could be detected with high sensitivity.
- * Inside heater induces air inflow to the module.
- * One control contact and two output contacts

A block diagram is illustrated in 5.1.

The DSM501 consists of :

- * Light Emitting Diode (LED) Lamp
- * Detector
- * Signal amplifier circuit
- * Output drive circuit 1
- * Output drive circuit 2
- * Heater induced air flow

Fig. -2. Sensor Characteristics vs Low ratio

Low pulse width: 10ms - 90ms

Hi = 4.5V

Low = 0.7V

Low ratio[%] = $t(\text{sec}) / 30(\text{sec}) * 100$

5-1. BLOCK DIAGRAM

Anexo G: Código de la Comunicación LoRa Receiver

```
void loop() {
  // try to parse packet
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    // received a packet
    Serial.print(" \n Paquete Recibido: ");
    // read packet
    while (LoRa.available()) {
      // Serial.print((char)LoRa.read());
      Cadena=(String)LoRa.readString();
      Serial.print("Cadena");
      Serial.print(Cadena); }
  }
```

Anexo H: Código de la Comunicación LoRa Sender 1

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);
  Serial.println("LoRa Sender");
  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    digitalWrite(5, HIGH);
    while (1); } }
void loop() {
  Serial.print("Sending packet: ");
```

Anexo I: Código de la Comunicación LoRa de Recepción del Sender 2

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("LoRa Sender");
  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    digitalWrite(5, HIGH);
    while (1); } }
void loop() {
  digitalWrite(6, HIGH);
  digitalWrite(mosfet, HIGH);
  digitalWrite(5, HIGH);
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print("DATA: ");
  LoRa.print(Cadena);
  LoRa.endPacket();
```

Anexo J: Certificado de Permiso para la Instalación de los Nodos en la Institución



**Unidad Educativa Fiscomisional
Santo Tomás Apóstol**
Salesianos - Riobamba



*Ofc. No. 044-UE-STAR- R
Riobamba, 13 de noviembre de 2018*

*Ingeniero
Patricio A. Romero
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
TELECOMUNICACION Y REDES
Presente.-*

De mi consideración:

Reciba un atento y cordial saludo a nombre de la Unidad Educativa Fiscomisional SANTO TOMÁS APÓSTOL, junto con los deseos de bienestar en las actividades a usted encomendadas.

En referencia a su oficio número 491-EIE-TR-FIE de fecha 25 de octubre del presente año, tengo a bien comunicar a usted, que ha sido Aprobado el trabajo de Titulación que van a realizar las señoritas Katherine Lizeth Cantuña Escalante y Daniela Fernanda Sitian Guamán, con el tema "ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE LA TECNOLOGIA LORAWAN APLICADO AL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE" en nuestra institución educativa de Riobamba.

Particular que comunico para los fines consiguientes.

Atentamente

Msc. Edwin Tello A.

RECTOR



Unidad Educativa Fiscomi-
Santo Tomás Apóstol
Riobamba

RECTORA

ey/



Anexo K: Obtención de Polutantes del Nodo A



Anexo L: Obtención de Polutantes del Nodo B



Anexo M: Números de mediciones obtenidas por los sensores

DISTANCIA	CO	O₃	NO₂	SO₂	PM_{1,0}	PM_{2,5}	% pérdida de datos
1 metro	6015	127	635	137	155	258	0.00
1 metro	6015	126	632	137	155	258	
1 metro	6210	123	615	140	155	258	
1 metro	6015	123	615	140	10	258	
1 metro	6210	123	615	140	134	224	
1 metro	6289	124	621	149	134	224	
1 metro	6132	125	626	131	134	224	
1 metro	6054	124	624	145	155	258	
1 metro	6171	124	624	145	155	258	
1 metro	6015	124	624	144	155	258	
2 metros	5390	121	609	128	177	296	0.00
2 metros	5156	120	603	117	114	191	
2 metros	4882	117	585	119	79	132	
2 metros	5039	117	588	121	79	132	
2 metros	5195	116	580	121	134	224	
2 metros	5195	116	580	121	134	224	
2 metros	4765	116	580	126	134	224	
2 metros	5039	120	600	126	155	258	
2 metros	4765	119	597	126	155	258	
2 metros	4960	113	568	119	96	161	
3 metros	4765	117	588	126	96	161	3.33
3 metros	4843	118	591	116	134	224	
3 metros	5039	115	577	121	177	296	
3 metros	4960	113	568	112	134	224	
3 metros	4765	117	588	126	134	224	
3 metros	1640	74	372	56	15	25	
3 metros	0	71	0	50	15	25	
3 metros	1562	75	377	56	15	25	
3 metros	1328	75	377	56	15	25	
3 metros	1328	75	377	47	15	25	
4 metros	1640	71	357	45	15	25	0.00
4 metros	1445	71	357	49	15	25	
4 metros	1523	71	357	50	15	25	
4 metros	1328	75	377	56	15	25	
4 metros	1601	73	366	50	15	25	
4 metros	1601	71	357	50	15	25	
4 metros	1328	75	377	59	15	25	
4 metros	1640	73	366	58	15	25	

4 metros	1601	71	357	50	15	25	
4 metros	1523	71	357	50	15	25	
5 metros	1328	75	377	56	15	25	3.33
5 metros	1328	75	375	45	15	25	
5 metros	1562	75	377	0	15	25	
5 metros	0	75	377	56	15	25	
5 metros	1562	75	377	56	15	25	
5 metros	1328	75	377	47	15	25	
5 metros	1328	75	377	56	15	25	
5 metros	1640	73	366	58	15	25	
5 metros	1601	75	377	50	15	25	
5 metros	1562	7	377	56	15	25	
6 metros	1640	75	377	56	15	25	
6 metros	1640	98	492	45	15	25	
6 metros	1875	95	477	45	15	25	
6 metros	1640	99	4	0	15	25	
6 metros	1835	96	483	50	15	25	
6 metros	1835	96	483	50	15	25	
6 metros	1835	96	483	58	15	25	
6 metros	1562	99	498	45	15	25	
6 metros	1640	99	498	45	15	25	
6 metros	1640	99	495	59	15	25	
7 metros	1640	97	489	59	15	25	11.67
7 metros	1796	99	498	58	15	25	
7 metros	0	99	498	45	15	0	
7 metros	1640	99	495	59	0	25	
7 metros	1757	94	0	49	15	25	
7 metros	1640	94	474	59	15	25	
7 metros	1875	97	489	49	15	25	
7 metros	1757	96	480	0	15	0	
7 metros	0	96	483	58	15	25	
7 metros	1757	99	495	50	15	25	
8 metros	1757	94	474	45	15	25	13.33
8 metros	1757	94	0	50	15	25	
8 metros	1757	0	483	50	15	25	
8 metros	0	94	474	0	15	0	
8 metros	1640	97	489	58	15	25	
8 metros	1	99	0	47	15	25	
8 metros	1640	99	495	0	15	25	
8 metros	1484	98	492	45	15	25	
8 metros	1640	99	495	59	15	25	
8 metros	1640	97	489	58	15	0	
9 metros	1562	96	483	50	15	25	21.67

9 metros	1953	143	717	0	134	224	
9 metros	2226	0	703	65	114	191	
9 metros	0	141	708	59	0	0	
9 metros	0	0	714	70	155	258	
9 metros	2070	140	700	59	0	0	
9 metros	2070	140	700	59	114	191	
9 metros	2265	0	714	65	0	258	
9 metros	0	141	708	59	114	191	
9 metros	2031	141	708	59	114	0	
10 metros	0	141	708	59	114	191	
10 metros	1953	142	714	70	134	224	18.33
10 metros	0	141	0	0	0	258	
10 metros	2187	141	706	65	155	258	
10 metros	2075	137	688	59	177	296	
10 metros	0	141	708	59	155	258	
10 metros	2148	138	0	65	114	191	
10 metros	2070	139	697	59	114	0	
10 metros	0	141	706	65	114	191	
10 metros	0	0	708	70	177	296	
11 metros	1953	141	708	59	0	191	
11 metros	0	141	0	0	114	0	46.67
11 metros	2187	0	706	0	134	224	
11 metros	0	0	706	0	134	0	
11 metros	0	140	700	59	134	224	
11 metros	2070	140	0	59	0	224	
11 metros	2031	0	0	59	0	191	
11 metros	1953	0	706	59	0	0	
11 metros	0	0	706	0	114	0	
11 metros	0	140	0	0	134	0	
12 metros	1953	141	0	70	0	191	
12 metros	0	141	0	0	114	0	71.67
12 metros	0	0	0	0	0	0	
12 metros	0	0	0	0	15	0	
12 metros	0	0	0	0	0	0	
12 metros	0	0	0	0	15	0	
12 metros	1914	0	530	0	0	0	
12 metros	1875	0	509	42	15	0	
12 metros	0	104	0	56	0	0	
12 metros	0	0	0	50	0	0	
13 metros	1914	0	0	0	0	0	
13 metros	0	0	0	56	0	0	91.67
13 metros	1835	0	0	0	15	0	
13 metros	0	0	0	0	0	0	

