



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN**

**INFORME DE TRABAJO MONOGRÁFICO**

**SISTEMA DE MONITOREO REMOTO, INALÁMBRICO Y EN TIEMPO REAL DE LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE DOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DEFINIDOS EN LA NORMA TÉCNICA NICARAGÜENSE DE CALIDAD DEL AIRE**

Presentado por: Br. Nydia Verónica Medina Palacios  
Br. Cristian Alexander Larios Moraga

Tutor: MSc. Alejandro Alberto Méndez Talavera

Managua, Junio 06, 2018

# Dedicatoria

---

Dedicamos este trabajo monográfico a **Dios** principalmente, por habernos permitido llegar hasta esta etapa de nuestras vidas.

A nuestros **Padres**, por el apoyo incondicional que nos brindaron, por sus consejos, por estar siempre con nosotros en todos los momentos, y por habernos brindado la oportunidad de ser profesionales de éxito

A nuestro **Tutor, MSc. Alejandro Méndez**, quien ha sido una figura clave para la culminación de este proyecto, ya que con sus conocimientos y habilidades nos ha guiado durante su elaboración.

A nuestros **compañeros** de clases por las experiencias vividas y por su amistad incondicional.

A todas las personas que de alguna manera nos han ayudado a lograr esta meta.

Nydia Verónica Medina Palacios.  
Cristian Alexander Larios Moraga.

## Resumen

---

El monitoreo de la calidad del aire es una actividad que hoy en día se lleva a cabo en muchos países, con el objetivo de obtener datos cuantitativos que permitan realizar estudios y análisis que ayuden a minimizar los efectos de la contaminación de este recurso natural, pues según la OMS y el Banco Mundial, este hecho es responsable de un alto número de muertes en el mundo. Desafortunadamente, en Nicaragua esta acción no es llevada a cabo debido a que no se cuenta con el suficiente capital para poder adquirir equipos de monitoreo de contaminantes del aire.

En respuesta a las limitaciones que impiden efectuar mediciones de contaminantes del aire en el territorio nacional, se decidió desarrollar un prototipo de monitoreo de gases contaminantes del aire establecidos en los estándares nacionales e internacionales, escalable en cuanto a la capacidad de contaminantes a medir, y a su interconexión con más equipos formando una red en malla, para ampliar la capacidad de monitoreo en una cierta área de interés.

El resultado de este trabajo monográfico es un sistema de monitoreo de monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno que envía inalámbricamente las mediciones de estos gases hacia una interfaz gráfica, donde se puede apreciar en tiempo real la información recibida y también se puede almacenar en una base de datos. Para el acondicionamiento de señal de los sensores utilizados se emplearon circuitos integrados AFE. Éstos son diseñados específicamente para este tipo de sensores y poseen un tamaño reducido (4mm x 4mm).

Este informe contiene los aspectos más relevantes e importantes del desarrollo de este trabajo monográfico, para que los resultados obtenidos sean facilitados a futuros colegas interesados en la elaboración de proyectos relacionados.

## Abstract

---

Nowadays, air quality monitoring is an activity that is carried out in a lot of countries, with the aim of obtaining quantitative data to realize studies and analysis to minimize the pollution's effects on this natural resource. According to the WHO and The World Bank Group, the air contamination is responsible for a high number of deaths all over the world. Unfortunately, this action cannot be carried out in Nicaragua due to lack of budget to get air pollutants monitoring equipment.

In response to the limitations that impede the air pollutants measurements in the national territory, it was decided to develop a measurement system prototype to measure and monitor air pollutants gases which are established in national and international standards. It is scalable in terms of the capacity of pollutants to be measured and its interconnection with more equipment, allowing the creation of a mesh network to expand the monitoring capacity of an area of interest.

The outcome of this monographic project is a nitrogen dioxide and carbon monoxide monitoring system that sends the measurements of these gases to a graphical interface, via wireless, where the received information can be seen in real time and stored in a database. Signal conditioning, for the sensors outputs, was achieved using special integrated circuits known as AFEs. They are designed specifically for this kind of sensors and come in a very small package (4mm x 4mm).

In this report all the information related with the design and implementation of the prototype is presented, in such a way that can be retaken for future projects related to this topic.

# Índice de Contenido

---

INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES .....	3
JUSTIFICACIÓN .....	8
OBJETIVOS .....	12
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO .....	13
1.1 Contaminación atmosférica .....	14
1.1.1 Causas.....	14
1.1.2 Gases contaminantes y sus efectos.....	15
1.1.3 Normas que regulan la calidad del aire.....	16
1.2 Tipos de equipos de monitoreo de calidad del aire .....	19
1.2.1 Funciones de un equipo de monitoreo de calidad del aire .....	20
1.3 Sistema de medición .....	21
1.3.1 Métodos de medición .....	22
1.3.2 Principios de funcionamiento de sensores.....	24
1.3.3 Acondicionamiento de señal .....	31
1.3.4 Unidad de procesamiento .....	32
1.4 Comunicación inalámbrica. ....	37
1.5 Interfaz gráfica.....	43
1.5.1 Visual Studio Community .....	44
1.6 Base de datos .....	45
1.6.1 MySQL Community .....	46
1.7 Unidad de almacenamiento de respaldo .....	47

CAPÍTULO II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE .....	49
2.1 Determinación de los componentes del sistema de monitoreo. ....	50
2.1.1 Determinación de sensores.....	50
2.1.2 Acondicionamiento de señal .....	52
2.1.3 Determinación del microcontrolador.....	55
2.1.4 Comunicación inalámbrica .....	57
2.2 Modelo del subsistema de medición .....	60
2.3 Modelo del subsistema de comunicación .....	69
2.4 Modelo del programa del microcontrolador .....	73
2.5 Interfaz gráfica y base de datos .....	74
2.6 Modelo del subsistema de respaldo de información.....	82
2.7 Fuente de alimentación .....	87
2.8 Simulación del sistema.....	88
2.9 Implementación en circuitos impresos.....	90
2.10 Resultados obtenidos .....	92
2.11 Costo del sistema de monitoreo .....	100
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105

# Lista de Figuras

---

## Capítulo 1

1.1: Diagrama de bloques del sistema de monitoreo de calidad del aire.....	13
1.2: Estructura general de un sistema de medición. Tomado de Bentley (2005).....	21
1.3: Sensor tipo cuenta. Tomado de Wei-Ying et al. (2015).....	28
1.4: Sensor electroquímico básico. Tomado de Wei-Ying et al. (2015).....	29
1.5: Membrana hidrofóbica. Tomado de International Technology Sensors.....	30
1.6: Ambiente del sistema de administración de base de datos simplificado. Tomado de Elmasri y B. Navathe (2011). ....	45

## Capítulo 2

2.1: Sistema de monitoreo de calidad del aire implementado. ....	49
2.2: Vista general de sensor 4CO-500. ....	52
2.3: Vista general de sensor 4NO <sub>2</sub> -20. ....	52
2.4: AFE LMP91000 para aplicaciones de sensores de bajo consumo de energía. Obtenido de Texas Instruments (2016). ....	53
2.5: Diagrama de bloques funcional del AFE LMP91000. Obtenido de Texas Instruments (2016). ....	54
2.6: PCB implementada para el AFE LMP91000 con y sin el sensor electroquímico. (Fotografía). ....	55
2.7: Vista general del módulo XBee-PRO Series 1 ....	58
2.8: XBee Explorer Regulated. Obtenido de SparkFun Electronics.....	59
2.9: XBee Explorer Dongle. Obtenido de SparkFun Electronics.....	60
2.10: Asignación de pines de LMP91000. Tomado de <a href="http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp91000.pdf">http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp91000.pdf</a> ....	62
2.11: Selección de sensores en herramienta Webench Designer. (Captura de pantalla).....	65

2.12: Configuración de registros del AFE LMP91000 para sensor 4CO-500. (Captura de pantalla).....	66
2.13: Esquemático del subsistema de medición. (Captura de pantalla). ....	68
2.14: Software XCTU (Captura de pantalla) .....	70
2.15: Otros parámetros de configuración de los módulos de comunicación. (Captura de pantalla).....	72
2.16: Esquemático del subsistema de comunicación inalámbrica. (Captura de pantalla).....	72
2.17: Diagrama del programa del microcontrolador.....	73
2.18: Modelo de interfaz gráfica. ....	74
2.19: Ventana de inicio de interfaz gráfica. (Captura de pantalla). ....	75
2.20: Tabla que contiene los datos de los usuarios que pueden acceder a las funciones de la interfaz gráfica. (Captura de pantalla). ....	75
2.21: Funciones de la interfaz gráfica. (Captura de pantalla). ....	76
2.22: Ventana de opción monitorear. (Captura de pantalla). ....	77
2.23: Monitoreo en tiempo real del gas monóxido de carbono. (Captura de pantalla).....	78
2.24: Ventana de función reproducir datos. (Captura de pantalla). ....	79
2.25: Tabla de mediciones del gas seleccionado. (Captura de pantalla).....	79
2.26: Tablas donde se almacenan las mediciones de los gases en cada mes. (Captura de pantalla).....	80
2.27: Comparación de datos entre diferentes meses del año. (Captura de pantalla).....	81
2.28: Promedio de las mediciones realizadas en cada mes. (Captura de pantalla).....	81
2.29: Configuración de pines de módulo RTC DS3234. Obtenido de <a href="https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3234.pdf">https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3234.pdf</a> .....	82
2.30: Mapa de direcciones de los registros internos del RTC DS3234. Obtenido de <a href="https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3234.pdf">https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3234.pdf</a> .	83
2.31: Diseño de pines estándar de una tarjeta SD. Obtenido de Ibrahim (2008). ....	83

2.32: Formato de comando SPI. Obtenido de Ibrahim (2008). .....	85
2.33: Esquemático del subsistema de respaldo de información. (Captura de pantalla).....	87
2.34: Esquemático del subsistema de alimentación. (Captura de pantalla). .....	88
2.35: Simulación general del sistema desarrollado. (Captura de pantalla). .....	89
2.36: Vinculación de puertos virtuales creados por el software ELTIMA Virtual Serial Port. (Captura de pantalla). .....	89
2.37: Gráfica de datos recibidos por simulación del sistema. (Captura de pantalla).....	90
2.38: Vista inferior del plano de la tarjeta. (Captura de pantalla).....	91
2.39: Vista superior del plano de la tarjeta de circuito impreso del sistema. (Captura de pantalla). .....	91
2.40: Circuito impreso elaborado para AFE LMP91000. (Captura de pantalla)..	92
2.41: Prototipo de monitoreo de calidad del aire finalizado. (Fotografía).....	93
2.42: Altura a la que se instaló el prototipo. (Fotografía) .....	93
2.43: Punto de instalación del prototipo. (Fotografía). .....	94
2.44: Valores medidos durante periodo de monitoreo de CO. (Captura de pantalla).....	95
2.45: Valores medidos durante periodo de monitoreo de NO <sub>2</sub> . (Captura de pantalla).....	96
2.46: Finalización de monitoreo. (Captura de pantalla). .....	96
2.47: Gráfica de valores medidos de CO almacenados en la base de datos. (Captura de pantalla). .....	97
2.48: Tabla de datos obtenidos durante el periodo de monitoreo de CO. (Captura de pantalla).....	98
2.49: Gráfica de valores medidos de NO <sub>2</sub> almacenados en la base de datos. (Captura de pantalla). .....	98
2.50: Tabla de datos obtenidos durante el periodo de monitoreo de NO <sub>2</sub> . (Captura de pantalla). .....	99
2.51: Pruebas de distancia realizadas. ....	99

# Lista de Tablas

---

## Capítulo 1

1.1: Efectos de los contaminantes del aire en la salud humana y el medio ambiente. Tomado de Wei-Ying et al. (2015).....	15
1.2: Comparación de límites máximos permisibles de inmisión de contaminantes en el aire. ....	17
1.3: Principios de funcionamiento de sensores de contaminantes del aire .....	26
1.4: Comparación de protocolos de comunicación inalámbrica.....	41

## Capítulo 2

2.1: Recursos demandados del microcontrolador a utilizar .....	56
2.2: Descripción de los registros internos del AFE LMP91000.....	62
2.3: Definición estándar de pines de tarjeta SD.....	84
2.4: Criterios para la ubicación de la altura para la toma de muestra de contaminantes atmosféricos.....	93
2.5: Periodo de muestreo de los contaminantes atmosféricos .....	95
2.6: Costos de elaboración de sistema de monitoreo de calidad del aire.....	100
2.7: Comparación de precios con equipos existentes en el mercado.....	102

# Introducción

---

La contaminación del ambiente afecta a muchos de los recursos naturales que el ser humano necesita para vivir saludablemente. El aire es uno de estos recursos vitales para los seres humanos y recibe, producto de actividades realizadas por los humanos, gases que lo contaminan. Debido a la peligrosidad y severidad de los efectos de la contaminación atmosférica, muchas naciones han dedicado recursos para monitorear los niveles de concentración de gases contaminantes, tales como el monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, entre otros, con el propósito de contar con la información necesaria para tomar decisiones que ayuden a evitar el incremento de la contaminación atmosférica y/o la exposición de las personas a los efectos de la misma. Las áreas más afectadas por la contaminación atmosférica son la salud humana, la calidad del medio ambiente y la economía de los países.

El monitoreo de los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos requiere del uso de equipos especializados, los cuales son ubicados en puntos de interés como, por ejemplo: sectores industriales, calles con alto tráfico vehicular, zonas concurridas, entre otros, de acuerdo con el tipo de estudio que se desee realizar. Luego, los datos obtenidos son suministrados a profesionales del campo de las ciencias ambientales que se encargan de realizar el análisis correspondiente para obtener información sobre la calidad del aire.

El diario La PRENSA publicó un artículo en septiembre del año 2016 donde resalta que Nicaragua no cuenta con datos oficiales actualizados sobre el estado de la calidad del aire (Álvarez M., 2016). Según el artículo, el no contar con datos se debe a la falta de equipos para realizar las mediciones de los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos. Una de las razones que impiden la adquisición de los equipos para monitorear los niveles de contaminación, así como sus tendencias, es el precio elevado de compra y mantenimiento de éstos.

Como solución a la problemática explicada anteriormente, se diseñó e implementó un sistema de monitoreo para dos de los gases contaminantes del aire establecidos en la norma técnica nicaragüense de calidad del aire, capaz de enviar los datos medidos inalámbricamente hacia una interfaz gráfica donde se visualiza la información recibida y se almacena en una base de datos. Esto ayudará a reducir la dependencia del país de tecnologías comerciales extranjeras y también contribuirá al desarrollo intelectual de la sociedad nicaragüense.

En este documento se presenta todo el proceso de desarrollo para la elaboración del prototipo de monitoreo de calidad del aire. Este dispositivo utiliza sensores electroquímicos para la medición de las variables de interés, y circuitos integrados especiales para su acondicionamiento de señal llamados front-end analógicos (AFEs, por sus siglas en inglés). El prototipo también cuenta con una interfaz gráfica desarrollada utilizando software libre donde se puede visualizar gráficamente la información proporcionada por el subsistema de medición y se almacena en una base de datos. La comunicación inalámbrica entre el punto de monitoreo y la interfaz gráfica se lleva a cabo a través de unos módulos de comunicación que trabajan bajo el protocolo Zigbee. La unidad de procesamiento del sistema desarrollado está basada en un microcontrolador.

De igual manera, en este informe se presentan las diferentes tecnologías que se utilizaron para el desarrollo del sistema y se proporciona información básica sobre los softwares utilizados tales como Visual Studio Community, PICC Compiler, Suite Proteus, Eagle CAD, XCTU y otros.

Este sistema de monitoreo remoto de calidad del aire será de mucha ayuda para elaborar planes que, una vez implementados, ayuden a eliminar las causas y/o contrarrestar los efectos de la degradación de la calidad del aire.

## Antecedentes

---

Aunque se considera que la contaminación del aire inició con el dominio del fuego por parte del hombre, fue con el proceso de industrialización que este fenómeno alcanzó una dimensión más notable. Según Romero Placeres et al. (2006), esta era dio sus inicios en Inglaterra desde el siglo XVI, donde se empezó a utilizar la hulla como fuente de combustible debido a la fuerte crisis maderera de la época sin importar las restricciones existentes que limitaban su empleo. Las fuentes de contaminación del aire antes de la revolución industrial eran muy pocas y los gases sólo se concentraban alrededor del punto de emisión.

De acuerdo a Wei-Ying et al. (2015), en los últimos años se han registrado serios daños en la salud del ser humano producto de la contaminación del aire, razón por la cual se han desarrollado líneas de investigación sobre este fenómeno y los gobiernos de muchos países han dedicado parte de sus recursos en el monitoreo de los contaminantes del aire. Esto, con el fin de conocer información detallada sobre el estado de los gases que afectan la calidad del aire permitiéndoles desarrollar planes y protocolos que minimicen los efectos de este tipo de contaminación en el ser humano y el medio ambiente lo más que se pueda.

En Nicaragua se han elaborado pocos trabajos relacionados a la temática del monitoreo de la calidad del aire.

El primer trabajo relacionado que lleva por nombre “Estudio comparativo de contaminantes: PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, y O<sub>3</sub> durante 1997 y 1998 en tres puntos de alto tráfico vehicular en la ciudad Managua” fue desarrollado por el Lic. Roberto Dávila, estudiante de maestría en ciencias del ambiente de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en 1997. Dávila (2000) se enfocaba en el análisis de los contaminantes material particulado (PM<sub>10</sub>), monóxido de carbono y ozono con respecto al desarrollo del tráfico vehicular en la capital, para lo cual ubicó estaciones de monitoreo en tres puntos estratégicos de la capital los cuales eran: el Gancho de Camino del mercado Oriental, las inmediaciones del 7 Sur y la plaza

de compras en la Pista Suburbana. Los resultados de este estudio mostraron que los niveles de estos contaminantes superaron ligeramente los límites establecidos por la OMS (Organización Mundial de la Salud). Los valores fueron captados usando métodos de medición pasivos, lo que implicaba que se tenían que recolectar muestras en territorio y luego éstas se llevaban al laboratorio para su posterior análisis, lo que lo volvía un método ineficiente e impreciso para la recolección de datos.

Años después, el Programa de Investigación y Docencia del Medio Ambiente (PIDMA) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), realizó un estudio en el que se contabilizó el grado de emisión de gases en la ciudad durante el 2001, tomando como referencia seis puntos en la ciudad: Villa Libertad, Linda Vista, UNI Central, la Colonia Centroamérica, Siete Sur y las inmediaciones del Ministerio de Recursos Naturales (MARENA). Los resultados de este estudio identificaron los principales agentes contaminantes que vierten los vehículos y su grado de presencia en el aire que respiran los capitalinos, los cuales son: el dióxido de nitrógeno, ozono, partículas menores a 10 micrómetros, partículas totales suspendidas, polvos sedimentables, monóxido de carbono y acidez de lluvia. Asimismo, se concluyó que el grado de presencia de las partículas menores a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) fue de 70 microgramos por metro cúbico ( $\mu g/m^3$ ) y en el caso de partículas totales suspendidas fue de 256 microgramos por metro cúbico ( $\mu g/m^3$ ). Ambas mediciones superan la escala considerada no dañina para los seres humanos según la Organización Mundial de la Salud (OMS), que es de 50 microgramos por metro cúbico ( $\mu g/m^3$ ) (Prensa, 2002).

Pérez y Conde (2014) propusieron un “Medidor de calidad ambiental para MARENA” el cual consistía en un dispositivo que captaba los niveles de dióxido de carbono, monóxido de carbono y dióxido de azufre para el departamento de calidad ambiental de esta institución. Para la definición de los requerimientos de este sistema se tomaron en cuenta recomendaciones dadas por MARENA y CIEMA-UNI (Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente), quien ha

sido una de las pocas organizaciones nacionales que realiza estudios sobre el monitoreo de la contaminación del aire. CIEMA-UNI sugirió que el sistema contara con dos formas de visualización de las variables en caso de que se originaran fallos en la transmisión inalámbrica hacia un ordenador, el cual funcionaría como un medio de visualización, así como también que la transmisión de datos se realizara cada 5 minutos hacia el servidor para evitar de este modo la saturación de la base de datos. MARENA por su parte solicitó que el equipo fuese un sistema de bajo costo y consumo energético, resistente contra golpes y cambios climáticos, de sencilla manipulación y mantenimiento y por último que éste fuese inalámbrico, alimentado con pilas.

Otro trabajo relacionado con esta temática fue desarrollado por Suntaxi Pichuasamin (2015). En él se elaboró un “Diseño y construcción de un prototipo portátil de monitoreo ambiental, mediante un sistema autónomo de adquisición de datos portátil con comunicación USB hacia un PC”, en la ciudad de Quito, Ecuador. El proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de detección de variables, almacenamiento y visualización que permite monitorear contaminantes comunes atmosféricos cercano a fuentes fijas de contaminación y parámetros meteorológicos. Las variables que mide el dispositivo son los gases dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, dióxido de carbono y parámetros meteorológicos de temperatura, presión y humedad relativa. El prototipo ayuda a la recolección de datos en zonas urbanas y suburbanas con el propósito de conocer los niveles de contaminación del aire en distintos lugares del país.

Del mismo modo, en el año 2015 se realizó un estudio sobre los sistemas de monitoreo de la contaminación del aire basado en redes de sensores inalámbricos. Éste analiza la situación actual de la calidad del aire en el mundo, las ventajas y desventajas de las estaciones de monitoreo fijas, presenta algunas tecnologías utilizadas en los sistemas de monitoreo remoto, y un análisis comparativo entre las redes de sensores estáticas, redes de sensores en

comunidad y redes de sensores montados en vehículos. Asimismo, en él se habla sobre la siguiente generación de sistemas de monitoreo de contaminación del aire basados en sensores micro electromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) y redes de sensores inalámbricas, y las ventajas y desventajas de la implementación de estos sistemas. El estudio concluyó que un sistema de monitoreo de contaminación del aire con resolución espacio-temporal, eficiencia de costos y energía, y otras características son realizables y confiables. (Wei-Ying et. al, 2015).

Otro trabajo propuesto fue el de Brienza et al. (2015), en el cual se desarrolló un sistema de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en áreas urbanas en Italia. Éste permite conocer las concentraciones de monitoreo de calidad del aire en tiempo real. Con este sistema el usuario monitorea cierta área de interés al desplegar nodos sensores de bajo costo y de bajo consumo. Éstos pueden compartir datos recolectados siguiendo un enfoque de red. Este prototipo fue probado en un campo de experimentación en diferentes áreas de una ciudad. Los resultados obtenidos concordaban con los proporcionados por la autoridad de control ambiental, lo que quiere decir que el equipo era rentable para usarlo en el monitoreo de la calidad del aire.

A diferencia de los prototipos realizados en trabajos previos, el sistema que se implementó utiliza sensores electroquímicos dedicados a la medición de estos gases, y cuenta con la característica de ser escalable en cuanto a la medición de más contaminantes y de trabajo en red. Asimismo, utiliza un sistema de comunicación inalámbrica que demanda un bajo consumo de energía, su tasa de datos a transmitir es baja, y garantiza un control sobre los paquetes enviados de tal manera que se asegure una correcta transmisión de la información. El sistema también cuenta con una base de datos para almacenar la información de interés y una interfaz gráfica que permite al usuario interactuar con el sistema de una manera sencilla para el monitoreo de nuevas mediciones, la reproducción de

mediciones anteriores y comparación de datos obtenidos de distintos meses, para su debido análisis.

Otro aspecto importante del sistema desarrollado es el uso de circuitos integrados llamados front-end analógicos (AFE, por sus siglas en inglés), diseñados específicamente para el acondicionamiento de señal de sensores electroquímicos, que detectan los niveles de concentración de varios gases tóxicos, de forma individual, tales como: CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y SO<sub>2</sub>, los cuales se encuentran definidos como contaminantes del aire dentro de estándares nacionales e internacionales. Las principales ventajas de su uso es su bajo consumo de energía, su tamaño reducido, el cual permite minimizar el espacio, pueden configurarse para trabajar con una amplia gama de sensores electroquímicos disponibles en el mercado, y son de bajo costo. Sin embargo, el uso de esta tecnología presenta un inconveniente, el cual es que no se cuenta con las herramientas apropiadas para la manipulación de componentes tan pequeños como éste (4mm x 4mm).

## Justificación

---

La contaminación del aire es un fenómeno que hoy en día afecta severamente la salud del hombre y la calidad de los recursos naturales en todo el mundo. La gravedad de este hecho es sustentada mediante estudios realizados por algunos organismos internacionales que velan por la salud del ser humano. Entre éstos se encuentra la Organización Mundial de la Salud (OMS), quien publicó un artículo en septiembre del 2016 en el cual un modelo de la calidad del aire creado por ellos refleja que el 92% de la población mundial habita en lugares donde los gases que afectan este valioso recurso natural superan los niveles permisibles existentes. Asimismo, se reportaron 3 millones de muertes en el mundo debido a este tipo de contaminación, y de las enfermedades que se generan de este hecho, el 94% de las muertes se deben a enfermedades no transmisibles, sobre todo del tipo cardiovascular, cerebrovascular, neumopatía obstructiva crónica y cáncer de pulmón.

Otras estadísticas, las cuales fueron presentadas por el Banco Mundial, reflejan que 1 de cada 10 muertos en el mundo se debe a la degradación de la calidad del aire. También, en el estudio se expone que las muertes producidas por este tipo de contaminación son 6 veces mayores que las provocadas por paludismo y 4 veces mayor que las causadas por VIH/SIDA; y hay una pérdida de aproximadamente \$225 millones de dólares debido a muertes prematuras de personas en edad para trabajar relacionadas a esta causa. Dicho estudio fue realizado por el Banco Mundial en el año 2016.

En el contexto nacional, de acuerdo a un artículo publicado en el diario La Prensa (García, 2017), Nicaragua no cuenta en la actualidad con cifras oficiales de los niveles en los que se encuentran los principales contaminantes que degradan la calidad del aire. Una de las razones es que las autoridades ambientales del país no disponen de los equipos adecuados para realizar el monitoreo en tiempo real de estos contaminantes, por lo que no poseen datos en

los que basarse para la realización de estudios previos a la toma de decisiones e implementación de medidas, ya sea correctivas o preventivas, para mitigar los efectos de la contaminación del aire en el territorio nacional.

Desafortunadamente, el costo de adquisición y mantenimiento de las soluciones que ofrecen empresas internacionales que trabajan en el campo del monitoreo remoto de gases contaminantes del aire es muy elevado, lo que impide al país proceder a la compra de los equipos que se ofrecen. El precio de una de estas soluciones integradas puede alcanzar aproximadamente los 5,400 euros (Libelium, 2017) sin incluir gastos de envío, impuestos, e instalación. Adicionando estos gastos y realizando la conversión a la moneda internacional, el precio puede alcanzar más de 8,000 dólares. Además, se tendría que adquirir más de uno de estos equipos para poder desarrollar un monitoreo eficiente de este fenómeno de contaminación, lo que aumenta aún más la inversión requerida para poder desarrollarlo efectiva y eficientemente.

Por otra parte, el prototipo que se desarrolló en este trabajo monográfico para el monitoreo de los niveles de concentración de los gases contaminantes del aire tiene un precio mucho menor que los equipos con prestaciones similares disponibles en el mercado, reduciéndolo hasta una cantidad estimada de 700 dólares, precio que se obtuvo de la tabla de costos que se presenta en este documento. Esto implica que las instituciones interesadas en el monitoreo de la calidad del aire cuentan con una opción más accesible en relación con los recursos económicos que disponen, pues los gastos con la compra de esta alternativa de solución, así como los de mantenimiento, se aminoran significativamente. Es importante señalar que el soporte técnico, siendo una solución desarrollada por profesionales nicaragüenses, estaría disponible en poco tiempo y con una inversión muy baja.

Cabe destacar que el aire es uno de los principales recursos naturales y es vital para todo ser vivo, por tal razón es de suma importancia conocer qué tan

contaminado se encuentra, y sólo se puede tener conocimiento de esto si se cuentan con los equipos de medición adecuados para medir los niveles de concentración de los gases contaminantes de este recurso natural. El contar con información cuantitativa sobre el nivel de contaminación al que está sometido el país permite a las autoridades correspondientes desarrollar protocolos de control sobre este fenómeno, tomando las medidas necesarias y pertinentes basándose en datos confiables.

Asimismo, para los integrantes de este equipo de trabajo, el desarrollar un sistema de monitoreo de calidad del aire que, con un comportamiento y desempeño similar al de los equipos existentes en el mercado, involucra un gran compromiso con la sociedad nicaragüense y las instituciones nacionales interesadas en esta temática. Pero es mucho más importante, el hecho de que en el desarrollo de este trabajo monográfico se adquirió nuevo conocimiento y se desarrollaron nuevas habilidades. Esta experiencia nos brindó la oportunidad de poner en práctica todo lo que se aprendió a lo largo de la carrera de Ingeniería Electrónica, pues el desarrollo de este prototipo comprende conceptos propios de asignaturas como sistemas de medición, sistemas de comunicación, programación, máquinas computadoras, metodología de investigación, entre otras. En síntesis, llevar cabo este trabajo nos permitió aplicar muchos de los conceptos, métodos y técnicas que se han aprendido durante la carrera, así como también adquirir nuevo conocimiento que nos será de mucha utilidad en nuestra formación profesional.

El desarrollo de un prototipo escalable que realice el monitoreo del estado de la calidad del aire, permitirá que posteriormente, con las debidas actualizaciones y mejoras, pueda ser utilizado en el territorio nicaragüense para suministrar datos confiables de las mediciones de estos parámetros a profesionales y organizaciones del campo de las ciencias ambientales para que puedan desarrollar planes que reduzcan los efectos de este fenómeno en la salud de la población nicaragüense. Los resultados que se obtuvieron al generar este

sistema estarán disponible a toda la comunidad estudiantil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), y será de mayor utilidad para quienes deseen ampliar esta línea de investigación pues podrán tomar este trabajo como referencia para el desarrollo de sus propios proyectos.

# Objetivos

---

## Objetivo General

- Desarrollar un sistema para el monitoreo remoto, inalámbrico y en tiempo real de dos de los contaminantes de la calidad del aire establecidos en la norma técnica nicaragüense.

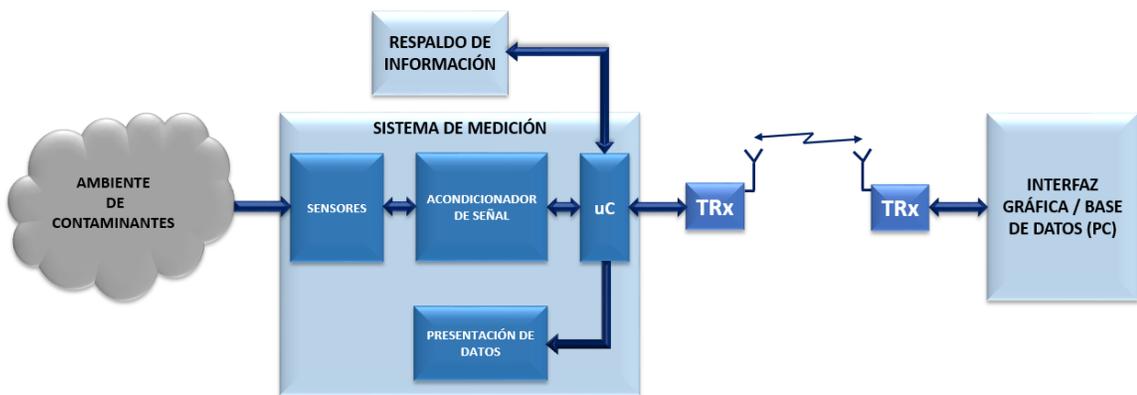
## Objetivos Específicos

- Diseñar el sistema de medición; adquisición, acondicionamiento, y procesamiento de las señales a tratar.
- Diseñar el sistema de comunicación inalámbrica, transmisión y recepción de los datos.
- Desarrollar una interfaz gráfica para la visualización, almacenamiento y análisis de la información generada y transmitida desde el punto de medición, utilizando software libre.
- Verificar el funcionamiento correcto de los subsistemas por individual mediante la simulación y posterior implementación física.
- Garantizar la efectividad del sistema total, una vez desarrollado el circuito impreso del mismo, haciendo los ajustes necesarios.
- Verificar la efectividad del sistema, en condiciones reales, mediante el monitoreo de los contaminantes bajo consideración.

## Capítulo I: Marco Teórico

El monitoreo de la calidad del aire es un procedimiento que permite conocer las concentraciones de los gases contaminantes presentes en la atmósfera en un determinado sector de interés. De esta manera se cuenta con información cuantitativa cuyo análisis ayuda a desarrollar medidas y planes adecuados para controlar los severos efectos de la contaminación del aire. Por esta razón en los últimos años muchos países han dedicado una buena parte de sus recursos en el monitoreo de la calidad del aire y han creado redes de monitoreo sobre todo en su territorio, de tal manera que les permita tener un amplio conocimiento de su situación actual con respecto a la calidad del aire.

El diagrama de bloques del sistema de monitoreo de calidad del aire propuesto se muestra en la figura 1.1, y como se puede apreciar consta de los siguientes subsistemas: sistema de medición, respaldo de información donde se almacenan los valores de las concentraciones de los gases en los puntos de medición, sistema de comunicación inalámbrica para la transmisión-recepción de datos, interfaz gráfica que facilita la interacción entre el usuario y el sistema para realizar el monitoreo y/o reproducción de mediciones anteriores, y la base de datos en la que se almacenan los valores medidos durante el monitoreo. En este capítulo se habla brevemente sobre el estado de la contaminación del aire y sus efectos, así como también sobre los aspectos teóricos y tecnológicos relacionados a cada uno de estos subsistemas.



**Figura 1.1: Diagrama de bloques del sistema de monitoreo de calidad del aire.**

# 1 Monitoreo de calidad del aire

## 1.1 Contaminación atmosférica

La contaminación como tal es un fenómeno que ha venido creciendo a tal punto que ha causado un grado considerable de degradación de ciertos recursos naturales como agua, suelo, aire, entre otros, que son vitales para la existencia de vida en la tierra. Romero Placeres et al. (2006) definen la contaminación como cualquier modificación indeseable del ambiente, causada por la introducción a éste de agentes físicos, químicos o biológicos (contaminantes) en cantidades superiores a las naturales, que resulta nociva para la salud humana, daña los recursos naturales o altera el equilibrio ecológico.

La contaminación del aire es sólo una de las formas en la cual parte del ambiente puede ser degradado o afectado. Los efectos de ésta se manifiestan principalmente en la salud del ser humano, el medio ambiente y la economía de los países. Oyarzún (2010) define la contaminación atmosférica como la presencia en la atmósfera de elementos contaminantes que alteran su composición y que afectan a cualquier componente del ecosistema, mientras que Romero Placeres et al. (2006) sostiene que es la emisión al aire de sustancias peligrosas a una tasa que excede la capacidad de los procesos naturales de la atmósfera para transformarlos, precipitarlos y depositarlos o diluirlos por medio del viento y el movimiento del aire.

### 1.1.1 Causas

De acuerdo a Romero Placeres et al. (2006) ciertos hechos tales como el crecimiento económico y la urbanización, asociados al desarrollo de diversas actividades como la industria petrolera, los servicios, la agroindustria y el incremento de las unidades automotoras, traen como resultado un consumo intenso de combustibles fósiles; al mismo tiempo, la práctica de actividades

agropecuarias no apropiadas inciden en la generación de elevados volúmenes de contaminantes, que al relacionarse con las condiciones ambientales pueden dañar la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales tales como el aire.

### 1.1.2 Gases contaminantes y sus efectos

En la norma técnica de la calidad del aire en Nicaragua se establece que los principales elementos contaminantes son: partículas totales en suspensión (PTS), material particulado menor o igual a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO) y plomo (Pb). Estos contaminantes se pueden encontrar en los tres estados básicos de la materia (gases, sólidos y líquidos). De acuerdo a un artículo elaborado por la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, estos elementos se clasifican en primarios y secundarios. Los elementos primarios son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera y los secundarios se forman mediante procesos atmosféricos químicos que actúan sobre los contaminantes primarios o sobre especies no contaminantes en la atmósfera tales como ozono y material particulado.

De acuerdo a Wei-Ying et al. (2015) los principales efectos de los contaminantes del aire sobre la salud y el medio ambiente son los que se muestran en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1:** *Efectos de los contaminantes del aire en la salud humana y el medio ambiente. Tomado de Wei-Ying et al. (2015).*

Contaminante	Efectos en la salud
<b>Monóxido de carbono</b>	➤ La reducción de la capacidad de oxígeno de las células sanguíneas conduce a la reducción de la entrega de oxígeno a los órganos del cuerpo y tejidos. Un nivel extremadamente alto puede causar la muerte.
<b>Dióxido de nitrógeno</b>	➤ Alto factor de riesgo de enfermedades de enfisema, asma y bronquitis. Puede agravar enfermedades del corazón existentes y aumenta probabilidades de muerte prematura.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Contribuye a la lluvia ácida, y debido a que se disuelve fácilmente en agua puede causar corrosión de metales y deterioro de estructuras.</li> </ul>
<b>Ozono</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Provoca dolor en el pecho, tos, irritación en la garganta, y congestión, Empeora la bronquitis, enfisema y asma.</li> <li>➤ Daña las hojas de los árboles y otras plantas, y reduce la habilidad de las plantas para producir y almacenar comida.</li> </ul>
<b>Dióxido de azufre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Alto factor de riesgo de bronco-constricción e incrementa síntomas de asma.</li> <li>➤ Fácilmente se disuelve en agua contribuyendo a la formación de lluvia ácida.</li> </ul>
<b>Material particulado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Reduce la visibilidad. Causa muerte prematura en personas con enfermedades en el corazón y pulmón. Agrava el asma, disminuye funcionamiento del pulmón y aumenta los síntomas respiratorios como la tos y la dificultad para respirar.</li> <li>➤ Contribuye a la corrosión de metales, erosionando edificios y esculturas.</li> </ul>
<b>Plomo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Se acumula en los huesos y afecta el sistema nervioso, funcionamiento de los riñones, sistema inmunológico, sistema reproductivo, sistemas de desarrollo y sistema cardiovascular. Afecta la capacidad de oxígeno de las células sanguíneas.</li> <li>➤ Disminuye la tasa de crecimiento de las plantas.</li> </ul>

Se observa que el sistema respiratorio del cuerpo humano es el que se ve más afectado al interactuar con estos gases contaminantes, pues la mayoría de las enfermedades que se mencionan están relacionadas a los órganos que lo conforman. Con respecto al medio ambiente el fenómeno de la lluvia ácida se presenta debido a la interacción de los contaminantes primarios del aire tales como dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre.

### 1.1.3 Normas que regulan la calidad del aire

El tema de la calidad del aire hoy en día es de mucha importancia para la sociedad por la gravedad de sus efectos sobre la población y el medioambiente. Por tal razón, gobiernos de algunos países y organizaciones han puesto límites de regulación en estos contaminantes para reducir los riesgos. A nivel internacional, algunos de ellos son la Agencia de Protección Ambiental de los

Estados Unidos que se encarga de preservar los recursos naturales de esa nación, la Organización Mundial de la Salud quien vela por la salud de toda la sociedad a nivel mundial, la Comisión Europea quien cumple la misma función que la norma de Estados Unidos en Europa, entre otras. A nivel local se encuentra la norma técnica obligatoria nicaragüense de la calidad del aire, de la cual se hablará más a fondo en la sección 1.1.3.1 En la tabla 1.2, se ilustran los límites máximos impuestos para la inmisión de gases contaminantes establecidos por las instituciones mencionadas.

**Tabla 1.2:** Comparación de límites máximos permisibles de inmisión de contaminantes en el aire.

Contaminante		Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense de Calidad del Aire	United States Environmental Protection Agency (EPA)	World Health Organization (WHO)	European Commission (EC)
<b>Monóxido de Carbono (CO)</b>		40,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 35 ppm (1 h) 10,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 9 ppm (8 h)	9 ppm (8h) 35 ppm (1h)	100 $\text{mg}/\text{m}^3$ (15 min) 15 $\text{mg}/\text{m}^3$ (1 h) 10 $\text{mg}/\text{m}^3$ (8 h) 7 $\text{mg}/\text{m}^3$ (24 h)	10 $\text{mg}/\text{m}^3$ (8 h)
<b>Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)</b>		400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.21 ppm (1 h) 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.05 ppm (1 año)	100 ppb (1 h) 53 ppb (1 año)	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 h) 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 h) 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)
<b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>		235 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.12 ppm (1 h) 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.08 ppm (8 h)	75 ppb (8 h)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 h)	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 h)
<b>Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)</b>		365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.14 ppm (24 h) 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.03 ppm (1 año)	75 ppb (1 h) 0.5 ppm (3h)	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (10 min) 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 h) 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)
<b>Material Particulado</b>	PM <sub>2.5</sub>	N.A.	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h) 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h) 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)
	PM <sub>10</sub>	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h) 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)

		(1 año)		20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)
<b>Plomo (Pb)</b>		1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3 month) 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)	0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3 meses)	0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)	0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 año)

Las unidades de medida en la tabla se muestran en microgramos sobre metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), partes por millón (ppm) y partes por billón (ppb). Éstas varían de una organización a otra debido al tiempo de exposición al gas contaminante y a las condiciones del ambiente en las que realizaron sus mediciones para establecer estos valores.

Flores (2014) explica que las partes por millón (ppm) son unidades de proporción volumen, esto es, unidades de volumen sobre volumen. Básicamente se divide una determinada proporción de volumen por el volumen total de un gas y luego se multiplica por un factor de  $10^6$ . Las partes por billón (ppb) se diferencian de esta unidad de medida por el factor de multiplicación, el cual es de  $10^9$ . Para una comprensión mejor de este concepto, se describe el siguiente ejemplo: si se tuviese una botella de gas que contiene 250 ppm de monóxido de carbono (CO) y la botella en total contiene 1 millón de moléculas de gas, 250 moléculas del contenido serían de CO y el resto serían moléculas de otros gases presentes en el recipiente.

Los miligramos por metro cúbico por su parte son unidades de medida de masa sobre volumen. Cuando la concentración de los gases se expresa en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ésta disminuye a medida que el gas aumenta, debido que éste es inversamente proporcional al volumen del gas.

### **1.1.3.1 Norma técnica obligatoria nicaragüense de calidad del aire**

La norma técnica nicaragüense tiene como objeto establecer los límites máximos permisibles de inmisión de los principales contaminantes atmosféricos

en el aire sobre el territorio nicaragüense, los métodos de monitoreo para la vigilancia del cumplimiento de la norma, y los plazos de revisión para la actualización de los límites máximos permisibles establecidos a través de ésta, con el fin de proteger el medio ambiente y la salud de la población nicaragüense. En esta norma también se muestran algunas consideraciones que se deben tomar al realizar el monitoreo de la calidad del aire.

## 1.2 Tipos de equipos de monitoreo de calidad del aire

Para poder llevar a cabo el monitoreo de calidad del aire se utilizan equipos especiales que se clasifican en fijos y móviles. Cada uno presenta una serie de ventajas y desventajas con respecto a otro, y éstas se detallan a continuación:

- **Estaciones fijas:** Generalmente el monitoreo de la calidad del aire es realizado a través de sistemas estacionarios. Éstos son altamente confiables, precisos y capaces de medir una gran variedad de contaminantes por el uso de instrumentos analíticos, tales como espectrómetros cromatográficos de masa. Las desventajas de este tipo de equipos es su gran tamaño, su gran peso, y su alto costo. Esto hace que sea difícil para países con falta de recursos como Nicaragua adquirir estos equipos y también lleva a un escaso despliegue de estaciones de monitoreo para países desarrollados. Para realizar un monitoreo efectivo, la ubicación de este tipo de equipos se realiza en puntos estratégicos debido a que la contaminación urbana de aire es producto de la actividad humana. Así un leve cambio en la urbanización podría afectar el arreglo de estas estaciones y provocaría una reubicación de los equipos.
- **Estaciones móviles:** Éstas fueron creadas con el objetivo de mejorar la resolución espacio temporal de la información de la contaminación del aire. Estas estaciones están compuestas por un conjunto de sensores de bajo costo portátiles y redes de monitoreo que se comunican inalámbricamente. Usando este tipo de equipos, la contaminación del aire puede ser actualizada en

cuestión de minutos o incluso en cuestión de segundos. Éstas también facilitan la movilidad y viabilidad en el despliegue en gran escala de nodos de sensores, por tal razón, estos sistemas se encuentran categorizados entre las estaciones de monitoreo convencionales y los modelos de calidad, ya que generan información basándose en modelos de calidad del aire o estimaciones.

Teniendo en cuenta las ventajas previamente descritas, que se obtienen de las estaciones de monitoreo móviles, se ha considerado construir el prototipo de monitoreo de la calidad del aire usando tecnologías similares y los principios que éstas emplean, y ubicarla en un punto fijo inicialmente para recolectar datos de las variables de interés.

### 1.2.1 Funciones de un equipo de monitoreo de calidad del aire

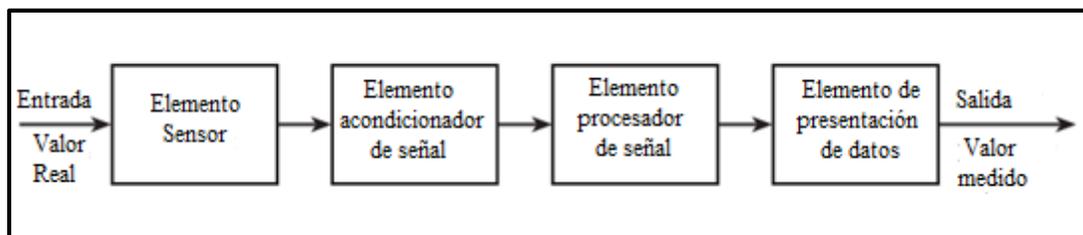
Brienza et al. (2015) en el desarrollo de su prototipo de monitoreo de tiempo real de la calidad del aire mencionan las tres principales funciones de su equipo, la cuales son las siguientes:

- **Muestreo del gas de interés:** En busca de monitorear la calidad del aire dentro de un área de interés, un usuario tiene sólo que desplegar el nodo sensor. Estos modelos miden la concentración en el aire de algunos contaminantes dañinos. Estas mediciones son desarrolladas periódicamente (por ejemplo, cada 30 minutos).
- **Transferencia de datos:** después que la concentración de los gases contaminantes ha sido medida, los datos obtenidos son colocados en un paquete y transmitidos hacia un lugar remoto donde se visualizará y almacenará la información recibida, a través de una tecnología inalámbrica. (por ejemplo, WiFi, Zigbee, Bluetooth, entre otros).
- **Visualización de datos:** Aquí los datos obtenidos del nodo sensor son almacenados dentro de una base de datos y se visualiza la información de los contaminantes.

En la búsqueda de trabajos relacionados, los sistemas que se han desarrollado previamente poseen el mismo principio de funcionamiento y se componen de las mismas etapas, por consiguiente, para el diseño e implementación de este prototipo de monitoreo de la calidad del aire se siguió la misma estructura, basándose en las mismas etapas. En los siguientes apartados se explican los bloques o subsistemas que conforman el sistema de monitoreo de la calidad del aire que se desarrolló.

### 1.3 Sistema de medición

Esta es la etapa inicial del sistema de monitoreo de la calidad del aire donde se obtiene la información del estado de los contaminantes que degradan la calidad del aire. Bentley (2005) explica que un sistema de medición está compuesto de varios elementos o bloques. Sin embargo, existen cuatro elementos básicos que se pueden identificar, aunque de acuerdo a otros autores estos bloques se pueden subdividir dando origen a más elementos o también pueden fusionarse reduciendo la cantidad de bloques del sistema. Los cuatro tipos de elementos son mostrados en la figura 1.2 y se pueden definir de la siguiente manera:



*Figura 1.2: Estructura general de un sistema de medición. Tomado de Bentley (2005).*

- **Elemento sensor:** Este elemento se encuentra directamente en contacto con el proceso y proporciona una salida que depende de la variable a ser medida.
- **Elemento acondicionador de señal:** Este elemento toma la salida del elemento sensor y la convierte en una forma más adecuada para su posterior

procesamiento, las cuales usualmente son señales de voltaje, corriente o frecuencia.

- **Elemento procesador de señal:** toma la salida del bloque acondicionador y la convierte en una forma más adecuada para su presentación.
- **Elemento de presentación de datos:** este presenta el valor de los datos en una forma que estos puedan ser reconocidos por el usuario.

Para el diseño de este sistema existen muchas opciones en cuanto a métodos y sensores por tanto se hará una explicación más detallada de estos términos a continuación.

### 1.3.1 Métodos de medición

Existen distintos métodos para la medición de gases en el medio ambiente. Según Suntaxi Pichuasamin (2015) los más aceptados e importantes son:

- **Monitoreo mediante sistemas pasivos:** en este método la muestra de un contaminante en específico se da a través de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado. El período de exposición del sustrato al contaminante para poder obtener una muestra válida puede tardar horas, meses, e inclusive un año, y luego, éstas son llevadas al laboratorio para su respectivo análisis.

Este método ofrece simplicidad en su operación y un bajo costo, sin embargo, no se pueden medir todos los contaminantes del aire, sólo proporcionan valores promedios por lo que no ofrecen gran exactitud y en general requieren de análisis de laboratorio.

- **Monitoreo mediante sistemas activos:** se necesita de energía eléctrica para succionar determinada cantidad de aire a muestrear en un recipiente de colección físico o químico. Se pueden obtener mediciones diarias promedio debido a que el volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad.

Es fácil de operar, es muy confiable y ofrece un bajo costo, pero no se pueden obtener los valores máximos y mínimos de las mediciones y se requiere del análisis de muestras en el laboratorio

- **Monitoreo mediante sistemas automáticos:** Este tipo de monitoreo ofrece una alta resolución en las mediciones obtenidas, lo cual permite la realización de mediciones de forma continua. Ofrece una gran variedad de componentes a medir, las muestras se obtienen utilizando métodos como espectroscopia y cromatografía de gases, y los valores de las concentraciones son en tiempo real.

Las desventajas de este tipo de monitoreo son su costo elevado de adquisición y operación; requieren personal capacitado para su manejo; requieren mantenimiento y calibración constantes.

- **Monitoreo mediante sensores remotos:** Con el uso de sensores remotos es posible hacer mediciones, en tiempo real, de la concentración de diversos contaminantes. A diferencia de los monitores automáticos, que proporcionan mediciones de un contaminante en un punto determinado en el espacio, pueden proporcionar mediciones integradas de multicomponentes a lo largo de una trayectoria específica en la atmósfera (normalmente mayor a 100 m).

- **Monitoreo mediante bioindicadores:** este método requiere del uso de especies vivas tales como vegetales, plantas o árboles cuya superficie actúa como receptora de contaminantes. Se utiliza particularmente para el estudio de los efectos de la degradación de la calidad del aire, los cuales se pueden apreciar en características de una planta tales como su crecimiento, su aspecto, entre otros.

Aunque es muy útil para determinar los efectos de algunos contaminantes, existen problemas con la estandarización de las metodologías y procedimientos que se utilizan y de igual forma que el método pasivo, se requiere de análisis de laboratorio.

Como se puede notar, en todos estos métodos se realizan procedimientos tales como muestreo, análisis, calibración de instrumentos, entre otros. Sin

embargo, la elección del método específico de análisis depende de factores como precisión en la medición de la variable de interés, costos de adquisición de equipos y tecnologías a utilizar, tiempo necesario para obtener el valor de un contaminante, eficiencia del método, entre otros.

Para el prototipo desarrollado, el método que describe el funcionamiento general del sistema es el que utiliza sensores remotos puesto que este tipo de monitoreo permite obtener valores en tiempo real, alta resolución; es útil para mediciones de emisiones de fuentes específicas y de multicomponentes.

### 1.3.2 Principios de funcionamiento de sensores

Existe una gran variedad de sensores para la medición de los niveles de concentración de los gases contaminantes de calidad del aire, y por tanto se debe ser muy cuidadoso al considerar la opción más adecuada para medir la variable de interés. La selección de este instrumento estará en función de los requerimientos del sistema a implementar los cuales fueron previamente definidos por los diseñadores del prototipo. Éstos son:

- Los niveles de los contaminantes atmosféricos deben medirse en ppm (partículas por millón). La exactitud debe ser de  $\pm 1$  ppm.
- Los rangos de medición deben cubrir los valores especificados para cada contaminante en la Norma Técnica Nicaragüense de la Calidad del Aire.
- Los sensores deben estar diseñados para operar en las condiciones ambientales al aire libre (outdoor).

Otras especificaciones técnicas de la tecnología a implementar que se toman en cuenta al momento de seleccionarla son: precisión, resolución, sensibilidad, calibración, robustez, durabilidad, requerimientos de mantenimiento y costo de adquisición.

En el caso de la medición de los gases contaminantes que degradan la calidad del aire existen diferentes tipos de sensores con distinto principio de

funcionamiento. De acuerdo a Wei-Ying et al. (2015) existen 5 tipos de sensores para equipos portátiles ampliamente utilizados, los cuales son los electroquímicos, de estado sólido, catalíticos, de absorción por radiación infrarroja no dispersiva (NDIR, por sus siglas en inglés) y detectores de foto-ionización. Todos estos sensores son de peso ligero, y de rápido tiempo de respuesta. Sin embargo, el principio de operación de cada uno de ellos limita el uso a sólo algunos de los contaminantes establecidos en la norma técnica debido a que la densidad y estado en el que se encuentran éstos puede variar.

En la tabla 1.3 se muestra un resumen con las características más importantes de los principios de funcionamiento de estos sensores. Como se puede observar, cada tipo de sensor opera correctamente para un conjunto específico de gases y las características principales que los diferencian son linealidad, sensibilidad cruzada, consumo de energía, mantenimiento, tiempo de respuesta y expectativa de vida. De acuerdo con éstas se concluye que los dos mejores tipos de sensores para la medición de los principales gases contaminantes son los electroquímicos y los de estado sólido. Otra de las razones para delimitar la selección del sensor a estos dos principios operación es el hecho de que, en la revisión de literatura realizada, los prototipos desarrollados en trabajos relacionados utilizan sensores de este tipo para medir los contaminantes.

**Tabla 1.3:** Principios de funcionamiento de sensores de contaminantes del aire

Tipo de Sensor	Gases Detectables	Linealidad	Sensibilidad Cruzada	Consumo De Energía	Mantenimiento	Tiempo De Respuesta	Expectativa De Vida
<b>Electroquímico</b>	Gases que son electroquímicamente activos, alrededor de 20 gases	Linealidad a temperatura ambiente	Puede ser eliminado usando filtros químicos	Menor, consumo de energía muy bajo	Bajo	< 50s	1-2 años
<b>Catalítico</b>	Gases combustibles	Lineal de 400 °C a 600 °C	No tiene sentido cuando se miden gases mezclados	Mayor, necesita calentarse arriba de 400°C a 600°C	Pierde sensibilidad con el tiempo debido al envenenamiento y quema de éste	< 15s	Más de 3 años
<b>Estado Sólido</b>	Alrededor de 150 gases diferentes	Lineal a temperatura operacional	Pueden ser minimizados usando los filtros apropiados	Mayor, necesita un elemento calentador para regular la temperatura	Bajo	20s a 90s	10 años
<b>Infrarrojo No Dispersivo</b>	Gases de hidrocarbano y dióxido de carbono	No lineal, necesitan procedimiento de linealización	Todos lo hidrocarbano comparten una banda de absorción similar	Pequeño, principalmente consume por la fuente infrarroja	El menor	< 20s	3-5 años
<b>Foto-Ionización</b>	Componentes orgánicos volátiles (VOCs)	Relativamente lineal	Cualquier VOCs con potencial de ionización	Medio, principalmente consume de la	La lámpara requiere frecuente limpieza	< 3s	Depende de la lámpara ultravioleta

			menor que potencial ionizante de la lámpara usado será medido	fuelle ultravioleta			normalmente 6000 horas
--	--	--	---	------------------------	--	--	---------------------------

Estos sensores de gases contaminantes ofrecen una precisión aceptable y un amplio rango de medición. A continuación, es presentado el funcionamiento de los sensores de estado sólido y sensores electroquímicos.

### 1.3.2.1 Sensores de gas de estado sólido

Según Wei-Ying et al. (2015) un sensor de estado sólido consiste en uno o varios óxidos metálicos como óxido de estaño u óxido de aluminio y un elemento de calentamiento. Existen dos tipos de sensores de estado sólido, tipo cuenta y tipo chip. Cuando los óxidos metálicos se pueden transformar en una pasta, son de tipo cuenta (ver Figura 1.3), y cuando los óxidos se depositan en un chip de silicio, se les conoce como tipo chip. Cuando los óxidos metálicos están expuestos a los gases ambientales, éstos se disociarán en iones cargados o complejos que hacen que los electrones se acumulen en la superficie de los óxidos metálicos. La acumulación de electrones cambia la conductividad de dichos óxidos. Al medir el cambio de conductividad, se puede deducir la concentración de un tipo específico de gas contaminante.

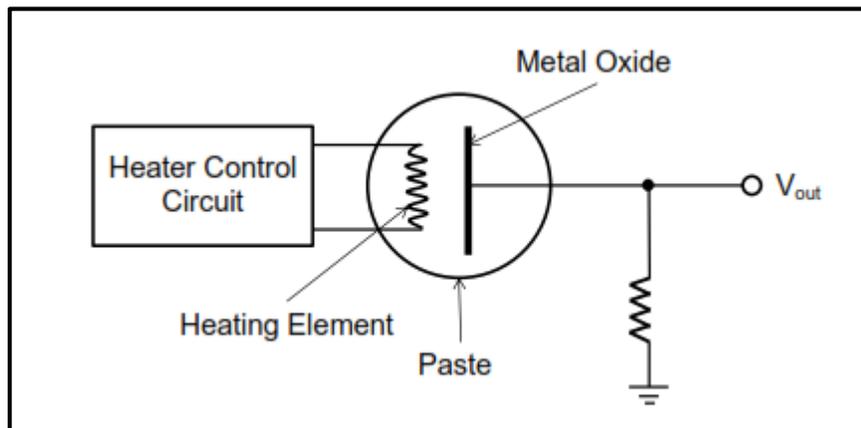


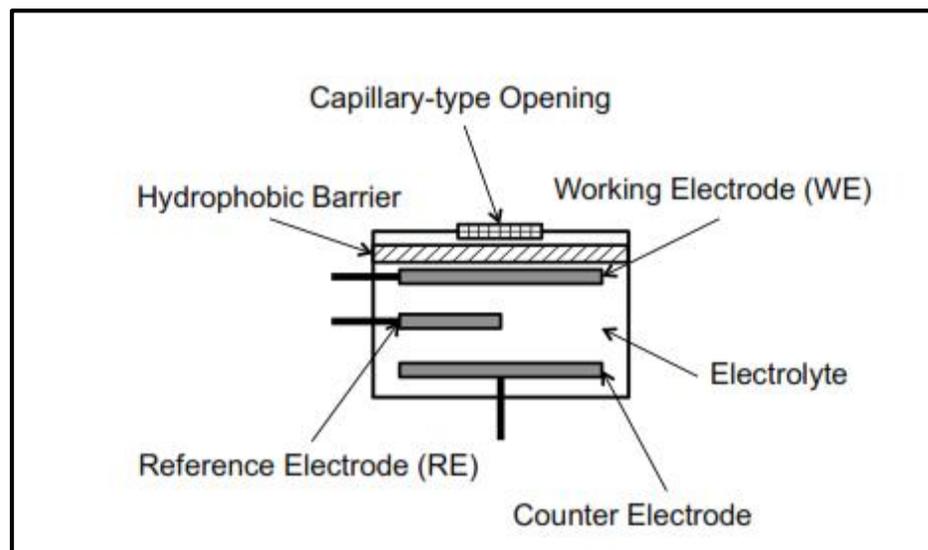
Figura 1.3: Sensor tipo cuenta. Tomado de Wei-Ying et al. (2015).

Con el fin de aumentar la velocidad de reacción para producir una señal eléctrica a la salida del sensor, un elemento calefactor se utiliza dentro del sensor de estado sólido. El elemento calefactor también se utiliza debido a que la respuesta (cambio de conductividad) de un tipo específico de gas ambiente es diferente en diferentes rangos de temperatura.

### 1.3.2.2 Sensores electroquímicos

El mecanismo de trabajo de este tipo sensores está basado en reacciones electroquímicas (reacciones de oxidación-reducción, específicamente) que ocurren dentro de ellos. La reacción entre el sensor y las moléculas de gas contaminante producen una señal eléctrica (corriente) proporcional a la concentración del gas ambiente.

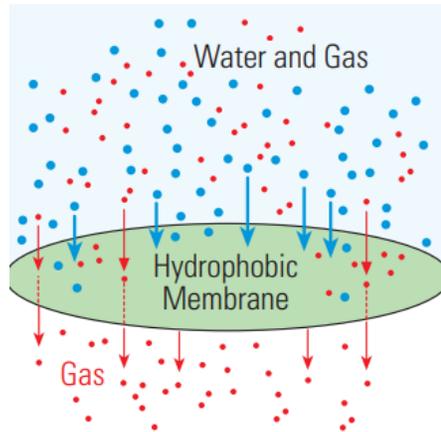
Estos sensores están básicamente compuestos de una barrera de difusión, una membrana hidrofóbica, un electrodo sensor o de trabajo (WE, Working Electrode), un cátodo o contraelectrodo (CE, Counter Electrode), un electrodo de referencia (RE, Reference Electrode) y una solución acuosa de fuertes ácidos inorgánicos llamada electrolito. La figura 1.4 ilustra la estructura de un sensor electrolítico.



**Figura 1.4:** Sensor electroquímico básico. Tomado de Wei-Ying et al. (2015).

International Sensor Technology explica que cuando el gas entra en contacto con la superficie del sensor, éste atraviesa primero una apertura pequeña de tipo capilar y luego se difunde en una membrana hidrofóbica, hasta que alcanza la superficie del electrodo de trabajo (ver Figura 1.5). Esto ayuda a que una apropiada cantidad de gas interactúe con el electrodo sensor para así producir

una suficiente señal eléctrica, de la misma forma que se evita que el electrolito se escape del sensor.



**Figura 1.5: Membrana hidrofóbica. Tomado de International Technology Sensors.**

Internamente en el sensor se produce un mecanismo de oxidación o reducción cuando el gas que atraviesa la barrera reacciona con el electrodo sensor. Cuando un sensor electroquímico se encuentra operando, el potencial que se presenta en el electrodo sensor no es constante debido a las continuas reacciones electroquímicas que ocurren dentro de la superficie del electrodo. Esto provoca que el rendimiento del sensor se deteriore al trabajar durante grandes periodos de tiempo. Por esta razón se inserta en el electrolito del sensor un electrodo de referencia al cual se le aplica un voltaje fijo estable y constante, para poder mejorar el rendimiento de éste. Este electrodo mantiene el valor del voltaje fijo aplicado en el electrodo de trabajo. Por este electrodo no fluye ningún tipo de corriente y la corriente que fluye entre el electrodo de trabajo y el contra electrodo es por lo general relacionada directamente a la concentración del gas.

Estos sensores son generalmente bastante selectivos al gas a medir para el que fueron diseñados. Su grado de selectividad depende el tipo de sensor, el gas objetivo, y los niveles de concentración del gas que el sensor irá a detectar. Algunos de estos sensores son propensos a sufrir interferencia producto de otros gases. La expectativa de vida de un sensor electroquímico depende de varios factores, dentro de los cuales se encuentra la cantidad total de gas a la que éste

estará expuesto y las condiciones del entorno tales como presión, temperatura y humedad donde el sensor será usado. Los sensores electroquímicos requieren un bajo consumo de energía, a diferencia de los otros tipos de sensores disponibles para el monitoreo de gases tóxicos, por lo que son utilizados en equipos que poseen múltiples sensores.

### **1.3.3 Acondicionamiento de señal**

Tal y como se abordó en la sección 1.3, Pallás Areny (2003) explica que los componentes del elemento acondicionador de señal son capaces de adecuar la señal de salida de un sensor en un tipo de señal más apta para su posterior presentación, almacenamiento o procesamiento mediante otros equipos. Los circuitos electrónicos involucrados dentro de este bloque desempeñan funciones tales como amplificación, filtrado, adaptación de impedancias y modulación o demodulación.

Las etapas de acondicionamiento de las salidas de sensores se desarrollaban antes a partir de elementos discretos, pero hoy en día existe otra forma de llevar a cabo esta tarea en la cual se integran todas las funciones de acondicionamiento en un sólo componente. Esta solución es llamada AFE (analog front end), de la cual se hablará más detalladamente en la sección 1.3.3.1.

#### **1.3.3.1 Circuitos integrados AFE**

Según Sins (2011), los AFEs (analog front end) son una nueva línea de circuitos integrados que proporcionan una solución fácil de usar, ya que permite a los diseñadores enfrentar los desafíos que se presentan en el tratamiento de la señal por las distintas etapas por las que ésta viaja. Éstos llevan a cabo funciones de acondicionamiento tales como amplificación, filtrado, conversión analógica a digital y otros, todas en un mismo bloque, optimizando así la etapa de captación de señales para su posterior procesamiento. Los AFE son soluciones optimizadas para aquellos sensores que presentan pocas variaciones a su salida.

Una de las grandes ventajas de los AFE es que ayudan a reducir errores, tiempo y recursos en el diseño de los sistemas de medición, debido a que son soluciones diseñadas específicamente para las necesidades y funciones del sensor a utilizar. Éstos sólo tienen que configurarse en base a las características del sensor. La mayoría de los modelos son compatibles con una gran cantidad de sensores con el mismo principio de funcionamiento, y su configuración puede realizarse a través de conexión serial con un microcontrolador empleando protocolos SPI o I<sup>2</sup>C. Esto quiere decir que éstos fácilmente pueden optimizarse para satisfacer las necesidades específicas de una aplicación que utilice un sensor en particular. En el caso del prototipo a desarrollar, ésta también es una de las razones para la elección de su uso, puesto que uno de los requerimientos del sistema de monitoreo desarrollado es la escalabilidad en cuanto a la medición de más contaminantes, y contar con un integrado que funcione para sensores con especificaciones similares simplifica esta tarea.

#### **1.3.4 Unidad de procesamiento**

La unidad de procesamiento es la que se encarga de tratar toda la información proporcionada por los otros subsistemas de la etapa de medición. Algunas funciones que ésta realiza son convertir las señales eléctricas obtenidas a unidades de medida de los gases, de tal manera que el usuario pueda entender la información, y otra es transmitir dichos datos hacia un punto de recepción donde se visualizan y almacenan. Los dispositivos más comunes en esta etapa son los microcontroladores los cuales cuentan con una amplia gama de recursos muy útiles para el tratamiento de la información.

##### **1.3.4.1 Microcontroladores**

Ibrahim (2008) define un microcontrolador como una computadora incrustada en un sólo chip. Micro significa que el dispositivo es pequeño y controlador sugiere que se utiliza en aplicaciones de control. Otro término para microcontrolador es controlador embebido, ya que la mayoría de estos integrados

se encuentran ubicados dentro de los dispositivos que controlan. Estos sistemas incluyen al menos un microprocesador, memoria de programa, memoria de datos, y dispositivos de entrada y salida. Otros componentes adicionales que estos sistemas incluyen son temporizadores, contadores, y convertidores analógico-digitales. En el mercado existen un sinnúmero de empresas que ofrecen una amplia variedad de familias de microcontroladores que varían conforme a los recursos que poseen. Cada día la capacidad de procesamiento de información y la cantidad de recursos que poseen estos dispositivos aumentan considerablemente a un precio relativamente bajo, y existen herramientas de software gratuitas que complementan su uso, las cuales incluyen un editor de texto, un linker, un depurador, un compilador externo, entre otros.

Todos los microcontroladores trabajan en función de un conjunto de instrucciones (o el programa de usuario) almacenados en su memoria. Un microcontrolador sigue las instrucciones desde su memoria de programa una por una, decodifica estas instrucciones y entonces lleva a cabo las operaciones recibidas.

#### ***1.3.4.2 Software de programación***

Los microcontroladores han sido tradicionalmente programados utilizando lenguaje ensamblador, ya que fue la primera opción que surgió para dejar de escribir código ejecutable directamente. La ventaja principal de este lenguaje es que permite tener un control completo sobre lo que está pasando internamente en el microcontrolador, pero las instrucciones que se usan lo hacen muy difícil para utilizarse en programas con un alto grado de complejidad. Por tal razón se ha trabajado para que los microcontroladores también se puedan programar utilizando un lenguaje de alto nivel, como BASIC, PASCAL o C, debido a que éstos son más fáciles de aprender y permiten agilizar el desarrollo de programas extensos y complejos. Estos lenguajes necesitan de un compilador, el cual es un programa que convierte sus programas en código ejecutable para que el

microcontrolador pueda almacenarlo en su memoria flash y ejecutarlo. También existen intérpretes los cuales, a diferencia de un compilador, almacenan en memoria el programa desarrollado en el lenguaje de alto nivel, y luego leen una línea de código a la vez, la interpretan y finalmente la ejecutan. El lenguaje C es el más utilizado debido a su simplicidad de uso y es el que los desarrolladores de este proyecto dominan más, por lo que fue el que se utilizó para la programación del microcontrolador.

Cabe mencionar que este lenguaje también posee ciertas desventajas, pues según MikroElektronika (s.f.), los compiladores de este lenguaje a diferencia de los compiladores de lenguaje ensamblador, crean la mayoría de las veces código ejecutable más del necesario, lo que provoca un mal uso de la memoria flash donde se almacena el código ejecutable, por lo que hay que tener cuidado en aplicaciones donde la memoria flash del microcontrolador sea limitada y la aplicación demande la elaboración de un código complejo. Para el desarrollo de este proyecto, este problema no fue un inconveniente, debido a que el programa que se elaboró no requería de grandes espacios de memoria.

Un compilador de C ampliamente utilizado es el entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) PICC de CCS, el cual fue desarrollado específicamente para la arquitectura de los PIC MCU (Microcontroladores), pues posee la máxima optimización al utilizar estos dispositivos. García (2008) explica que este software dispone de una amplia librería de funciones predefinidas, comandos de pre-procesado y ejemplos. Además, suministra los controladores (drivers) para diversos dispositivos como LCD, convertidores analógicos-digitales, relojes en tiempo real, EEPROM serie, entre otros. Este software es C estándar, pues además de las directivas estándar (como `#define`, `#include`, etc.), suministra unas directivas específicas para PIC (como `#device`, `#fuses`, entre otros). Asimismo, proporciona un editor que permite controlar la sintaxis del programa.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó este último compilador debido a que emplea un lenguaje estándar como lo es C, posee una amplia biblioteca de funciones para el acceso al hardware de los dispositivos, incorpora drivers para dispositivos externos, y es del que más se tiene conocimiento. Se empleó este compilador en su versión demo, la cual permite hacer uso de los recursos que este IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) dispone en un período de cuarenta y cinco días, tiempo que fue suficiente para el desarrollo del software del microcontrolador en el nodo de monitoreo del prototipo.

#### **1.3.4.3 Protocolos de comunicación serial**

National Instruments (2012) define que la comunicación serial ocurre cuando se transfiere los datos un bit a la vez en un orden secuencial a través de un canal de comunicación. Este tipo de comunicación comúnmente es utilizado por muchos dispositivos para instrumentación, por tanto, puede emplearse en aplicaciones para adquisición de datos en conjunto con un dispositivo de muestreo remoto. La comunicación serial básicamente consiste en enviar y recibir bytes de información bit por bit. Aunque el intercambio de información es más lento que en su contraparte, la comunicación paralela, es mucho más sencillo, y menos costoso, ya que requiere menor cantidad de cables, y se puede utilizar en distancias grandes.

En algunas ocasiones el dispositivo procesador (microcontrolador) interactúa con otros dispositivos externos tales como sensores, módulos RTC, módulos de memoria, entre otros, y para lograr el intercambio de información se hace uso de protocolos basados en comunicación serial. Los más utilizados son los siguientes:

- **SPI** (Serial Peripheral Interface): éste es un estándar de bus serial síncrono creado por Motorola que opera en el modo full-dúplex. Los dispositivos que usan este protocolo operan en el modo maestro-esclavo, donde el dispositivo master inicia la transferencia de datos, selecciona el esclavo, y proporciona

una señal de reloj para los esclavos. El esclavo seleccionado responde y envía sus datos hacia el master a cada pulso del reloj. El bus SPI puede operar con un sólo dispositivo maestro y uno o más dispositivos esclavos. Esta interfaz también es llamada “interfaz de cuatro alambres”.

Las señales en el bus SPI son nombradas de la siguiente manera: MOSI: Master Output, Slave Input, MISO: Master Input, Slave Output, SCLK: Serial Clock, SS: Slave Select. Un uso muy común de este protocolo es que permite establecer comunicaciones con unidades de almacenamiento masivo como las memorias SD.

- **I<sup>2</sup>C** (Inter Integrated Circuit): Según García (2008), I<sup>2</sup>C es un bus que se basa en la comunicación a través de dos hilos. Cada dispositivo conectado al bus tiene una dirección, y puede configurarse como una comunicación de varios maestros y varios esclavos o una configuración multimaestro. En ambas configuraciones el dispositivo maestro es el que tiene la iniciativa en la transferencia, y decide con quién se realiza, el sentido de la misma (envío o recepción desde el punto de vista del maestro) y cuándo finaliza. Este módulo I<sup>2</sup>C, es ideal para la comunicación con memorias seriales.
- **USART** (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter): Clavijo Mendoza (2011) afirma que USART es un módulo de comunicación serial estándar, de forma asíncrona. Esta característica lo hace muy utilizado dado que requiere un sólo medio de transmisión para enviar información, y no requiere un medio para una señal de reloj. Ésta, también conocida como sincronismo lo deben asumir, independientemente cada uno de los elementos, es decir el transmisor y el receptor. Otra ventaja de este módulo es que cuenta con comunicación full-dúplex, es decir que puede transmitir y recibir información al mismo tiempo. Para este propósito se usan dos medios de transmisión dedicados, uno sólo para transmitir y uno sólo para recibir. El módulo USART permite hacer comunicaciones con dispositivos como sensores, módulos de transmisión y recepción XBee, ordenadores personales, módulos GPS, y otros micros.

Cada una de las interfaces seriales mencionadas poseen ventajas y desventajas respecto a las demás. Por ejemplo, SPI puede implementarse en aplicaciones que requieran mayores velocidades (más de 10 Mbps) y es full-dúplex, pues posee dos líneas dedicadas para el intercambio de datos. En cambio, I<sup>2</sup>C es semi-dúplex ya que sólo posee una línea para datos, pero posee otras ventajas como el hecho de que se pueden interconectar varios dispositivos esclavos utilizando sólo las dos líneas dedicadas del protocolo con un dispositivo maestro. La cantidad de dispositivos conectados estará en dependencia de la capacitancia de las líneas de datos. USART por su parte es ideal para aplicaciones de comunicación entre un PC y un microcontrolador para adquirir los datos del sistema y así poder visualizarlos y almacenarlos.

Durante todo el desarrollo de este prototipo se emplearon estos tres protocolos de comunicación de acuerdo al dispositivo periférico con el cual el microcontrolador establecía una conexión.

#### **1.4 Comunicación inalámbrica.**

De acuerdo a Mayné (2015) una comunicación inalámbrica es aquella en la que se transmite la información sin el uso de cables o cualquier tipo de conductor eléctrico. Sus principales ventajas son que permiten una facilidad de emplazamiento y reubicación, evitando la necesidad de establecer un cableado y rapidez en la instalación. Las técnicas más utilizadas son: por Infrarrojos (IR), y por Radiofrecuencia (RF).

La aparición de circuitos transmisores completamente integrados con las funciones de emisor y receptor, en diferentes bandas de frecuencia que se fueron estandarizando en las diferentes zonas (Europa y USA), ha permitido su uso en los diferentes campos de aplicación industrial, comercial, y médico, como: control remoto, transmisión de datos en sensores o sistemas de adquisición de datos, en monitorización médica o de la salud, entre otros.

Para establecer la comunicación entre los dispositivos existen protocolos, los cuales describen las reglas para la transmisión y recepción de información. Algunos de los protocolos más utilizados en las comunicaciones inalámbricas son los siguientes:

- **Protocolo de comunicación ZigBee:** ZigBee es una tecnología inalámbrica desarrollada como un estándar global abierto para satisfacer las necesidades únicas de redes M2M (máquina a máquina) inalámbricas de bajo costo y bajo consumo. El estándar ZigBee opera con la especificación de radio física IEEE 802.15.4 y opera en bandas ISM (Industrial, Científica y Médica), incluyendo 2.4 GHz, 900 MHz y 868 MHz. Esta característica evita que se tenga que pagar cierto permiso especial a alguna instancia reguladora del espectro radioeléctrico para poder operar sobre esta frecuencia.

La especificación 802.15.4 sobre la cual funciona la pila ZigBee fue ratificada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en 2003. La especificación es un protocolo de radio basado en paquetes destinado a dispositivos de bajo costo y operados por baterías. El protocolo permite a los dispositivos comunicarse en una variedad de topologías de red y puede tener duración de batería de varios años (DIGI, s.f.).

- **Protocolo de comunicación LoRaWAN:** El grupo Alliance (2015) establece que LoRa (por sus siglas en inglés: Long Range) es la capa física o la modulación inalámbrica utilizada para crear enlaces de comunicación a grandes distancias. Muchos sistemas inalámbricos usan modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) como capa física debido a que es muy eficiente para lograr bajo consumo. LoRa está basado en una modulación de espectro esparcido, la cual ayuda a mantener las características de bajo consumo como en la modulación FSK, pero incrementa de manera significativa el rango de comunicación. El espectro esparcido ha sido utilizado en comunicación militar y espacial por décadas debido a las largas distancias que pueden alcanzarse y la robustez ante la interferencia, pero LoRa es la primera implementación de bajo costo para uso comercial.

LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema mientras que la capa física LoRa habilita el enlace de comunicación de largo alcance. El protocolo y la arquitectura de red tienen mayor influencia en la duración de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad, y la variedad de aplicaciones atendidas por la red.

- **Protocolo de comunicación Bluetooth:** Bluetooth es un protocolo estandarizado para enviar y recibir datos a través de un enlace inalámbrico de 2.4 GHz. Es un protocolo seguro y es perfecto para transmisiones inalámbricas de corto alcance, bajo consumo y bajo costo. Es excelente para transmitir de forma inalámbrica cantidades relativamente pequeñas de datos a corto alcance (<100m). Está perfectamente adecuado como un reemplazo inalámbrico para interfaces de comunicación serie.
- **Protocolo de comunicación WiFi:** Mayné (2015) expresa que WiFi (Wireless Fidelity) es un sistema de comunicación sin hilos WLAN (Wireless Local Area Network) que se utiliza para redes de PC y periféricos. La iniciaron un consorcio de diferentes compañías en 1990. La transmisión de datos trabaja en modo bidireccional con un protocolo CSMA/CD, que evita colisiones y monitoriza el nivel de señal en la red.
- **Protocolo de comunicación Sigfox:** Design Spark (2015) señala que una alternativa de amplio rango para comunicación inalámbrica es Sigfox, el cual se encuentra ubicado entre WiFi y la tecnología celular. Utiliza las bandas ISM, que son libres y no requieren de licencias, para transmitir datos sobre un espectro muy estrecho hacia y desde objetos conectados. La idea de Sigfox es que sea una opción para muchas aplicaciones máquina-máquina (M2M, por sus siglas en inglés) que se comunican a una gran distancia, que se ejecutan en una batería pequeña y sólo requieren bajos niveles de transferencia de datos, donde tecnologías como WiFi y la tecnología celular no puedan cubrir estos requerimientos, ya que la primera opción ofrece un rango demasiado corto, y la otra implica un alto consumo de energía. Sigfox utiliza una tecnología llamada banda ultra estrecha (UNB, por sus siglas en inglés) y sólo está

diseñada para manejar bajas velocidades de transferencia de datos de 10 a 1,000 bits por segundo. Consume solamente 50 microwatts comparado a 5000 microwatts para la comunicación celular, y puede entregar un tiempo stand-by típico de 20 años con una batería 2.5Ah, mientras que la tecnología celular con la misma batería puede pasar por un periodo superior a 2 meses.

La selección del protocolo a utilizar depende de los requerimientos definidos para el sistema de comunicación inalámbrica del prototipo propuesto para el monitoreo de calidad del aire. Los requerimientos son los siguientes:

- Para el monitoreo de los niveles de los contaminantes, el sistema debe contar con comunicación inalámbrica. El alcance no debe ser menor a 500 metros.
- El sistema debe ser escalable y contar con la capacidad de expandirse a una red de monitoreo con múltiples estaciones de adquisición de datos. Por tanto, la tecnología de comunicación a utilizar debe poder configurarse en una red tipo malla.

Asimismo, para la elección de la tecnología más adecuada se toman en cuenta otros parámetros importantes como el consumo de energía y la tasa de datos a enviar. La tabla 5.4 muestra un resumen de los aspectos técnicos más relevantes de los protocolos descritos.

**Tabla 1.4:** Comparación de protocolos de comunicación inalámbrica

Descripción de Protocolos y Tecnologías de Comunicación Inalámbrica							
Protocolo	Tecnología	Standard	Frecuencia de Operación	Rango	Velocidad de Datos	Velocidad de Configuración de Conexión	Descripción General
Bluetooth	Classic	Versión 4.2	2.4 GHz	50-150 m ~10-30 m	1 Mbps	100 ms	De bajo consumo.
	BLE				305 kbps	<6 ms	
	Classic	Versión 5		4x = 200-600 m ~40-120m	2x = 2 Mbps		De bajo consumo.
	BLE				2x = 610 kbps		
Zigbee	PRO	Zigbee 3.0 basado en IEEE 802.15.4	2.4 GHz / 915MHz / 868MHz	10-100m	250 kbps / 40 kbps / 20kbps	15 - 30 ms	
	RF4CE		2.4 GHz		250 kbps		Para redes de control remoto.
	IP		2.4 GHz / 915MHz / 868MHz / 920 MHz	50-200m	250 kbps / 40 kbps / 20kbps		Para redes basadas en IPv6.
Z-Wave		Z-Wave Alliance ZAD12837 / ITU-T G.9959	900 MHz (ISM)	30-100m	9.6 kbps / 40kbps / 100 kbps		Orientado a aplicaciones de hogares inteligentes.
WiFi		IEEE 802.11.n	2.4 GHz / 5 GHz	46-92m	300 Mbps	6.22 ms / 0.9 ms	
		IEEE 802.11.ac			450 Mbps / 1300 Mbps		
Sigfox		Sigfox	868 MHz / 915 MHz	30-50 km (urban) 3-10 km (rural)	100 bps		De muy bajo consumo (LPWAN).

<b>Neul</b>	NeulNET	Neul	470 MHz - 790 MHz	10 km	Hasta 16 Mbps	100 ms	Saca el mejor provecho del espectro de espacio blanco de TV (TVWS).
<b>LoRaWAN</b>	LoRa Technology	LoRaWAN	Varias. (868 MHz / 433 MHz / 915 MHz / 430 MHz)	2-5 km (urban) 15 km (suburban)	0.3 - 50 kbps	Varias. ~1-2s	De muy bajo consumo (LPWAN). Posee distintas clases en las que varía la velocidad de configuración y bandas de operación. Normalmente todos los dispositivos son Clase A.

La tecnología a utilizar para el desarrollo del sistema de comunicación inalámbrica que tiene el prototipo de monitoreo de la calidad del aire según la Tabla 1.4 es el protocolo ZigBee, ya que está orientado hacia aplicaciones de monitoreo remoto, el alcance que ofrece cubre la distancia que habrá entre el punto de medición y el centro de recepción de datos, posee un bajo consumo de energía y una tasa de datos adecuada para esta aplicación. De igual modo, posee una topología que permite que el sistema sea escalable para la interconexión de más estaciones de monitoreo que permitan la creación de un mapa de la contaminación del aire, si en un futuro así se requiriera. Existen muchos módulos de comunicación inalámbrica disponibles en el mercado que trabajan bajo este estándar, y algunos poseen un rango de cobertura de hasta 45 km en línea de vista si éstos cuentan con una antena de ganancia alta.

## 1.5 Interfaz gráfica

La Universidad de Sevilla explica que una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) es un método para facilitar la interacción del usuario con la computadora a través de la utilización de un conjunto de imágenes y objetos pictóricos (botones, íconos, ventanas, entre otros) además de texto. Surge como evolución de la línea de comandos de los primeros sistemas operativos y una de sus principales ventajas es que ofrece un entorno gráfico sencillo para su aprendizaje y uso.

Existen muchas opciones en cuanto a programas que ofrecen un entorno para el desarrollo de estas interfaces gráficas. La elección del software a utilizar depende de la aplicación para la cual se desarrollará, del sistema operativo en el que se utilizará (Windows, Linux, Mac, Android, entre otros), así como también del lenguaje de programación que se emplea para su diseño. Cabe destacar que algunas de estas herramientas de desarrollo son software libre es decir no se requiere de ninguna suscripción para poder hacer uso de ella, mientras que otras si requieren de la adquisición de una licencia para poder utilizar sus recursos y

herramientas. Por tal razón, en el desarrollo de este prototipo se hizo uso de una herramienta de software libre con el propósito de minimizar la inversión requerida. Una de las herramientas más conocidas y fáciles de usar es Visual Studio Community, de la cual se hablará en la sección 1.5.1.

### 1.5.1 Visual Studio Community

Halvorsen (2016) define el software Microsoft Visual Studio como un entorno de desarrollo integrado (IDE) de Microsoft. Esta herramienta puede utilizarse para desarrollar aplicaciones de consola y de interfaz gráfica de usuario, aplicaciones de Windows Forms, sitios web, aplicaciones web y servicios web tanto en código nativo como en código administrado para todas las plataformas compatibles con Microsoft Windows, Windows Phone, Windows CE, .NET Framework, .NET Compact Framework y Microsoft Silverlight.

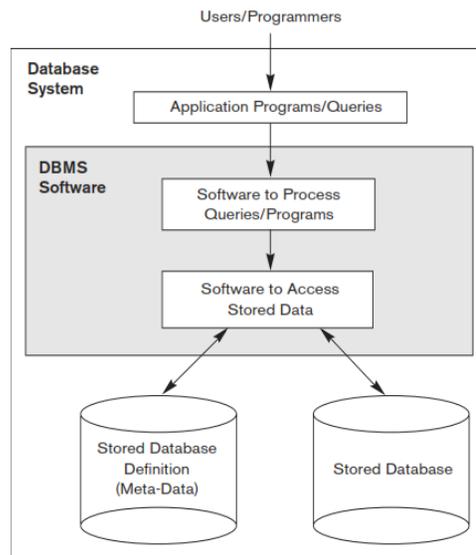
Este software soporta múltiples lenguajes de programación (C++, Visual Basic, Python, entre otros), pero uno de los más utilizados es C#, el cual es un lenguaje de programación orientado a objetos y parte de la familia .NET de Microsoft. C# es muy similar a C++ y Java, pero difieren un poco en su sintaxis en las tecnologías que emplean para compilar sus programas. C# es desarrollado por Microsoft y funciona sólo en la plataforma Windows.

Con el objetivo de reducir los costos de implementación del prototipo se decidió utilizar Visual Studio Community (versión gratuita) para desarrollar la interfaz gráfica donde se muestran y almacenan los datos, ya que cuenta con los recursos necesarios para poder realizar esta tarea. Otro hecho importante sobre la elección de este software es que se programa empleando el lenguaje de programación C#, el cual es uno de los más utilizados para el diseño de aplicaciones embebidas y existe una gran cantidad de información disponible sobre cómo utilizar este lenguaje.

## 1.6 Base de datos

Elmasri y B. Navathe (2011) explican que una base de datos es una colección de datos relacionados, los cuales son elementos conocidos que pueden ser almacenados y tienen un significado implícito. Toda base de datos posee una fuente de donde el dato es proporcionado, cierto grado de interacción con eventos en el mundo real, y un grupo de personas interesadas en el contenido de la base de datos llamado audiencia. La información en la base de datos puede cambiar por acciones del usuario final o por eventos que puedan suceder.

Las bases de datos pueden ser generadas y mantenidas manualmente o de manera computarizada. Cuando éstas son computarizadas, se debe hacer uso de un sistema de administración de base de datos, para que puedan ser creadas y mantenidas. Un sistema de administración de base de datos (DBMS, por sus siglas en inglés), es un conjunto de programas que permite al usuario crear y darle mantenimiento a una base de datos y realizar una serie de funciones como definir, construir, manipular y compartir bases de datos con más usuarios y aplicaciones. Para poder acceder a la base de datos se necesita de una aplicación de programa que pregunte o solicite un dato al DBMS. La figura 1.6 ilustra lo anteriormente descrito.



**Figura 1.6: Ambiente del sistema de administración de base de datos simplificado. Tomado de Elmasri y B. Navathe (2011).**

### 1.6.1 MySQL Community

Según su manual de referencia, MySQL es el sistema de administración de base de datos de código abierto SQL más popular, y es desarrollado, distribuido y soportado por Corporación Oracle. Las bases de datos de este programa almacenan datos en tablas separadas en vez de poner todos los datos en un sólo archivo de almacenamiento. Su modelo lógico con estructuras, tales como esquemas o bases de datos, tablas, columnas, índices y filas ofrecen un ambiente de programación flexible. Este software hace que se cumplan las reglas que gobiernan la relación entre los diferentes campos de datos evitando así que se presenten ciertas inconsistencias tales como datos faltantes, repetidos, o desactualizados.

Este software emplea el lenguaje de consulta estructurada (SQL, por sus siglas en inglés), el cual es el lenguaje estructurado usado más comúnmente para acceder a bases de datos. Dependiendo del ambiente de programación uno puede entrar directamente a SQL, introducir comandos SQL en un código escrito en otro lenguaje o usar un lenguaje específico API que oculte la sintaxis SQL. Este software también posee una librería multihilo embebida que puede añadirse a cierta aplicación para obtener un producto independiente más pequeño, más rápido y más fácil de administrar, como en el caso del trabajo desarrollado.

En este trabajo monográfico se utilizó una base de datos para almacenar todas las mediciones realizadas de gases contaminantes del aire a través de una interfaz gráfica desarrollada en Visual Studio Community. A través de esta interfaz se puede interactuar con el software MySQL Community que cumple las funciones de DBMS, ya que este software ofrece la ventaja de interactuar con otros ambientes de desarrollo para poder acceder al contenido de la información del entorno de la base de datos y también es de uso libre, permitiendo así reducir los costos del desarrollo del prototipo.

## 1.7 Unidad de almacenamiento de respaldo

Una tarjeta de memoria según Ibrahim (2010) es un dispositivo electrónico de estado sólido para el almacenamiento de datos. Estas tarjetas pueden guardar datos, aunque ya se hayan desconectado de su fuente de voltaje. Esta habilidad para retener datos las hace útiles en una variedad de aplicaciones industriales y de electrónica de consumo como por ejemplo cámaras digitales, teléfonos móviles, sistemas de posicionamiento global, reproductores MP3, computadoras embebidas, productos de redes, sistemas militares, dispositivos de comunicación y productos médicos.

Estas tarjetas están basadas en dos tecnologías las cuales son NOR y NAND. La primera de éstas proporciona capacidades de acceso aleatorio de alta velocidad, donde el dato si es tan pequeño como un sólo byte, puede ser recuperado. Las tarjetas de memoria basadas en esta tecnología son a menudo encontradas en teléfonos móviles, asistentes digitales personales y computadoras. Por su parte, la tecnología NAND permite acceso secuencial a un dato en páginas únicas, pero no permite recuperar únicos bytes de datos como la tecnología NOR. Las tarjetas de memoria basadas en esta tecnología se encuentran en teléfonos móviles, cámaras digitales, dispositivos de audio y video, y otros dispositivos donde los datos se escriben y leen de manera secuencial. Existen varios tipos de tarjetas de memoria disponibles en el mercado, pero las más comunes para sistemas embebidos son las memorias MMC y las memorias SD.

- **Tarjetas Multimedia** (MMC, por sus siglas en inglés): éstas fueron usadas inicialmente en teléfonos móviles y radiolocalizadores, pero hoy en día se usan en muchos dispositivos electrónicos. Son compatibles con tarjetas SD y pueden caber en slots de memoria SD.

Estas tarjetas operan a un voltaje de 3.3 V y la tasa de transferencia de datos es de aproximadamente 2.5 MB/s. Se encuentran disponibles en capacidades

hasta 4 GB. Existen nuevas versiones de este tipo que trabajan con un voltaje más bajo, reduciendo así el consumo de energía en dispositivos portátiles.

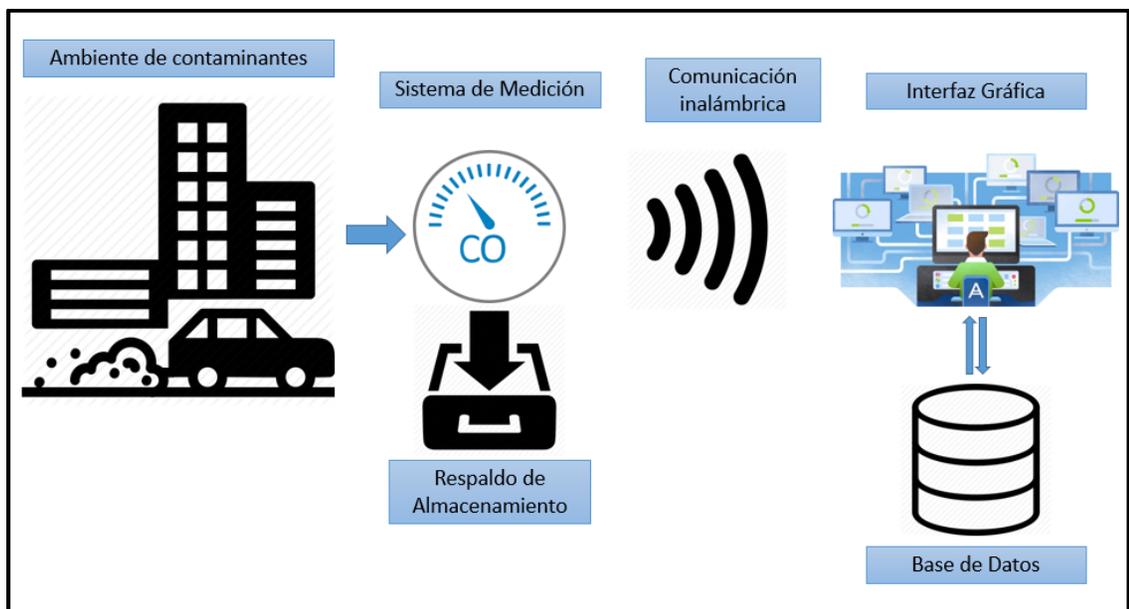
- **Tarjetas SD:** Son las tarjetas de memoria más usadas en la actualidad. Éstas se encuentran en muchos dispositivos portátiles como cámaras digitales, teléfonos móviles, receptores GPS, consolas de video juego, etc. Tienen capacidades de almacenamiento desde 4MB hasta 4 GB, aunque sus nuevas versiones tienen capacidades desde 4 GB hasta 32 GB. Su grosor es mayor que el de las tarjetas MMC por lo que no caben en sus respectivos slots y la estructura interna de sus registros es distinta. También están disponibles en tres diferentes tamaños: estándar, mini y micro.

Para el desarrollo de este prototipo se utilizó una tarjeta SD de 4 GB de capacidad para almacenar los resultados de las mediciones realizadas con su respectiva fecha y hora. Éstas se guardan en un archivo .txt, el cual puede recuperarse fácilmente al insertar la tarjeta de memoria en una computadora personal. Se decidió utilizar esta tarjeta debido a la facilidad que se ofrece para extraer la información almacenada ya que este dispositivo de almacenamiento interactúa con equipos de uso común tal como laptops, tablets y teléfonos celulares.

# Capítulo II: Diseño e Implementación del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire

## 2 Modelo del sistema de monitoreo de calidad del aire

En este capítulo se contemplan todos los aspectos relacionados con el desarrollo de los subsistemas que conforman el sistema de monitoreo remoto inalámbrico y en tiempo real de dos contaminantes de calidad del aire. La figura 2.1 muestra el modelo del sistema de monitoreo implementado.



**Figura 2.1: Sistema de monitoreo de calidad del aire implementado.**

De acuerdo a la figura interior, el sistema funciona de la siguiente manera: primeramente, el sistema de medición capta las concentraciones de los gases monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno en el ambiente, los resultados de estas mediciones se muestran en el nodo sensor en una pantalla LCD con su correspondiente hora y fecha. Después, los valores de los niveles de concentración de los gases son enviados inalámbricamente hacia una interfaz gráfica en una computadora donde se observa el comportamiento en tiempo real de los gases medidos. Esta interfaz gráfica también permite que los datos

recibidos por el nodo sensor se almacenen en una base de datos creada en MySQL Community.

## **2.1 Determinación de los componentes del sistema de monitoreo.**

En esta sección se describen los criterios tomados en consideración para la elección de los componentes que integran el prototipo desarrollado en este trabajo monográfico, puesto que la revisión de literatura llevada a cabo muestra que existen diversas tecnologías para el desarrollo de un sistema de monitoreo de calidad del aire. Dentro de los criterios más relevantes se encuentran la escalabilidad que las tecnologías seleccionadas pueden proporcionar al sistema, su efectividad, su bajo costo, entre otros.

### **2.1.1 Determinación de sensores**

Para el monitoreo de gases, los tres tipos de sensores más utilizados son los electroquímicos, de estado sólido y los catalíticos. El uso de éstos depende del tipo de gas a medir, pues existen dos categorías de gases las cuales son: combustibles y tóxicos. La característica principal que determina de qué clase es el gas a monitorear es el rango de concentración de interés. Altas concentraciones implican que los gases son combustibles y bajas concentraciones se refiere a que éstos son tóxicos. Los gases que degradan la calidad del aire son los tóxicos y los sensores que se utilizan para medir éstos son los electroquímicos y los de estado sólido.

Los sensores de estado sólido consumen mucha energía para operar, tienen una alta expectativa de vida, es decir, pueden estar en funcionamiento durante varios años. Éstos son capaces de medir hasta 150 tipos de gases de forma individual, y son útiles tanto para altas concentraciones como para bajas concentraciones, o sea, son útiles para gases tóxicos y combustibles. Éstos también son muy susceptibles a condiciones al aire libre tales como la humedad, afectando así la confiabilidad de sus mediciones.

Por otra parte, los sensores electroquímicos consumen poca energía para operar, son bastante selectivos al gas a medir, son capaces de medir hasta 20 tipos de gases de forma individual, dentro de los cuales se encuentran los contaminantes de interés, y su señal de salida es proporcional a la concentración actual del gas medido. Además, éstos no se ven afectados por condiciones exteriores como, por ejemplo, la humedad.

Para el desarrollo del sistema de medición, los sensores seleccionados debían cumplir con las siguientes características:

- Consumir poca energía.
- Ofrecer una exactitud aceptable.
- Ser lineales.
- Fáciles de usar.
- Ser selectivos al gas a medir.
- Medir bajas concentraciones de los gases.

Los sensores electroquímicos fueron los seleccionados para la medición de gases, dado que cumplen con todos los criterios establecidos.

Comercialmente existen una gran cantidad de opciones de sensores electroquímicos para un sólo gas. Existen un sinnúmero de empresas que se dedican a la producción de sensores electroquímicos, dentro de las cuales se encuentran Alphasense, EuroGas, Honeywell, entre otras. Los sensores que éstos ofrecen se diferencian de acuerdo a ciertos parámetros tales como: rango de medición, tiempo de respuesta, sensibilidad y resolución.

Para la medición de los gases monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno se seleccionaron los sensores 4-CO-500 y 4-NO<sub>2</sub>-20 ambos de la empresa Honeywell. Estos se seleccionaron debido a que abarcan el rango de medición de los gases a medir (0-20 ppm para NO<sub>2</sub> y 0-500 ppm para CO) establecido en la norma técnica nicaragüense de calidad del aire (detallado en la sección 1.1.3),

poseen la resolución adecuada (1 ppm), cuentan con componentes en el mercado que permiten realizar su correcto acondicionamiento de señal (AFE LMP91000, del que se hablará más adelante) y de acuerdo a la revisión de literatura son ampliamente utilizados por los equipos monitores de gases disponibles en el mercado tales como los que ofrece la compañía Libelium de España.

En las figuras 2.2 y 2.3, respectivamente, se observa una vista general de los sensores y se describen sus principales características de desempeño.

Características de desempeño de sensor 4CO-500:

- Rango nominal: 0-500 ppm.
- Sobrecarga máxima: 2000 ppm.
- Tiempo de respuesta  $\leq 30$  Seg.
- Sensibilidad:  $70 \pm 15$  nA/ppm.



**Figura 2.2: Vista general de sensor 4CO-500.**

Características de desempeño de sensor 4NO<sub>2</sub>-20:

- Rango nominal: 0-20 ppm.
- Sobrecarga máxima: 250 ppm.
- Tiempo de respuesta  $\leq 30$  Seg.
- Sensibilidad:  $600 \pm 150$  nA/ppm

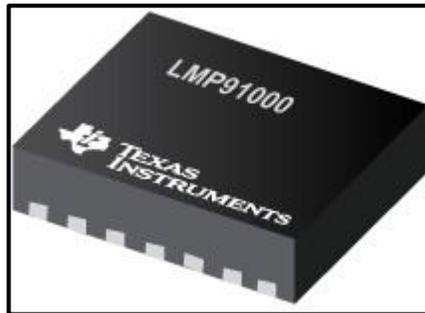


**Figura 2.3: Vista general de sensor 4NO<sub>2</sub>-20.**

### 2.1.2 Acondicionamiento de señal

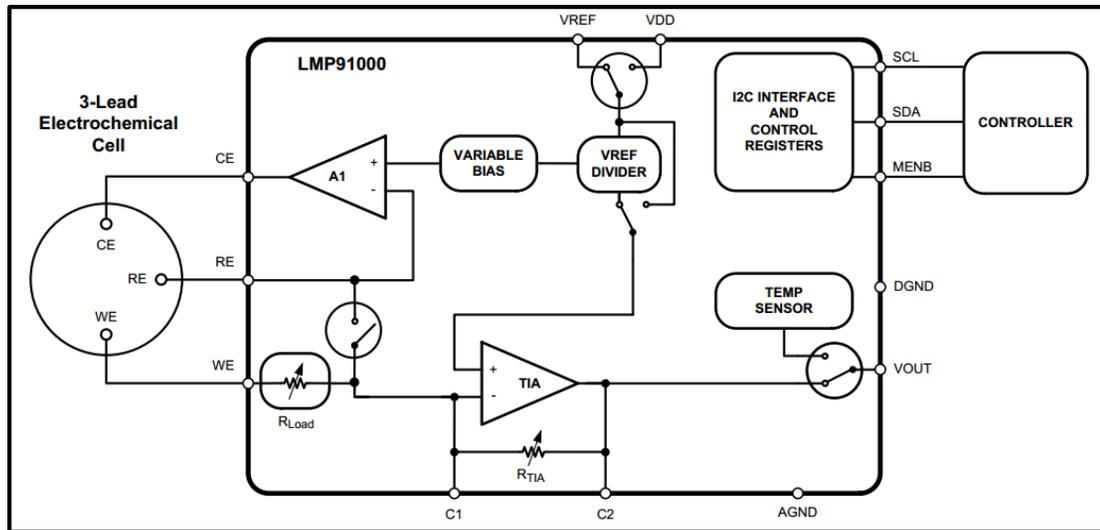
Para el acondicionamiento de señal de la salida de estos sensores electroquímicos se utilizó el circuito integrado programable AFE LMP91000, diseñado específicamente para ofrecer una interfaz entre un sensor electroquímico y un microcontrolador. Éste genera una salida de voltaje

proporcional a la señal de salida del sensor, la cual es más adecuada para su procesamiento posterior. La figura 2.4 muestra el empaquetado de dimensiones muy pequeñas (WSON, por sus siglas en inglés) de este circuito integrado, el cual posee un tamaño de apenas 4mm x 4mm y sus pines se encuentran por debajo del integrado. Esto dificultó bastante su uso debido a que no se contaban con los equipos necesarios para manipularlo adecuadamente.



**Figura 2.4:** AFE LMP91000 para aplicaciones de sensores de bajo consumo de energía. Obtenido de Texas Instruments (2016).

Este AFE está diseñado para sensores de gases de tres electrodos y sensores de celdas galvánicas de dos electrodos. Éste proporciona toda la funcionalidad para detectar cambios en la concentración de gases basada en la corriente generada en el electrodo de trabajo. También posee una ganancia de amplificación que puede ser configurada por el usuario a través de la interfaz I<sup>2</sup>C, y ésta varía entre valores de 2.75 k $\Omega$  y 350 k $\Omega$ . Así, se pueden convertir señales de corriente desde 5 hasta 750 microamperios. La figura 2.5 muestra el diagrama funcional de este circuito integrado con sus componentes internos y su conexión con el microcontrolador y el sensor electroquímico.



**Figura 2.5: Diagrama de bloques funcional del AFE LMP91000. Obtenido de Texas Instruments (2016).**

Internamente el circuito funciona de la siguiente manera: un amplificador de entrada diferencial es usado para comparar la tensión entre el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo con un voltaje de polarización de trabajo requerido (éste es configurado por el bloque 'Variable Bias'). Luego la señal de error es aplicada al electrodo contador (a través del amplificador de control A1). De esta manera cualquier cambio en la impedancia entre los electrodos de trabajo y de referencia provocará un cambio en el voltaje aplicado al contra electrodo, manteniendo así un voltaje constante entre los electrodos de trabajo y referencia. En la otra etapa, el electrodo de trabajo también es conectado a la entrada inversora de un amplificador de transimpedancia, para poder producir una salida de voltaje proporcional a la celda de corriente.

La ecuación para convertir la corriente de salida del sensor en voltaje es la siguiente:

$$V_{out} = V_{REF} - R_{TIA} * I_{WE} \quad (Ec. 2.1)$$

Donde:

$V_{out}$ : Voltaje de Salida del AFE.

$V_{REF}$ : Voltaje en el pin no inversor del amplificador de transimpedancia.

$R_{TIA}$  : Resistencia interna de ganancia programable del amplificador de transimpedancia.

$I_{WE}$ : Corriente generada en el electrodo contador del sensor.

La figura 2.6 muestra el circuito impreso que se desarrolló para poder interconectar el AFE LMP91000 con los sensores electroquímicos y con los otros componentes del sistema en tabla de nodos para la etapa de pruebas de diseño.



**Figura 2.6: PCB implementada para el AFE LMP91000 con y sin el sensor electroquímico. (Fotografía).**

### 2.1.3 Determinación del microcontrolador

El microcontrolador es el dispositivo que se encarga de procesar los datos generados por los elementos sensores y sus respectivos circuitos acondicionadores de señal. Realiza las operaciones matemáticas para obtener el valor de las concentraciones de los gases medidos, permite configurar los registros de los otros elementos del sistema e intercambiar información con éstos vía protocolos seriales I<sup>2</sup>C y SPI. Éste también envía los resultados obtenidos, empleando el protocolo RS-232, hacia los módulos de comunicación para su posterior transmisión hacia la interfaz gráfica del sistema. En el mercado existe

una amplia variedad de microcontroladores de distintas compañías, cuyos modelos se diferencian por su costo y funciones especiales. Por lo tanto, hubo varias alternativas para la selección del microcontrolador, y éstas debían ofrecer una buena capacidad de procesamiento y un bajo consumo de energía a un precio moderado.

La empresa Microchip, una de las marcas más reconocidas en el suministro de microcontroladores para el desarrollo de sistemas embebidos, posee varias familias de microcontroladores, dentro de las cuales se encuentra la familia PIC18(L)F2X/4XK22, que cumple con los requerimientos necesarios para la implementación del sistema (ver tabla 2.1). Específicamente se seleccionó el PIC 18F45K22, que cuenta con dos módulos de puertos seriales síncronos maestros (MSSP, por sus siglas en inglés) que permiten configurar los registros del circuito acondicionador de señal AFE vía I<sup>2</sup>C, escribir y leer información en el módulo RTC y en la memoria SD a través de SPI, y enviar los datos vía RS-232 a los módulos XBee. Las características que incorpora este microcontrolador permiten reducir el consumo de energía durante su operación y cuenta con la cantidad suficiente de entradas analógicas para añadir más sensores de gases contaminantes en el futuro. Este dispositivo también se encuentra disponible en el software Proteus, lo que permite realizar las simulaciones de los subsistemas y del sistema a nivel general para corregir errores antes de la implementación física de éstos.

**Tabla 2.1:** *Recursos demandados del microcontrolador a utilizar*

<b>Características del microcontrolador a utilizar</b>
Comunicación I <sup>2</sup> C
Comunicación SPI
Comunicación UART
7 entradas analógicas

11 I/O digitales
Oscilador interno
Bajo consumo de energía
Buen tamaño de memoria

#### 2.1.4 Comunicación inalámbrica

Los módulos de comunicación inalámbrica que se utilizaron son los XBee de la empresa Digi. Existen diversos tipos de módulos que se diferencian por el tipo de familia (serie 1, 2, 900, entre otras), pero siempre mantienen la misma asignación de pines. Las líneas de alimentación, y las de transmisión/recepción son las mismas para todos los módulos, lo que los hace ser intercambiables entre ellos mismos, permitiendo así, por ejemplo, reemplazar dispositivos instalados previamente en un sistema con otro de mejores características.

Los módulos XBee y XBee-Pro son soluciones embebidas que proporcionan conectividad inalámbrica de punto final a los dispositivos. Éstos usan el protocolo de red IEEE 802.15.4 para redes rápidas punto-multipunto o punto a punto, están diseñados para aplicaciones de alto rendimiento, y requieren baja latencia y sincronización de comunicación predecible. XBee es la propia versión del protocolo ZigBee de DIGI, y cubre las necesidades de redes de sensores inalámbricas de bajo costo y bajo consumo de energía, y garantiza una entrega de datos confiable entre dispositivos.

Específicamente, el módulo XBee que se utilizó fue el XBee-Pro Serie 1 (802.15.4), el cual es el módulo más popular de Digi que opera dentro de la banda de frecuencias de 2.4 GHz. Los módulos Pro tienen la misma asignación de pines y set de comandos que los módulos básicos, pero posee un incremento de potencia de salida de 60 mW. Estos módulos permiten una comunicación simple y confiable entre microcontroladores, computadoras, sistemas o cualquier otro

dispositivo con un puerto serial. En la figura 2.7 se puede apreciar como luce este módulo y sus características principales:

Características de desempeño del módulo XBee-Pro S1:

- Voltaje de Operación: 3.3 V.
- Máxima transferencia de datos: 250 kbps.
- Potencia de Salida: 60 mW (+18dBm).
- Rango: 1500 m línea de vista.
- Set de comandos AT o API.



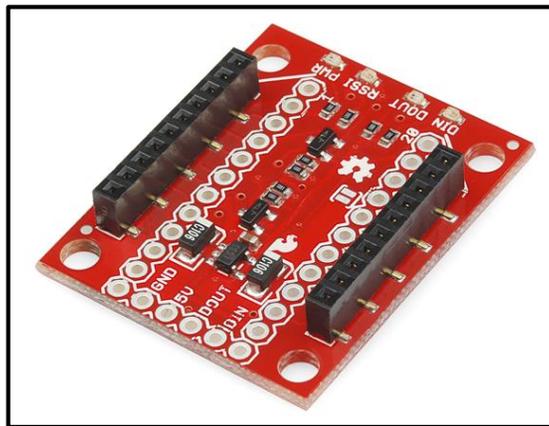
*Figura 2.7: Vista general del módulo XBee-PRO Series 1*

Los módulos XBee pueden trabajar en dos modos de operación, los cuales son los siguientes:

- **Modo transparente:** es el modo por defecto en el que opera el dispositivo. Cuando el módulo trabaja en este modo el dispositivo actúa como un cable físico serial. Todos los datos provenientes del puerto UART del microcontrolador son recibidos a través del pin DI y son puestos en cola para transmisión por RF. Cuando el dato RF es recibido, éste se envía a través del pin DO.
- **Modo API:** La operación de los dispositivos en modo API le permite a una aplicación de host interactuar con las capacidades de red del módulo. En este modo de operación, todos los datos que entran y salen del módulo son contenidos en segmentos que definen operaciones o eventos dentro del módulo.

Para poder utilizar estos módulos se hizo uso de otros elementos auxiliares necesarios para que pudieran interactuar con el resto del sistema y para que se pudiera realizar la configuración de su modo de funcionamiento utilizando el software XCTU.

El primer dispositivo es el XBee Explorer Regulated que se encarga de garantizar los 3.3 V con los que trabaja el XBee y los indicadores de actividades básicas (Encendido, LEDs de actividad en los pines DIN/DOUT). Convierte las señales seriales de 5 V a 3.3 V para poder conectar un sistema con voltaje de operación de 5 V a cualquier módulo XBee, ya que esta unidad trabaja perfectamente con todos los módulos XBee incluyendo las series 1 y 2, y las versiones estándares y Pro. Este dispositivo contiene un socket para módulos XBee, cuatro LEDs, y un desplazador de niveles de voltaje. La figura 2.8 muestra el dispositivo descrito anteriormente.

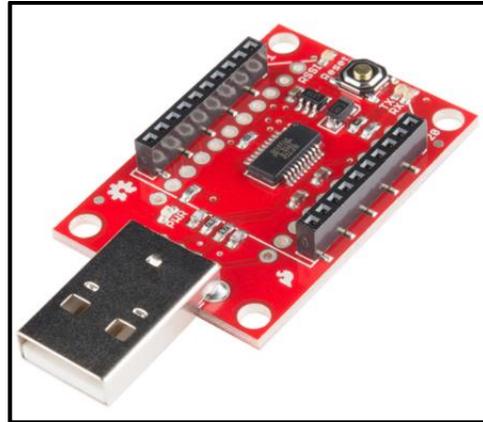


**Figura 2.8: XBee Explorer Regulated. Obtenido de SparkFun Electronics.**

El otro dispositivo que se utilizó fue el XBee Explorer Dongle que permitió conectar el módulo XBee directamente a un puerto USB, actuando como Gateway entre una computadora y el XBee. De igual forma que el módulo anterior, éste es compatible con todos los módulos XBees incluyendo las series 1 y 2, y las versiones estándares y Pro.

Esta tarjeta posee un convertidor de datos USB a TTL que traduce los datos entre la computadora y el módulo XBee. Posee un botón de reinicio, y un regulador de voltaje para alimentar el XBee con suficiente energía y, además, contiene cuatro leds que actúan como indicadores de encendido, transmisión y recepción

de datos, ayudando de esta manera a identificar y corregir errores. La figura 2.9 ilustra este dispositivo.



**Figura 2.9: XBee Explorer Dongle. Obtenido de SparkFun Electronics.**

## 2.2 Modelo del subsistema de medición

El subsistema de medición es el que se encarga de obtener los valores de los niveles de concentración de los gases contaminantes. Este bloque es donde el comportamiento de los gases es captado por los sensores específicos y luego la señal generada por éstos se transforma en una forma de señal más apropiada para su posterior procesamiento en el microcontrolador.

Los elementos que interactúan con el medio ambiente son los sensores electroquímicos correspondientes a cada gas a medir (CO y NO<sub>2</sub>). La salida de éstos se produce en el electrodo de trabajo, y es una señal de corriente en el orden de los microamperios (µA). La cantidad de corriente que fluye por este electrodo está en dependencia de los valores de las concentraciones y de la sensibilidad de los sensores. La relación entre la cantidad de partes por millón y la salida del sensor de cada gas se define mediante las siguientes ecuaciones:

- Para el sensor 4CO-500 para el monóxido de carbono:

$$N_{ppm} = \frac{I_{WE}}{0.070 \mu A/ppm} \quad (Ec. 2.2)$$

➤ Para el sensor 4NO<sub>2</sub>-20 que mide dióxido de nitrógeno:

$$N_{ppm} = \frac{I_{WE}}{0.60 \mu A/ppm} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

$I_{WE}$ : Corriente en el electrodo de trabajo.

$N_{ppm}$ : Cantidad de partes por millón del gas contaminante presente en el ambiente.

Así mediante estas ecuaciones se puede determinar las concentraciones de los gases al conocer la corriente de salida del sensor.

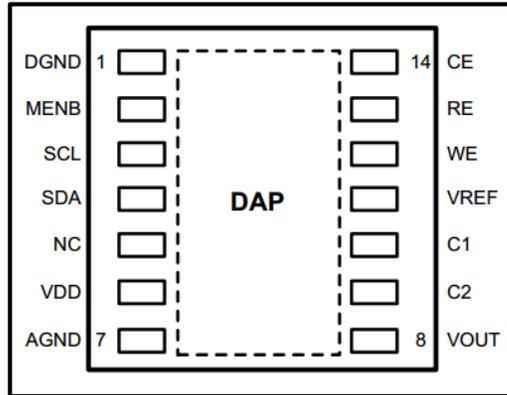
El segundo elemento de este subsistema es el circuito integrado AFE LMP91000, que actúa como elemento acondicionador de señal. La función de éste es generar una señal de voltaje proporcional a la corriente que circula por el electrodo de trabajo del sensor. Este elemento también se encarga de mantener una relación propia entre el electrodo de trabajo y el contra electrodo.

El AFE LMP91000 posee registros internos, los cuales deben configurarse para poder funcionar correctamente con el sensor electroquímico con el que se desea trabajar. La configuración de estos registros se realiza vía I<sup>2</sup>C, lo que permite añadir más AFES sin tener que aumentar la cantidad de interconexiones físicas en el sistema. Este dispositivo también puede funcionar en 6 modos distintos para poder optimizar el consumo de corriente de energía y conocer las necesidades de la aplicación. La selección del modo de operación de igual forma se realiza a través de la interfaz I<sup>2</sup>C.

La interfaz I<sup>2</sup>C en la que opera el AFE es en el modo estándar (100 kHz). Éste viene con una dirección de bus fija de 7 bits, la cual es:

1	0	0	1	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---

Esta dirección de bus fija es única para todos los AFEs. Sin embargo, se pueden conectar más de un LMP91000 al bus I<sup>2</sup>C y comunicarse con cada dispositivo usando el pin MENB (ver figura 2.10). Este pin simplemente habilita/deshabilita al dispositivo para comunicarse vía I<sup>2</sup>C con el microcontrolador. El pin MENB tiene que estar en nivel lógico bajo para poder habilitar la comunicación I<sup>2</sup>C, de lo contrario, esta comunicación no puede darse.



**Figura 2.10: Asignación de pines de LMP91000. Tomado de <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp91000.pdf>**

Los registros de configuración principales son 5 y sus nombres, direcciones, y configuraciones por defecto se muestran en la tabla 2.2:

**Tabla 2.2: Descripción de los registros internos del AFE LMP91000.**

Dirección	Nombre	Configuración por defecto	Acceso	Bloqueable
0x00	STATUS	0X00	Solo lectura	No
0x01	LOCK	0X01	Lectura/ Escritura	No
0x10	TIACN	0X03	Lectura/ Escritura	Sí
0x11	REFCN	0X20	Lectura/ Escritura	Sí

0x12	MODECN	0X00	Lectura/ Escritura	No
------	--------	------	-----------------------	----

Cada uno de estos registros consta de un byte, el registro STATUS se lee para determinar si el AFE está listo para leer comandos I<sup>2</sup>C, los registros LOCK, REFCN y MODECN se configuran con los mismos valores para ambos sensores a utilizar. Estos valores son los siguientes:

➤ **Registro LOCK**

	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Binario	0	0	0	0	0	0	0	0
Hexadecimal	0				0			

Los bits [7:1] son reservados y se configuran con el valor cero, mientras que el bit 0 se configura a 0 para poder modificar el contenido de los registros TIACN y REFCN.

➤ **Registro REFCN**

	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Binario	1	0	0	1	0	0	0	0
Hexadecimal	9				0			

Este registro permite la configuración del cero interno del amplificador de transimpedancia, y de las fuentes de polarización y de referencia del LMP91000. En este caso se utilizó un voltaje de referencia externo por lo cual se configuró el bit 7 a 1. Los bits [6:5] se configuraron a 00 para que el voltaje interno cero fuera un 20% del voltaje de referencia externo (4 V en este caso). El bit 4 de éste se puso a un valor 1 para utilizar una polarización positiva al comparar la tensión entre el electrodo de trabajo y de referencia, o sea  $(V_{WE} - V_{RE}) > 0$ . El resto de los bits [3:0] se configuró a 0000 para establecer el voltaje de referencia a 0 V.

➤ **Registro MODECN**

	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Binario	0	0	0	0	0	0	1	1
Hexadecimal	0				3			

El bit 7 de este registro indica si los electrodos de referencia y de trabajo se han cortocircuitado o no. Éste debe establecerse a 0 para deshabilitar esta opción. Los bits [6:3] son reservados, por lo que se configuran a cero. Los bits [2:0] por su parte determinan el modo de funcionamiento, y éstos, se configuran con los valores 011 para que el AFE pueda funcionar en modo celda amperimétrica de 3 electrodos.

El último registro que se configuró fue el TIACN, este permite seleccionar la ganancia del amplificador de transimpedancia del AFE y la resistencia de carga de los sensores. Este registro se configuró de la siguiente manera:

➤ **Registro TIACN**

Para el sensor 4CO-500:

	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Binario	0	0	0	1	1	0	0	0
Hexadecimal	1				8			

Para el sensor 4NO<sub>2</sub>-20:

	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Binario	0	0	0	1	1	1	0	0
Hexadecimal	1				C			

La configuración de los bits [4:2] establecen la ganancia interna del amplificador de transimpedancia que se encarga de convertir la señal de corriente del sensor en una señal de voltaje y éstos se configuraron a 110 para obtener una ganancia de 120 K $\Omega$  en el caso del sensor 4CO-500. Para el caso del sensor 4NO<sub>2</sub>-20 los bits se establecieron al valor 111 para una ganancia de 350 K $\Omega$ . Los

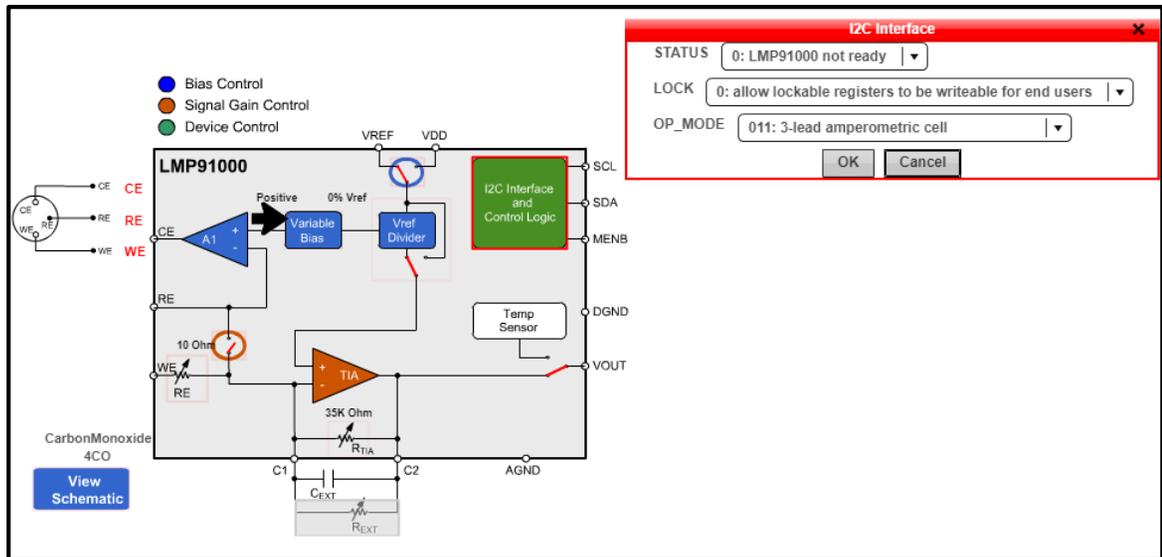
bits [1:0] corresponden al valor de la resistencia de carga interna, y para ambos AFEs se configuraron a 00 para un valor de 10  $\Omega$ .

La configuración de estos registros se realizó con ayuda de la herramienta WeBench Designer que ofrece Texas Instruments en su página web oficial. Esta herramienta facilita la configuración interna de los registros del AFE para una variedad de sensores electroquímicos con las que los diseñadores del AFE realizaron sus respectivas pruebas. Dentro de estos sensores, se encuentran los que se usaron en este prototipo de monitoreo de calidad del aire. (Ver figura 2.11).

Part Number	Custom	Sensitivity_(nA/ppm)	Full_Scale_Range_(ppm)	Zero_Level_(nA)	Bias_Voltage_(mV)	Rload_(Ohm)	Capacitance(arad)
CO-CE	NO	16	10000	0	0	10	0.15
CO-CF	NO	72.5	5000	0	0	10	0.15
CO-CX	NO	72.5	2000	0	0	10	0.15
CO-D4	NO	39	1000	0	0	10	0.15
Microcell500	NO	95	500	0	0	10	0.15
2CF	NO	50	500	0	0	10	0.15
4CF	NO	70	500	0	0	10	0.15
4CF+	NO	70	500	0	0	10	0.15
<b>4CO</b>	<b>NO</b>	<b>70</b>	<b>500</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>0.15</b>
4COSH CO	NO	80	500	0	0	10	0.15
4COSH H2S	NO	750	200	0	0	10	0.15
7E	NO	100	1000	0	0	10	0.15
9CF	NO	50	50	0	0	10	0.15
CO2E300	NO	30	300	0	0	0	0.15

**Figura 2.11: Selección de sensores en herramienta Webench Designer. (Captura de pantalla).**

La figura 2.12 muestra la ventana de interacción del software Webench Designer. Ésta contiene el esquemático del AFE, donde al presionar los bloques se abre un cuadro que se aprecia en la parte superior derecha de la figura, el cual contiene los valores a los que deben configurarse los registros. En este caso la figura muestra los datos correspondientes al AFE que trabaja con el sensor de monóxido de carbono 4CO-500.



**Figura 2.12: Configuración de registros del AFE LMP91000 para sensor 4CO-500. (Captura de pantalla).**

El tercer elemento más importante de este subsistema es el microcontrolador. La función de éste es tomar las señales analógicas de voltaje proporcionadas por el AFE y calcular la cantidad de partes por millón (ppm) correspondientes al voltaje del AFE.

Para poder realizar esta tarea el microcontrolador tiene que, primeramente, configurar los registros internos del AFE vía I<sup>2</sup>C. Luego, para poder trabajar con las señales proporcionadas por el AFE, éstas se convierten en señales digitales a través del módulo convertidor analógico-digital que el microcontrolador posee internamente. Este módulo cuenta con una resolución de 10 bits, lo que significa que las señales analógicas pueden tomar valores numéricos digitales desde 0000000000 (0) hasta 1111111111 (1023).

Después que el ADC interno del PIC digitaliza las señales de salida del AFE, el microcontrolador realiza los cálculos necesarios para poder determinar las concentraciones de los gases. Mediante una regla de tres se determinó una ecuación que permite conocer el equivalente de la señal digital de salida del ADC en voltaje. Asumiendo que el valor máximo del ADC (1023), corresponde al voltaje

de referencia máximo que el convertidor puede manejar (2.33 V, en este caso), a cuánto equivaldría un valor digital “x” en voltios. Esto es:

Si

$$2.33 V \rightarrow 1024$$

$$V_{out} \rightarrow R_{adc}$$

Despejando  $V_{out}$  se obtiene:

$$V_{out} = (2.33 V) \left( \frac{R_{adc}}{1023} \right) \quad (Ec. 2.4)$$

Donde:

$V_{out}$ : Voltaje de salida del AFE.

$R_{adc}$ : Señal de salida digital del ADC

Luego para poder determinar la concentración de los gases en función de la señal proporcionada por el AFE se tiene que el número de partes por millón en general es:

$$N_{ppm} = \frac{I_{WE}}{x} \quad (Ec. 2.5)$$

Donde:

$x$ : Sensibilidad de los sensores

Despejando  $I_{WE}$  de la ecuación 2.1 se tiene que:

$$I_{WE} = \frac{V_{REF} - V_{out}}{R_{TIA}} \quad (Ec. 2.6)$$

Luego sustituyendo 2.6 en 2.5 se tiene:

$$N_{ppm} = \frac{\frac{V_{REF} - V_{out}}{R_{TIA}}}{x}$$

$$N_{ppm} = \frac{V_{REF} - V_{out}}{(x)(R_{TIA})} \quad (Ec. 2.7)$$

Luego para cada sensor en específico con su respectivo AFE se tiene:

- Para el sensor 4CO-500:

$$N_{ppm} = \frac{V_{REF} - V_{out}}{(0.070 \mu A/ppm)(120 K\Omega)}$$

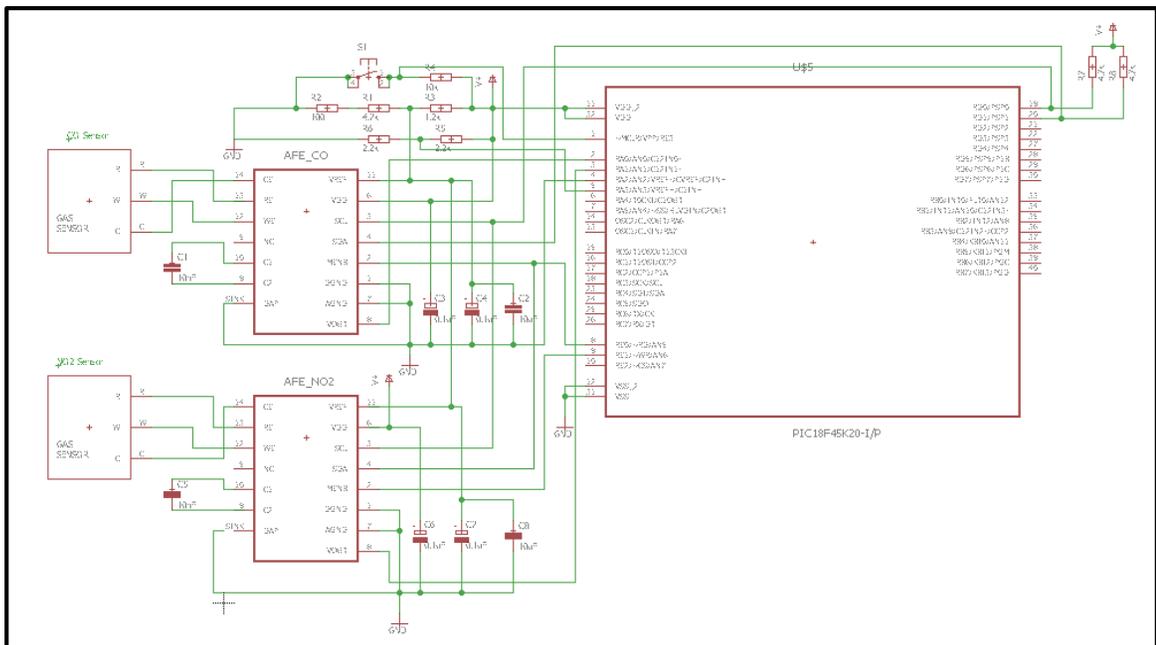
$$N_{ppm} = \frac{V_{REF} - V_{out}}{0.0084} \quad (Ec. 2.8)$$

- Para el sensor 4NO<sub>2</sub>-20:

$$N_{ppm} = \frac{V_{REF} - V_{out}}{(0.60 \mu A/ppm)(350 K\Omega)}$$

$$N_{ppm} = \frac{V_{REF} - V_{out}}{0.21} \quad (Ec. 2.9)$$

Posterior a su diseño, el sistema de medición fue implementado, como lo muestra el esquemático de la figura 2.13.



**Figura 2.13: Esquemático del subsistema de medición. (Captura de pantalla).**

## 2.3 Modelo del subsistema de comunicación

El subsistema de comunicación está compuesto por los módulos de comunicación inalámbricos XBee Pro S1 y por el microcontrolador. Los dispositivos XBee pueden trabajar en topologías de red punto a punto y en malla. Dentro de una red un dispositivo XBee puede trabajar como:

- **Coordinador:** se encarga de formar la red compuesta por estos módulos, maneja las direcciones de los nodos en la red, la seguridad de la información y la auto regeneración de ésta.
- **Router:** se une a una red previamente formada, manda/recibe sus propios datos (de sus puertos), sirve de intermediario para nodos distantes, su uso es opcional sólo si los nodos que desean comunicarse están demasiado lejos.
- **Dispositivo final:** éste de igual forma que el ruteador se une a una red previamente formada, necesitan un dispositivo coordinador o router para poder mandar su información. Estos pueden estar en modo sleep para aplicaciones de bajo consumo.

Estos dispositivos pueden trabajar en dos tipos de redes, las cuales son red de pares (peer-to-peer) y No-Beacon (w/Coordinador). En la implementación de este subsistema se utilizó el primer tipo de red, debido a que es el tipo de comunicación por defecto para el que los Módulos XBee están configurados, y los sistemas basados en este tipo de red operan dentro de una topología punto a punto donde los módulos no son dependientes de una relación Maestro/Esclavo. En vez de que los módulos se sincronicen con configuraciones Maestro/Esclavo, ambos comparten estos roles.

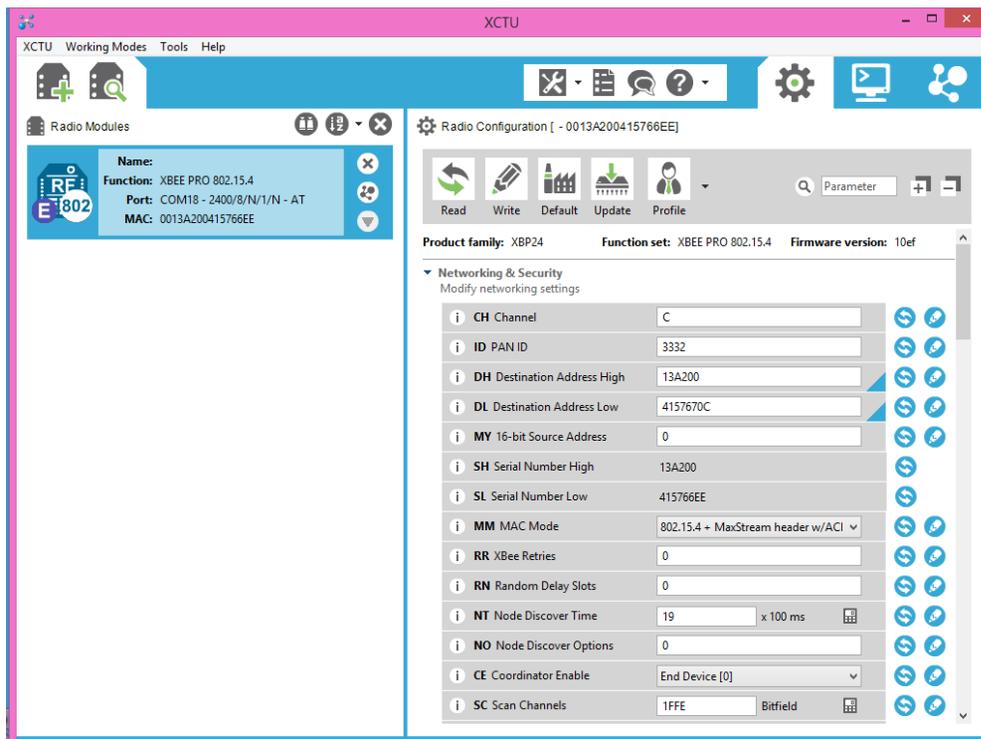
Cuando los módulos operan en cualquier topología de red, necesitan una dirección que los identifique. El direccionamiento de estos componentes se puede realizar a través de un número serie único que posee cada módulo XBee, y también si éstos forman parte de una red de área personal (PAN, por sus siglas

en inglés), el coordinador de la red asigna direcciones lógicas de 16 bits que varían desde 0 a 65535.

Debido a que en el desarrollo de este subsistema se utilizó una red punto a punto y el modo de comunicación peer-to-peer, la manera más sencilla fue utilizar sus números series únicos. Los módulos XBee-Pro que se utilizaron fueron los siguientes:

Módulo XBee Pro A	0013A200415766EE
Módulo XBee Pro B	0013A2004157670C

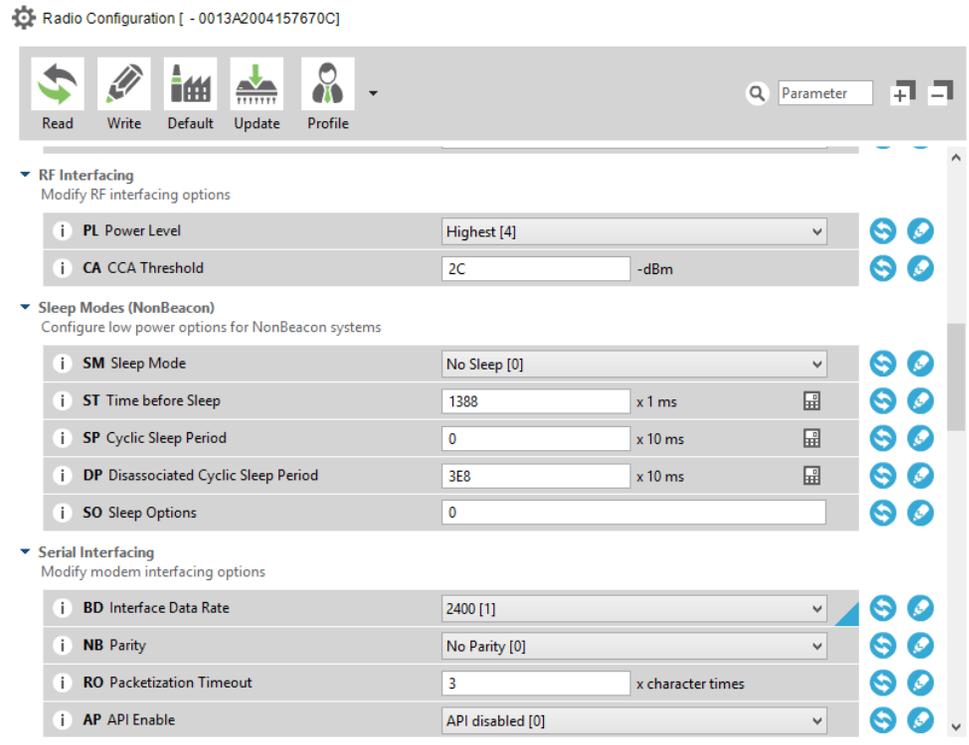
La asociación de estos dispositivos se realiza escribiendo como dirección de destino el número serie del otro dispositivo, y viceversa. Esto se logra a través del software XCTU (ver figura 2.14). Este software permite realizar la configuración de estos módulos a través de la escritura de comandos AT, los cuales pueden dividirse en distintas categorías, como por ejemplo, comandos especiales, comandos de red y seguridad, comandos de interfaz serial, entre otros



**Figura 2.14: Software XCTU (Captura de pantalla)**

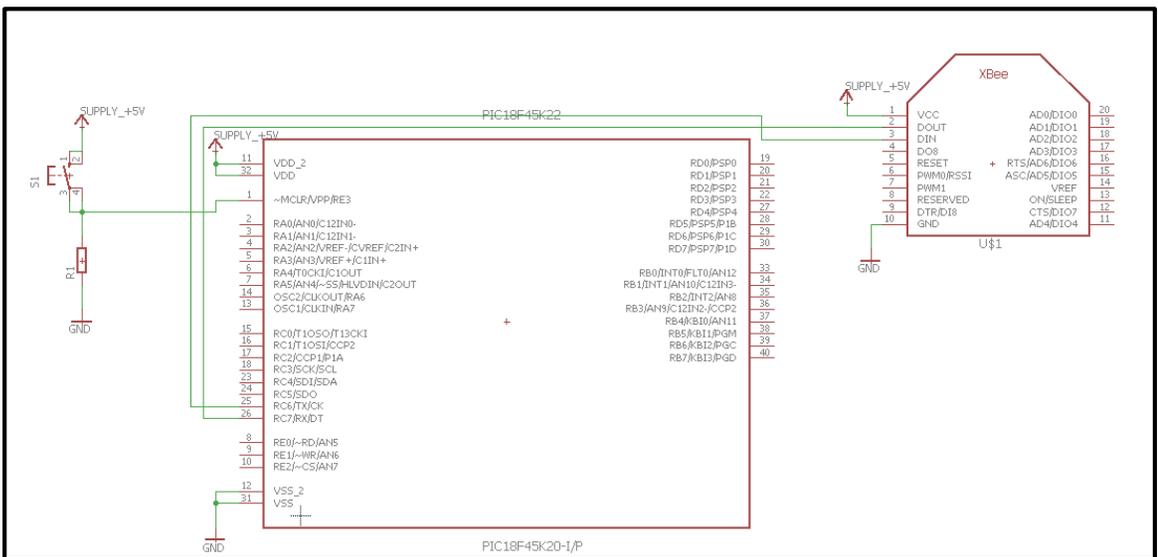
Como se observa en esta figura, existe una gran cantidad de parámetros que pueden modificarse para hacer funcionar los módulos XBee. Sin embargo, los parámetros de interés para emparejar los módulos utilizados son los que corresponden a la categoría de comandos de red y seguridad. Primeramente, se encuentra el canal (CH), el cual asigna el canal de operación utilizado para transmitir y recibir información. Ambos dispositivos deben estar configurados en el mismo canal para poder comunicarse entre sí, y evitar interferencias. En este caso el canal seleccionado fue el 0x0Ch. El segundo parámetro es el identificador de red de área personal (PAN ID), el cual, de igual forma que el anterior, debe configurarse igual para ambos dispositivos. En este caso, se modificó el identificador a 0x3332h. Y, finalmente, se configura la parte alta de la dirección de destino (DH) y la parte baja de la dirección de destino (DL). Ambas direcciones corresponden al XBee con el que se quiere establecer comunicación. Esta figura presenta el estado de los parámetros de sólo uno de los módulos XBee empleados. Ambos dispositivos fueron configurados para poder operar en una red punto a punto.

Otro de los parámetros que se modificó fue el correspondiente al nivel de potencia (PL), el cual se configuró hasta el máximo nivel para garantizar la máxima distancia a la que los módulos pueden interactuar. La potencia para ambos dispositivos fue modificada a 18 dBm. Asimismo, se configuraron los comandos asociados a la interfaz serial dentro de los que se encuentran la paridad de los datos, la cantidad de bits a transmitir/recibir y la velocidad de transmisión de los datos, la cual fue de 2400 baudios. La figura 2.15 ilustra el estado de estos parámetros.



**Figura 2.15: Otros parámetros de configuración de los módulos de comunicación. (Captura de pantalla)**

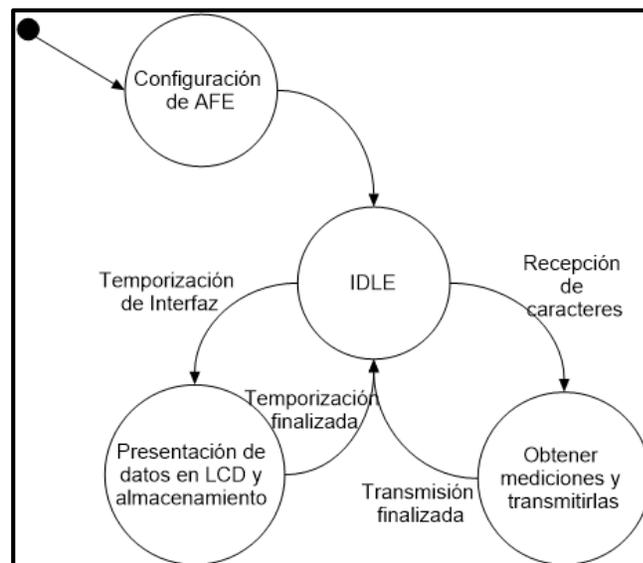
La figura 2.16 ilustra cómo se conectó uno de los módulos de comunicación en el nodo sensor.



**Figura 2.16: Esquemático del subsistema de comunicación inalámbrica. (Captura de pantalla).**

## 2.4 Modelo del programa del microcontrolador

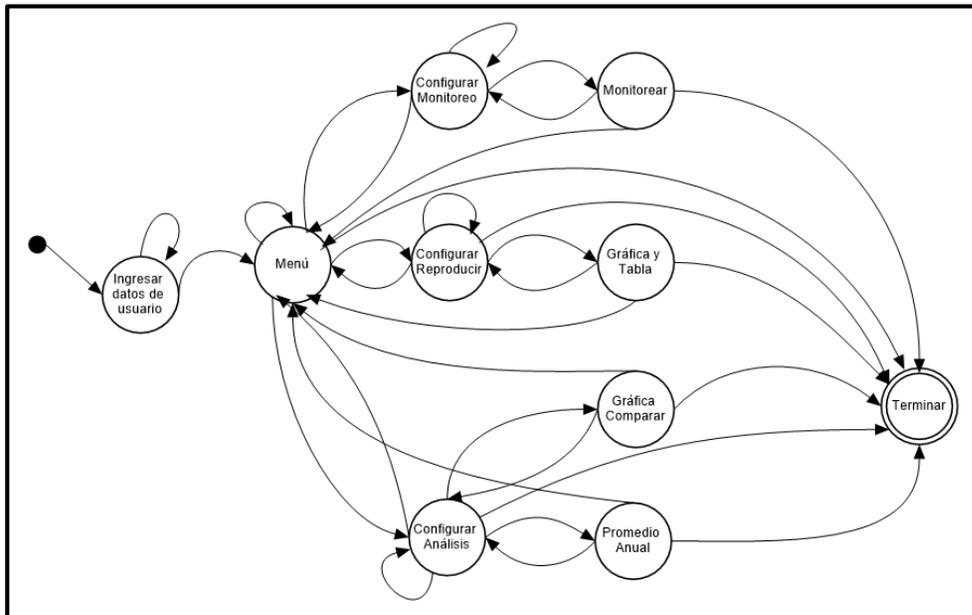
En la figura 2.17 se muestra un diagrama general de las funciones que ejecuta el microcontrolador. Como se puede observar, la primera función que el dispositivo realiza es configurar los registros internos del AFE para que éstos puedan funcionar apropiadamente en conjunto con los sensores. Luego éste se va a un estado de espera, y permanece ahí mientras no suceda un evento que le indique realizar otras funciones. Si la interfaz gráfica le solicita al microcontrolador el valor de las mediciones de los gases mediante el envío de caracteres, inmediatamente éste realiza las debidas operaciones para obtener las concentraciones de los gases y se las envía a través de uno de los módulos EUSART que éste posee. Cuando termina la transmisión, el microcontrolador vuelve al estado de espera. Por otra parte, cada vez que se alcanza el periodo de muestreo especificado por la interfaz, el sistema presenta a través de una LCD los valores de las mediciones, y la hora y la fecha en la que se realizan éstas, y almacena la información en un dispositivo de memoria. Luego vuelve al estado de espera, y realiza nuevamente las operaciones de presentación de datos y almacenamiento hasta que se alcanza el tiempo de muestreo, y así sucesivamente.



**Figura 2.17: Diagrama del programa del microcontrolador.**

## 2.5 Interfaz gráfica y base de datos

La interfaz gráfica es la que permite que el usuario interactúe de forma remota con el subsistema de medición desarrollado. Ésta le permite al usuario monitorear remotamente la calidad del aire en algún punto de interés. A través de esta interfaz también se pueden manipular mediciones previamente realizadas desde una base de datos. La figura 2.18 muestra el modelo de la interfaz gráfica desarrollada. En este diagrama se puede observar sus funciones y transición de una a otra.



**Figura 2.18: Modelo de interfaz gráfica.**

La interfaz gráfica desarrollada para este prototipo contiene una ventana de inicio donde el usuario tiene que ingresar su nombre de usuario y una contraseña para poder acceder a sus funciones (ver figura 2.19). La interfaz, en esta página de inicio, muestra imágenes alusivas del medio ambiente del país con el objetivo de hacer ver la importancia de preservar los recursos naturales nacionales.



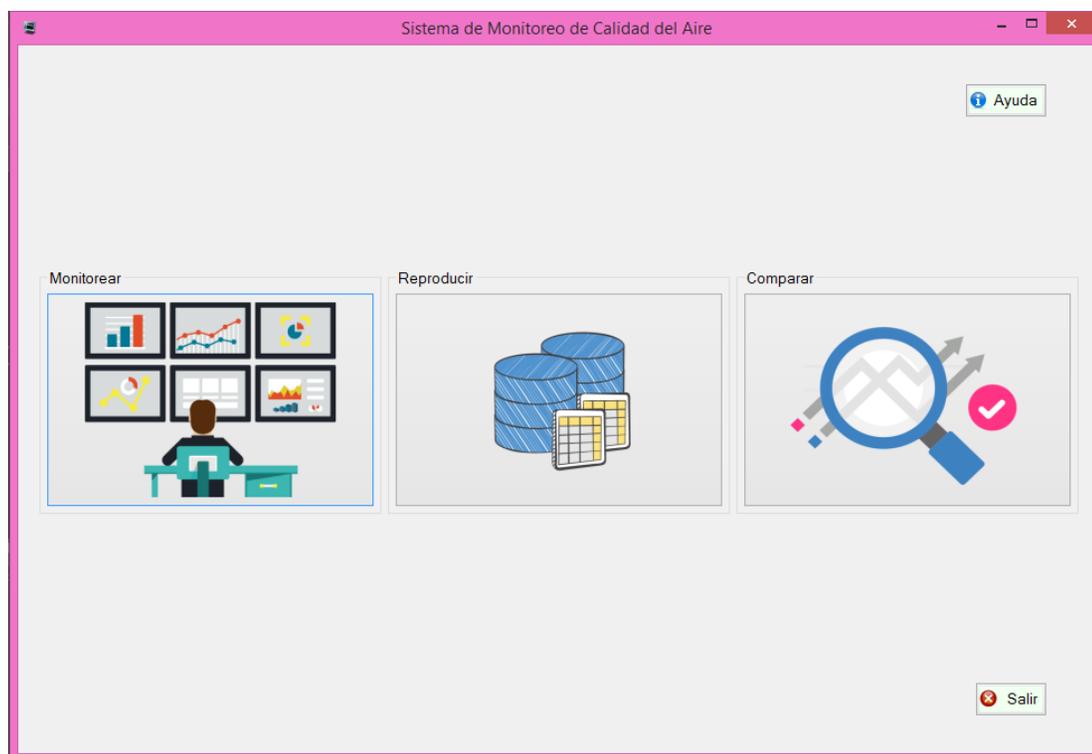
**Figura 2.19: Ventana de inicio de interfaz gráfica. (Captura de pantalla).**

Los nombres de usuarios y sus contraseñas se almacenan en una tabla llamada “users” que se encuentra en el esquema “aqm”. La figura 2.20 muestra el contenido de la tabla “users” desde del entorno del software MySQL Community.

idusers	name	surname	user	password
1	Nvdia	Medina	Nvdia	hola
2	Cristian	Larios	Cristian	adios
3	Alejandro	Méndez	Alejandro	Méndez
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

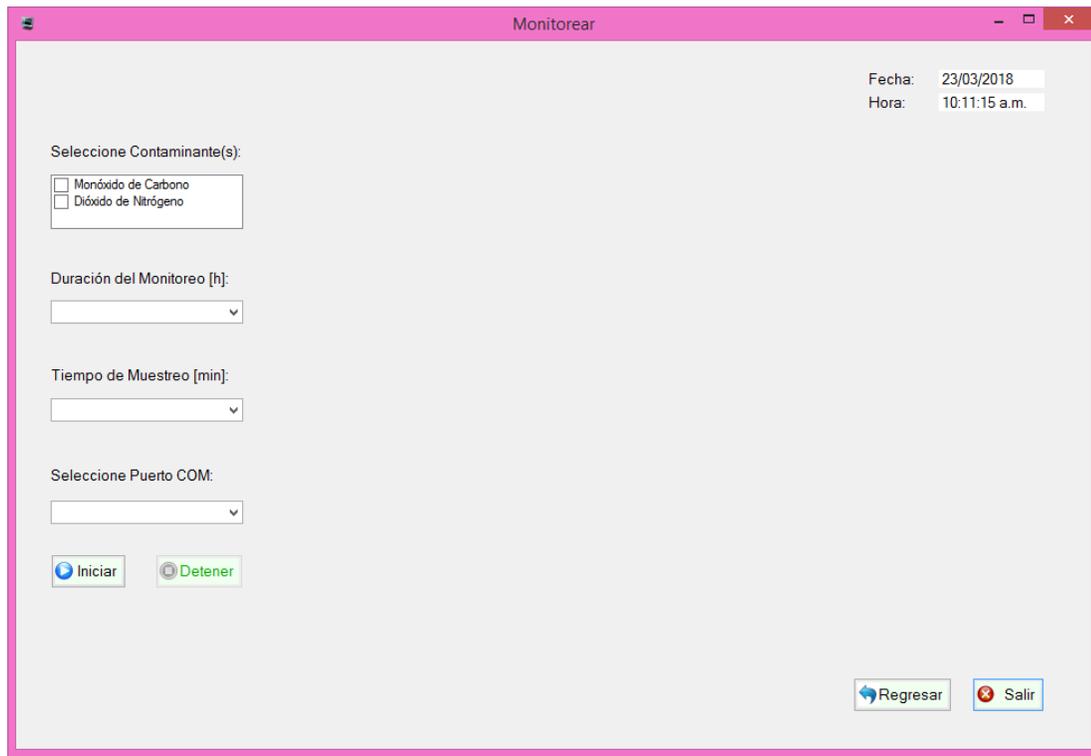
**Figura 2.20: Tabla que contiene los datos de los usuarios que pueden acceder a las funciones de la interfaz gráfica. (Captura de pantalla).**

Una vez que el usuario ha iniciado sesión correctamente se muestra inmediatamente una ventana que contiene tres íconos, los cuales al presionarse permiten al usuario hacer uso de la función que representan. La figura 2.21 ilustra el contenido de esta ventana.



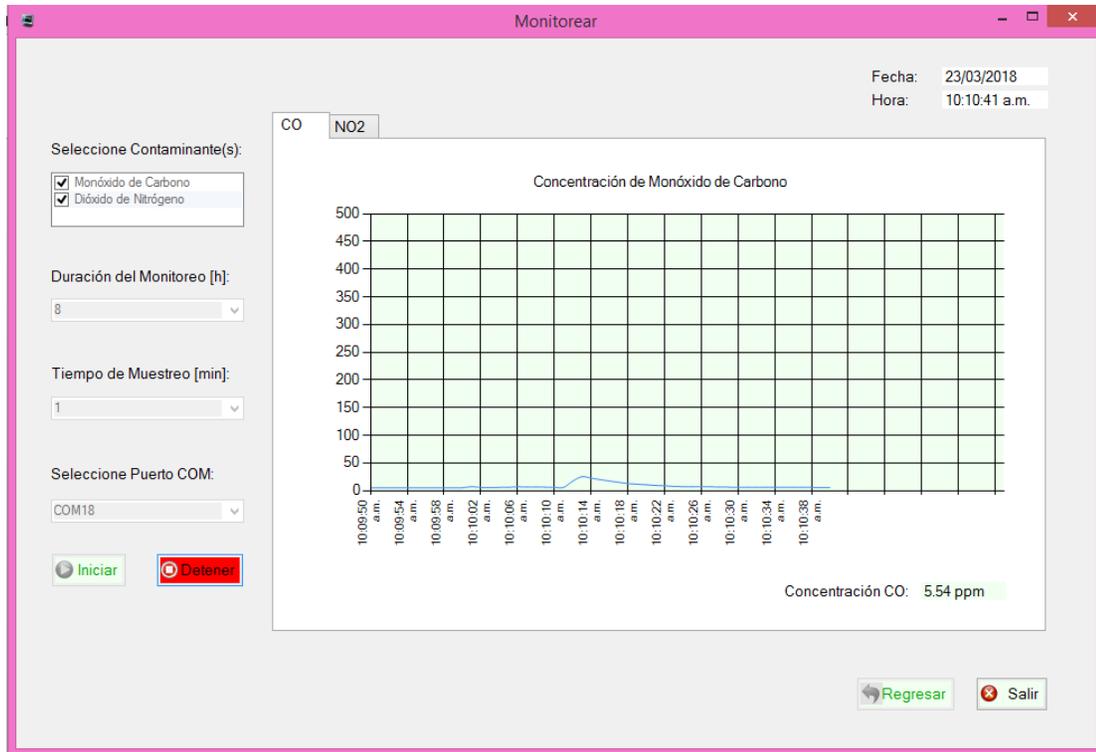
**Figura 2.21: Funciones de la interfaz gráfica. (Captura de pantalla).**

La opción monitorear permite realizar monitoreo remoto en tiempo real desde el punto donde se encuentra el subsistema de monitoreo. Previamente para poder llevar a cabo esta función, una serie de parámetros tienen que ser configurados (ver figura 2.22). Estos parámetros corresponden a la selección de los contaminantes a monitorear (monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno o ambos a la vez), la duración del monitoreo (8 horas o 24 horas, según cada contaminante), el periodo de muestreo y el puerto serial por donde la comunicación inalámbrica será efectuada. Esta ventana también muestra la fecha y la hora en la que se realiza el monitoreo.



**Figura 2.22: Ventana de opción monitorear. (Captura de pantalla).**

Una vez que estos parámetros han sido configurados correctamente se presiona el botón iniciar y se comienza a monitorear en tiempo real las variaciones de los niveles de concentración de los gases como se ilustra en la figura 2.23. La gráfica que se genera está en función de los niveles de concentración de los gases y de la hora en la que las mediciones fueron tomadas.



**Figura 2.23: Monitoreo en tiempo real del gas monóxido de carbono. (Captura de pantalla).**

Otra de las funciones de la interfaz elaborada es la reproducción de mediciones realizadas previamente. La ventana de esta función se muestra en las figuras 2.24 y 2.25. En la parte superior se aprecian dos pestañas nombradas cada una con el nombre de los contaminantes que el sistema puede detectar. Al presionar una de las pestañas se despliegan otras opciones nombradas por los años 2017 y 2018 y si se presionan se despliegan los meses del año. Una vez que se selecciona el mes donde se quiere apreciar el comportamiento de las mediciones, se despliega una gráfica del gas seleccionado y una tabla con las mediciones y las fechas correspondientes. La figura 2.26 ilustra, desde el entorno del MySQL, las bases de datos de cada gas con sus respectivas tablas correspondientes a cada mes del año donde se almacenan las mediciones llevadas a cabo.

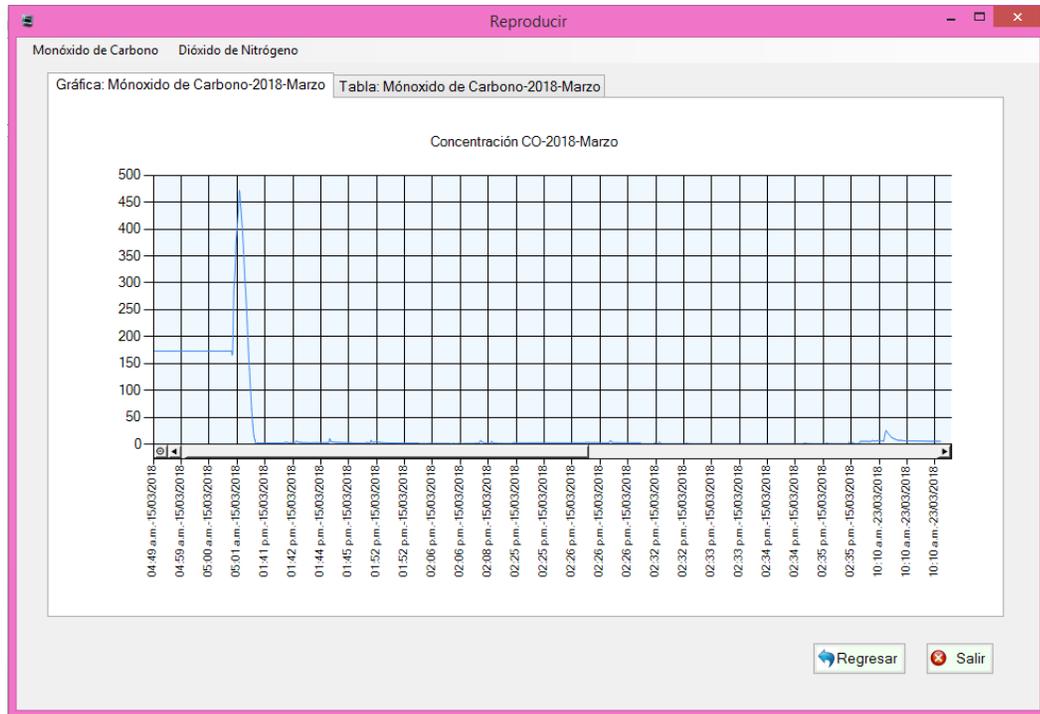


Figura 2.24: Ventana de función reproducir datos. (Captura de pantalla).

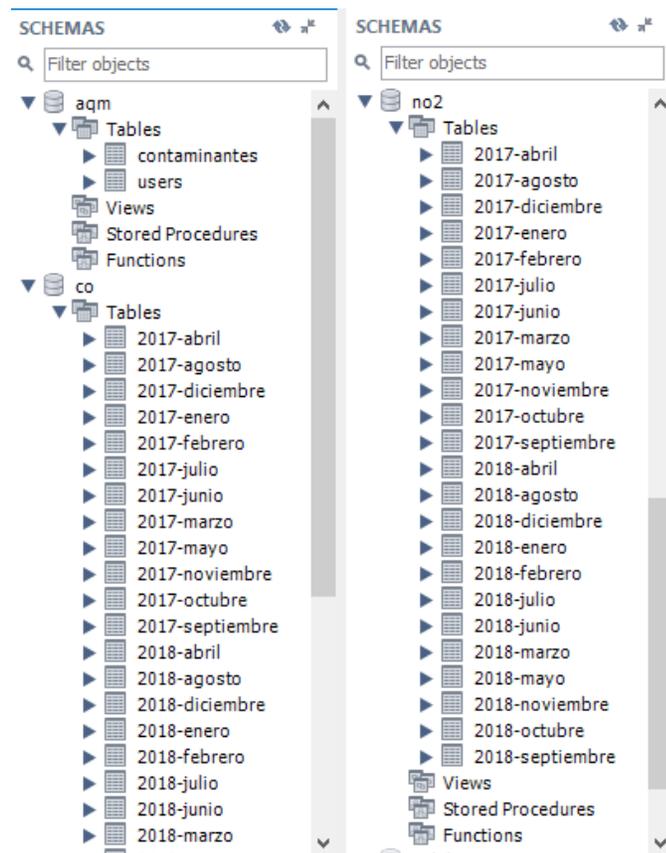
Monóxido de Carbono Dióxido de Nitrógeno

Gráfica: Monóxido de Carbono-2018-Marzo Tabla: Monóxido de Carbono-2018-Marzo

Fecha	Hora	COValor
15/03/2018	04:49 a.m.	173.02
15/03/2018	04:50 a.m.	173.02

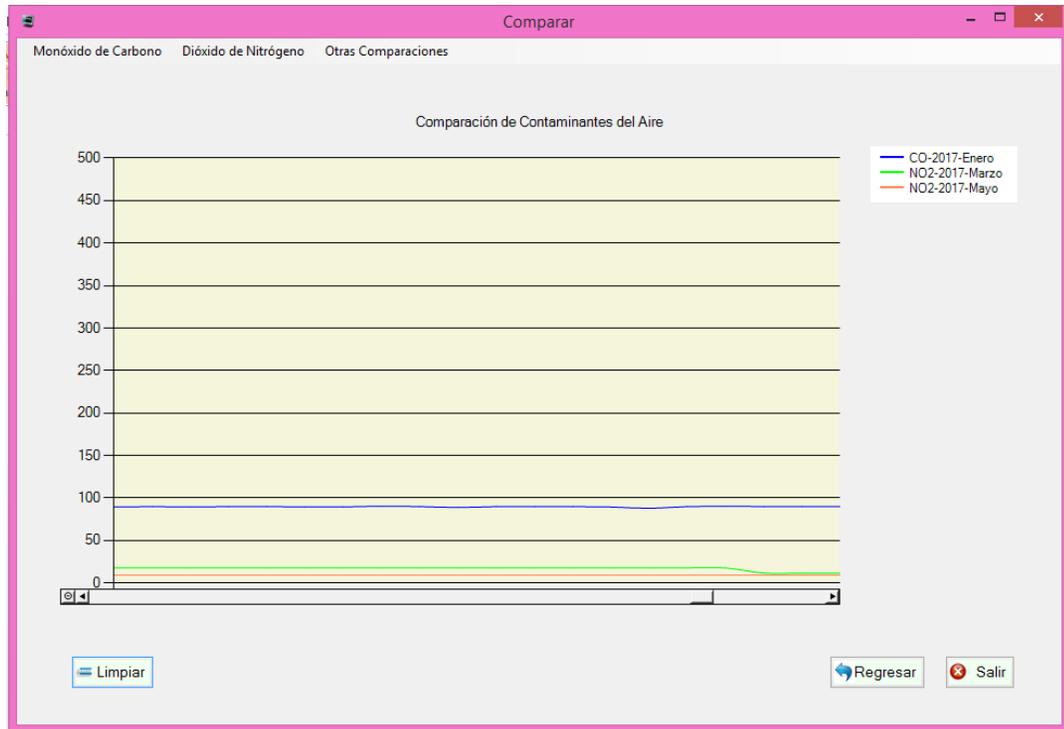
Regresar Salir

Figura 2.25: Tabla de mediciones del gas seleccionado. (Captura de pantalla).

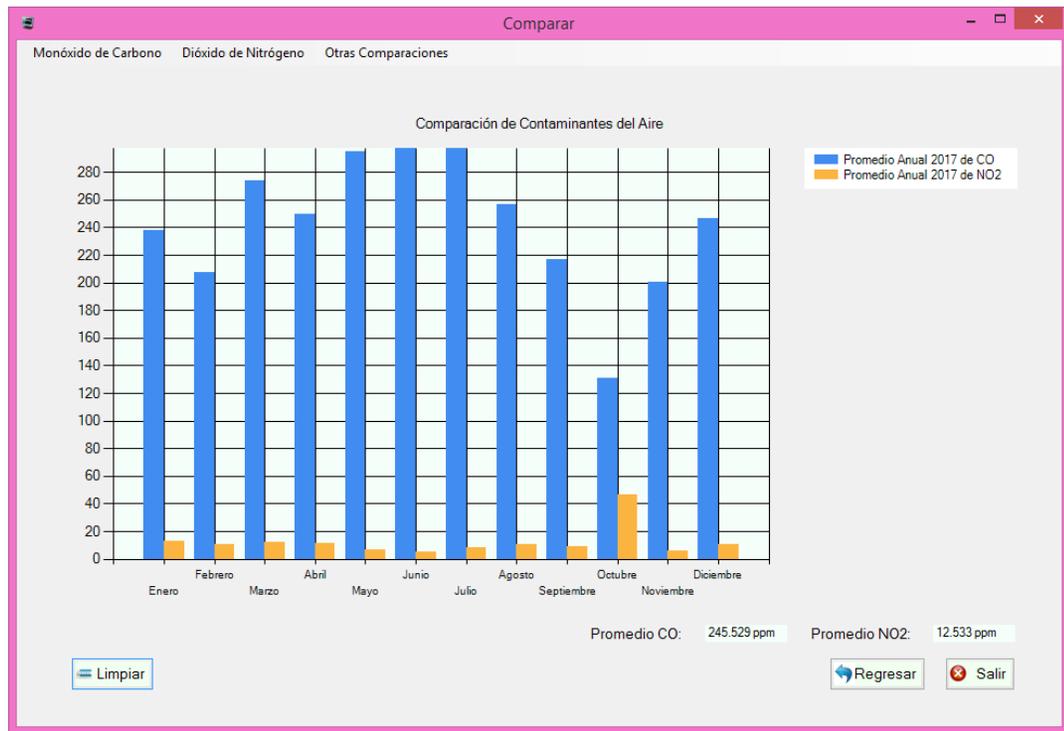


**Figura 2.26: Tablas donde se almacenan las mediciones de los gases en cada mes. (Captura de pantalla).**

La tercera función que la interfaz posee es la comparación de datos entre uno o más meses del año y entre los mismos contaminantes. El proceso de selección de la información que se desea apreciar es el mismo al que se realizó en la función “reproducir” de la aplicación. Como se puede observar en la figura 2.27, en esta función se pueden observar más de una representación de cada mes dentro de la gráfica, de tal modo que se puedan apreciar mejor las diferencias en el comportamiento de un gas en un mes con respecto a otro periodo de tiempo. En este ejemplo se muestran gráficas de los meses de enero, marzo y mayo del año 2017. Esta ventana también contiene otra pestaña llamada “Otras comparaciones” donde se muestra el promedio de las mediciones realizadas por cada año (ver figura 2.28).



**Figura 2.27: Comparación de datos entre diferentes meses del año. (Captura de pantalla).**

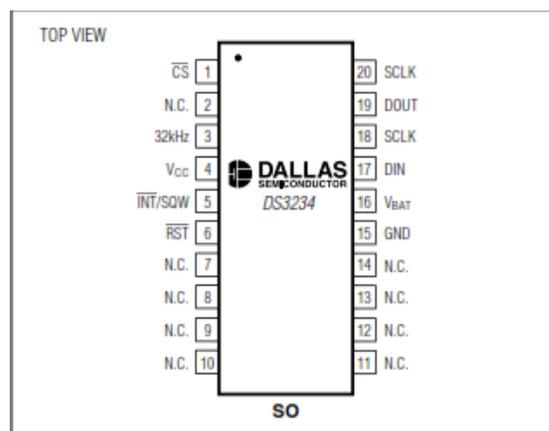


**Figura 2.28: Promedio de las mediciones realizadas en cada mes. (Captura de pantalla).**

## 2.6 Modelo del subsistema de respaldo de información

El subsistema del modelo de almacenamiento de respaldo está compuesto por un módulo de reloj en tiempo real (RTC, por sus siglas en inglés) que proporciona la fecha y hora, por una tarjeta SD que permite almacenar las mediciones efectuadas en el punto de medición y por el microcontrolador que se encarga de configurar el módulo RTC y de escribir en la memoria SD.

El módulo RTC que se utilizó es el DS3234. Éste es un reloj de tiempo real de bajo costo extremadamente preciso que se configura a través del protocolo SPI. Éste posee un oscilador de cristal que compensa efectos de temperatura. Este módulo también integra 256 bytes de una SRAM de respaldo de batería. Si la fuente de alimentación deja de alimentar al módulo, el contenido de la memoria es retenido gracias a la fuente de energía conectada al pin  $V_{BAT}$  (ver figura 2.29). El DS3234 proporciona información de segundos, minutos, hora, fecha y el año. La fecha al final del mes es automáticamente ajustada para meses con menos de 31 días, incluyendo correcciones para el año bisiesto hasta el año 2099. El reloj puede operar en formato de 12 horas o 24 horas con un indicador de formato AM/PM.



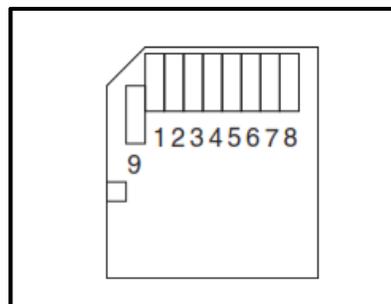
**Figura 2.29: Configuración de pines de módulo RTC DS3234. Obtenido de <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3234.pdf>**

Los registros internos del módulo RTC que se configuraron en este proyecto se muestran en la figura 2.30. Estos registros corresponden a los que almacenan los valores de los segundos, minutos, hora, día, mes y año. Por lo tanto, la información de tiempo y calendario es obtenida al leer correctamente estos registros. El contenido de estos registros se encuentra en formato decimal de código binario (BCD, por sus siglas en inglés). Tal y como se mencionó anteriormente este módulo puede trabajar en modo de 12 o de 24 horas. El bit 6 del registro hora es en encargado de determinar en qué modo el reloj trabajará.

ADDRESS READ/WRITE	MSB BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	LSB BIT 0	FUNCTION	RANGE
00h	80h	0	10 Seconds		Seconds				Seconds	00-59
01h	81h	0	10 Minutes		Minutes				Minutes	00-59
02h	82h	0	12/24	AM/PM	10 hr	Hour			Hours	1-12 +AM /PM 00-23
				20 hr						
03h	83h	0	0	0	0	Day			Day	1-7
04h	84h	0	0	10 Date		Date			Date	01-31
05h	85h	Century	0	0	10 Mo	Month			Month/ Century	01-12 + Century
06h	86h	10 Year				Year			Year	00-99

**Figura 2.30: Mapa de direcciones de los registros internos del RTC DS3234. Obtenido de <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3234.pdf>**

El dispositivo de almacenamiento que se utilizó fue una tarjeta de memoria SD. Éstas pueden ser interconectadas a un microcontrolador usando dos diferentes protocolos: el protocolo de tarjeta SD y SPI. El protocolo que se utilizó en este trabajo fue el SPI. La tarjeta SD tiene nueve pines como se muestra en la figura 2.31. Estos pines tienen diferentes funciones dependiendo del protocolo utilizado. En la tabla 2.3 se describe la función de cada pin en el modo de operación SPI.



**Figura 2.31: Diseño de pines estándar de una tarjeta SD. Obtenido de Ibrahim (2008).**

**Tabla 2.3:** Definición estándar de pines de tarjeta SD.

Pin	Nombre	Descripción SPI
1	CD/DAT23/CS	Selección de chip
2	CMD/Datain	Datos y comandos del host a la tarjeta
3	VSS	Fuente tierra
4	VDD	Fuente de Voltaje
5	CLK	Reloj
6	VSS2	Fuente de voltaje tierra
7	DAT0	Datos y estados de tarjeta al host
8	DAT1	Reservado
9	DAT2	Reservado

Cuando la tarjeta se encuentra en modo SPI, sólo se utilizan 7 pines de ésta. Tres son usados para alimentación y el resto para implementar el modo SPI. Cuando ésta se enciende, la memoria SD trabaja por defecto usando el protocolo SD. El modo de operación se cambia a SPI si la señal de selección de chip es habilitada durante la recepción del comando de reinicio.

Una tarjeta SD tiene un conjunto de registros que proporcionan información sobre el estado de la tarjeta. Cuando la tarjeta es operada en modo SPI, éstos son:

- Registro de identificación de tarjeta (CID, por sus siglas en inglés).
- Registro de datos específico de tarjetas (CSD, por sus siglas en inglés).
- Registro de configuración de SD (SCR, por sus siglas en inglés).
- Registro de control de operación (OCR, por sus siglas en inglés).

El registro CID consiste de 16 bytes y contiene el identificador de fabricante, nombre del producto, revisión del producto, número serial de la tarjeta, código de fecha del fabricante, y un byte de checksum.

Todos los comandos SPI de la memoria SD tiene un tamaño de 6 bytes, y el bit más significativo es el que se transmite primero. La figura 2.32 muestra el formato del comando. El primer byte es el byte de comando, y los 5 bytes restantes son llamados argumentos de comando. El bit 6 del byte de comando se establece a 1 y el bit más significativo (MSB, por sus siglas en inglés) es siempre 0. Con los otros bits de este byte se tienen 64 posibles comandos, que van desde CMD0 hasta CMD63. De éstos, los más relevantes son:

- CMD0 GO\_IDLE\_STATE (Reinicia la tarjeta SD).
- CMD1 SEND\_OP\_COND (Inicializa la tarjeta).
- CMD9 SEND\_CSD (Obtiene los datos del registro CSD).
- CMD10 SEND\_CID (Obtiene los datos del registro CID).
- CMD16 SET\_BLOCKLEN (Selecciona un bloque de longitud en bytes).
- CMD17 READ\_SINGLE\_BLOCK (Lee un bloque de datos).
- CMD24 WRITE\_BLOCK (escribe un bloque de datos).
- CMD32 ERASE\_WR\_BLK\_START\_ADDR (Establece la dirección del primer bloque de escritura a borrar).
- CMD33 ERASE\_WR\_BLK\_END\_ADDR (Establece la dirección del último bloque de escritura a borrar).
- CMD38 ERASE (Borra todos los bloques seleccionados previamente).

Byte 1		Byte 2 - 5		Byte 6	
7	6	31	0	7	0
0	1	Command argument		CRC	1

**Figura 2.32: Formato de comando SPI. Obtenido de Ibrahim (2008).**

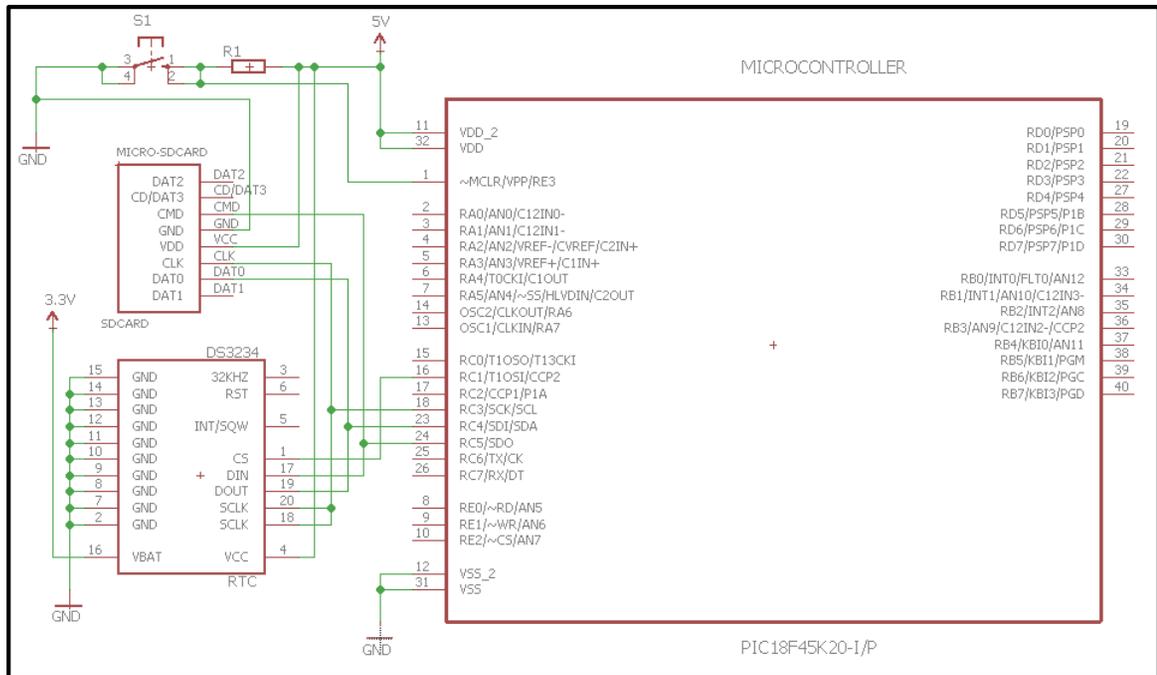
Cuando el microcontrolador envía un comando a la tarjeta SD, ésta envía en respuesta un byte de estado llamado R1. El bit MSB de este byte siempre es cero y los otros bits restantes indican las siguientes condiciones de error:

- Tarjeta en modo espera.
- Borrado de borrado.
- Comando ilegal.
- Error CRC de comunicación.
- Error de secuencia de borrado.
- Error de dirección.
- Error de parámetro.

La tarjeta SD en modo SPI puede soportar operaciones de uno y múltiples bloques de memoria. El microcontrolador establece la longitud de los bloques. Si el comando de lectura es válido, la memoria responde con una muestra de respuesta, seguido por un bloque de datos y un check CRC. La longitud de los bloques puede estar entre 1 y 512 bytes y la dirección inicial puede ser cualquier dirección válida en el rango de direcciones de la tarjeta. En operaciones de lectura de múltiples bloques, la tarjeta envía bloques de datos con cada bloque teniendo su propio check CRC añadido al final del bloque.

De igual forma, la tarjeta SD soporta operaciones de escritura de uno a múltiples bloques. Una muestra de inicio de bloque de un byte se agrega al inicio de cada bloque. Cuando la tarjeta recibe bloque de datos, ésta responde con una muestra de respuesta de datos, y la tarjeta es programada siempre que el bloque de datos se reciba sin errores. Cuando se escriben múltiples bloques el host envía los bloques de datos uno tras otro, cada uno precedido por una muestra de bloque de inicio. La tarjeta envía un byte de respuesta después de cada bloque de datos.

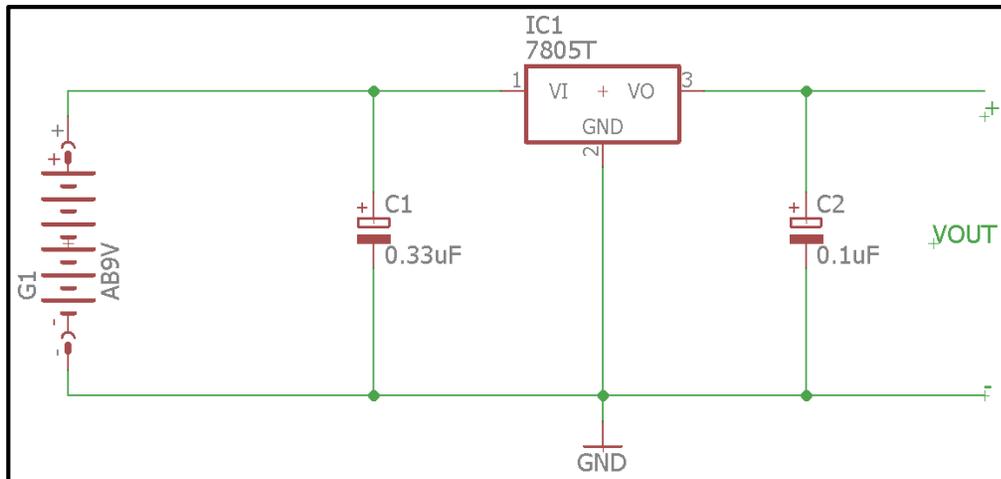
La figura 2.33 muestra el diagrama esquemático del subsistema de almacenamiento de respaldo, donde se observa que ambos módulos comparten los buses de entrada y salida de datos seriales del microcontrolador y la línea que proporciona la señal de reloj a los dispositivos esclavos (el módulo RTC y la tarjeta SD).



**Figura 2.33: Esquemático del subsistema de respaldo de información. (Captura de pantalla).**

## 2.7 Fuente de alimentación

Para la alimentación del sistema se usó una batería de 9 voltios no recargable conectada hacia la entrada de un regulador de voltaje que proporciona una salida de voltaje fija para poder alimentar los componentes del sistema. Dado que todos los componentes del sistema requieren de un voltaje de operación de 5 voltios, el regulador de voltaje que se utilizó fue el LM7805, ya que éste proporciona una salida de tensión de este valor. Los capacitores a la entrada y salida del circuito integrado son para eliminar señales de ruido presentes en las líneas de alimentación. La figura 2.34 muestra el esquemático de este subsistema.



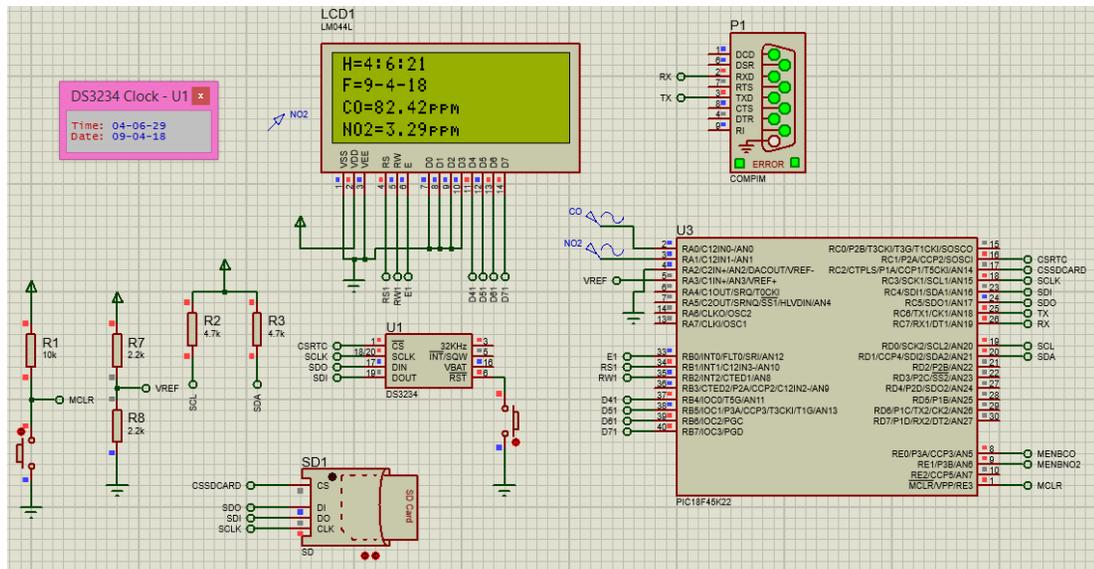
**Figura 2.34:** Esquemático del subsistema de alimentación. (Captura de pantalla).

## 2.8 Simulación del sistema

Para poder observar el comportamiento del sistema desarrollado previo a su implementación, se utilizó el programa Proteus Suite Design, el cual es un software que ofrece un entorno integrado diseñado para el desarrollo de sistemas electrónicos. Este software permite realizar simulaciones de circuitos electrónicos dentro de las principales funciones que ofrece. Proteus dispone de una amplia librería de componentes dentro de los cuales se encuentran la mayoría de los que se utilizaron en este prototipo y ofrece buenas herramientas que permiten depurar tanto el hardware como el software del sistema. La figura 2.35 muestra la simulación del sistema.

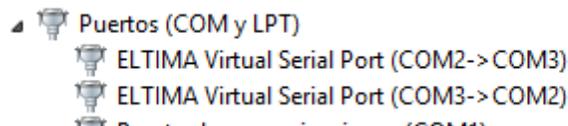
Como se puede observar, el software no disponía de los sensores y los circuitos acondicionadores de señal que se utilizaron para el subsistema de medición, por lo que se emplearon dos señales de forma seno que se conectaron a las entradas analógicas del convertidor analógico-digital interno del microcontrolador para poder representar así un efecto de variación en los valores mostrados en el display LCD. La pantalla LCD también muestra los parámetros

de hora y fecha, los cuales fueron configurados con la hora y fecha en la que se realizó esta sección del informe para efectos de demostración.



**Figura 2.35: Simulación general del sistema desarrollado. (Captura de pantalla).**

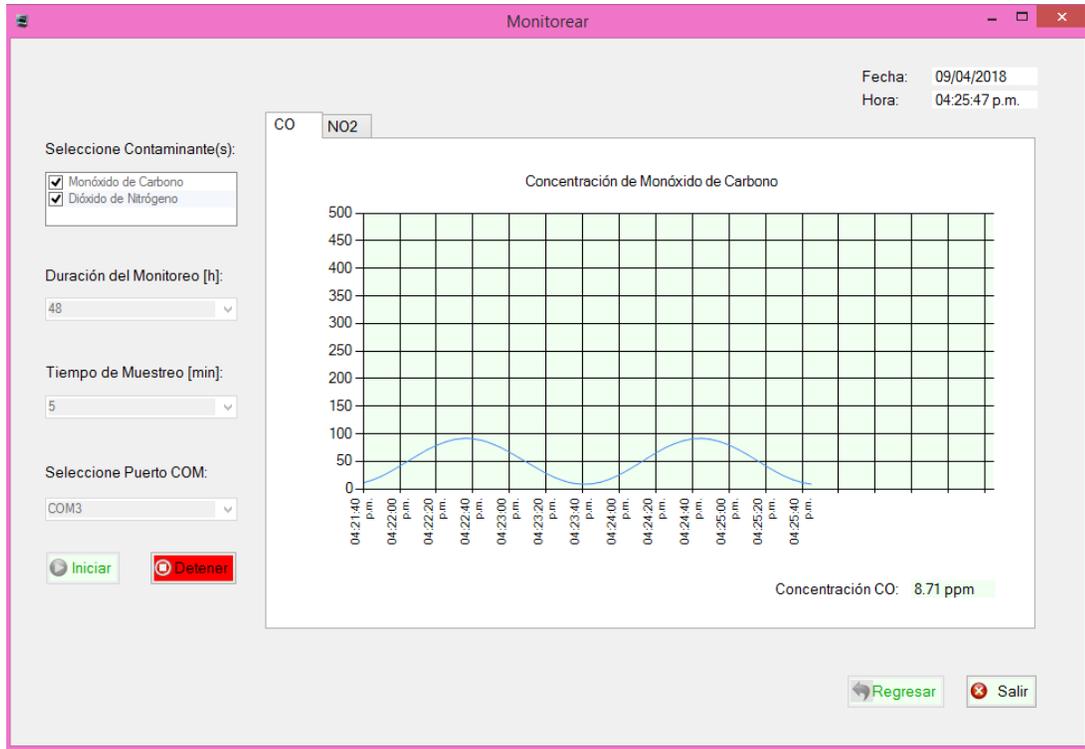
La simulación del sistema también permitió desarrollar la comunicación del sistema de medición con la interfaz gráfica desarrollada mediante el uso de puertos virtuales que se crearon a través del software ELTIMA Virtual Serial Port. Este software permite la comunicación serial virtual mediante la creación y vinculación de dos puertos seriales, los cuales en este caso fueron los puertos 2 y 3 (ver figura 2.36). De esta manera, se pudieron conectar la interfaz y el software Proteus para la transmisión/recepción de datos.



**Figura 2.36: Vinculación de puertos virtuales creados por el software ELTIMA Virtual Serial Port. (Captura de pantalla).**

La figura 2.37 es una captura de pantalla de la interfaz gráfica recibiendo datos provenientes de la simulación del sistema en Proteus correspondientes al gas monóxido de carbono. La figura también muestra la gráfica generada con

estos datos, la cual es una senoide, pues como es de esperar la señal de entrada es una onda sinusoidal.



**Figura 2.37: Gráfica de datos recibidos por simulación del sistema. (Captura de pantalla).**

## 2.9 Implementación en circuitos impresos

El sistema se implementó en un circuito impreso desarrollado en el programa EAGLE CAD, el cual ofrece un entorno que ofrece herramientas útiles para el diseño de circuitos impresos. El software contiene una amplia librería de componentes electrónicos, dentro de los cuales se encuentran todos los dispositivos que se utilizaron en el desarrollo de este sistema. Las dimensiones de la tarjeta de circuito impreso de este sistema son 12.13 cm x 9.18 cm, donde los componentes se encuentran ubicados de una manera distribuida y compacta. Las figuras 2.38 y 2.39 muestran las vistas de los planos inferior y superior, respectivamente, de la tarjeta.

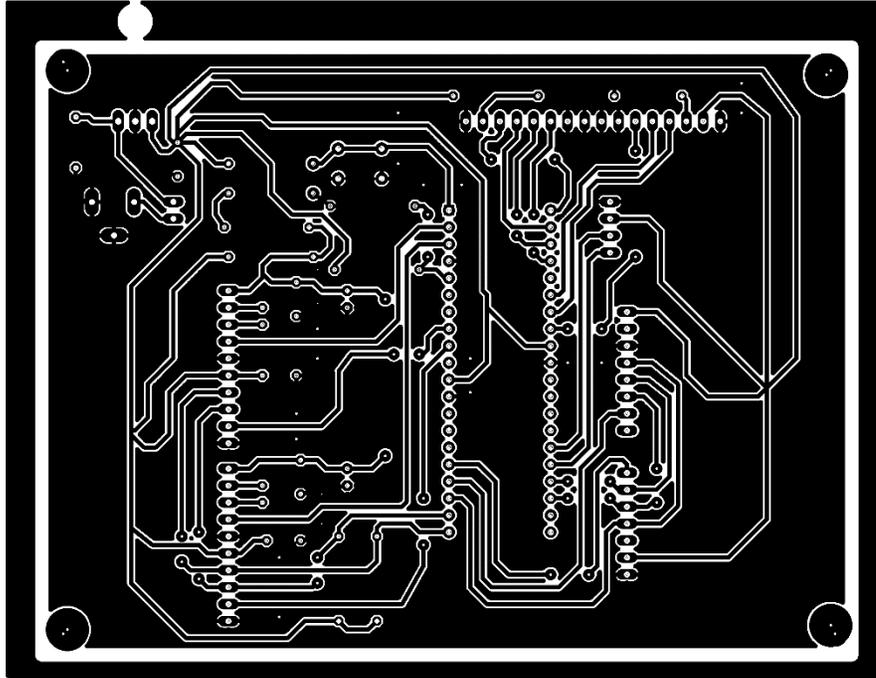


Figura 2.38: Vista inferior del plano de la tarjeta. (Captura de pantalla).

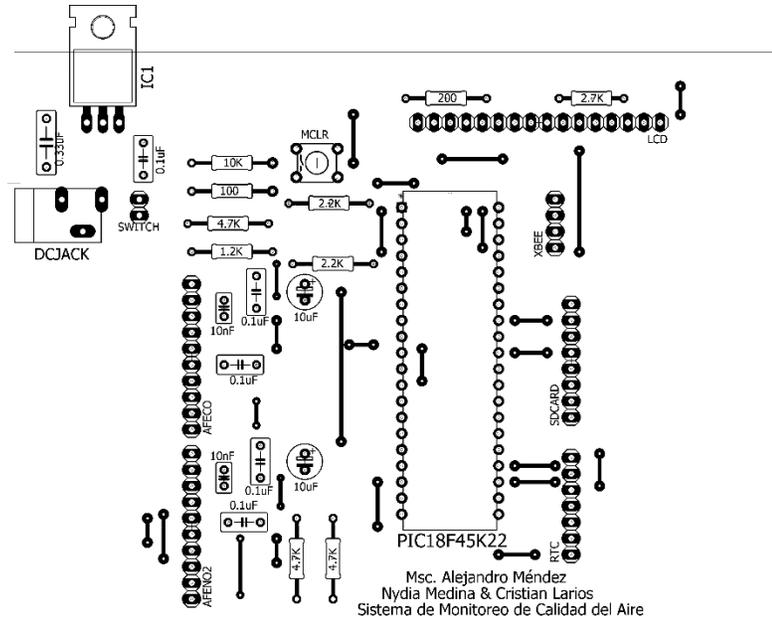
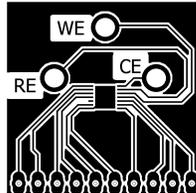


Figura 2.39: Vista superior del plano de la tarjeta de circuito impreso del sistema. (Captura de pantalla).

El circuito integrado AFE que se utilizó para el acondicionamiento de señales de los sensores electroquímicos posee dimensiones de 4mm x 4mm por lo que se diseñó un circuito impreso de 2.7 cm x 2.7 cm (ver figura 2.40), para que éste se interconectara con el microcontrolador y los sensores electroquímicos a nivel de tabla de nodos, permitiendo así realizar las pruebas del funcionamiento del sistema de medición diseñado.

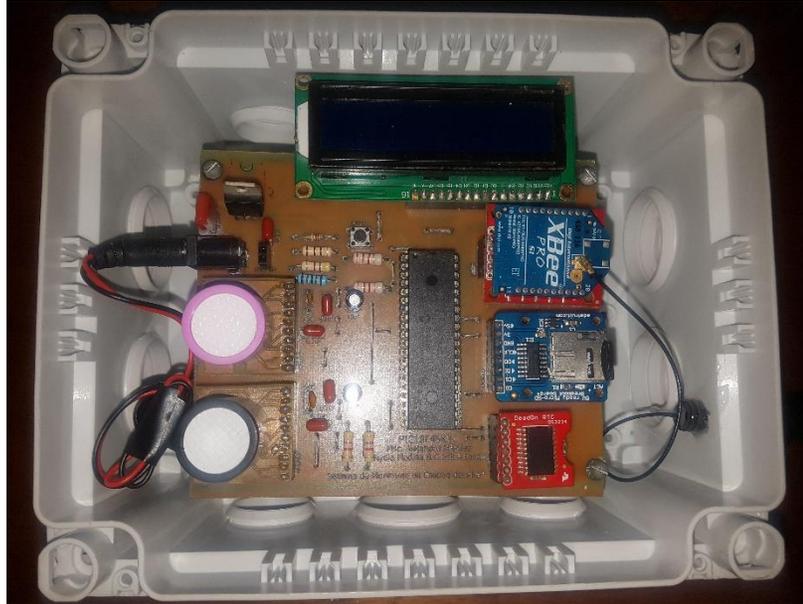


**Figura 2.40: Circuito impreso elaborado para AFE LMP91000. (Captura de pantalla).**

Al finalizar con el diseño de los circuitos impresos se procedió a su elaboración. A través del método del planchado y el uso de ácido nítrico, el circuito impreso fue plasmado en una tarjeta de cobre. Luego se hicieron las perforaciones de los componentes en la tarjeta para colocarlos y posteriormente soldar cada uno de éstos.

## **2.10 Resultados obtenidos**

Como resultado de este trabajo se obtuvo un prototipo de monitoreo remoto de los gases contaminantes monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno en tiempo real, funcional y de bajo costo. En la figura 2.41 se puede apreciar dicho prototipo finalizado.



**Figura 2.41: Prototipo de monitoreo de calidad del aire finalizado. (Fotografía)**

Para verificar su funcionamiento se realizaron algunas pruebas las cuales se muestran a continuación: primeramente, se instaló el equipo a una altura de 2.39 metros (ver figura 2.42), tal y como se establece en la norma técnica nicaragüense de calidad del aire para estudios puntuales (ver tabla 2.4).



**Figura 2.42: Altura a la que se instaló el prototipo. (Fotografía)**

**Tabla 2.4:** *Criterios para la ubicación de la altura para la toma de muestra de contaminantes atmosféricos.*

<b>Altura de la toma de muestra</b>	<b>Tipo de Estudio</b>
1.5 a 2.5 metros sobre el nivel de la superficie	Epidemiológico y de tráfico vehicular, fuentes locales y estudios puntuales.
1.5 a 3 metros sobre el nivel de la superficie	Zona críticas urbanas, fuentes locales y estudios puntuales
2.5 a 4 metros y hasta 8 metros sobre la superficie del mar.	Emisiones de fuentes fijas y estudios de área

En la figura 2.43 se puede apreciar el lugar donde se instaló el sistema de monitoreo. En esta ubicación, el sistema estaba expuesto al aire libre (outdoor), de tal manera que pudiese captar debidamente las concentraciones de los gases.



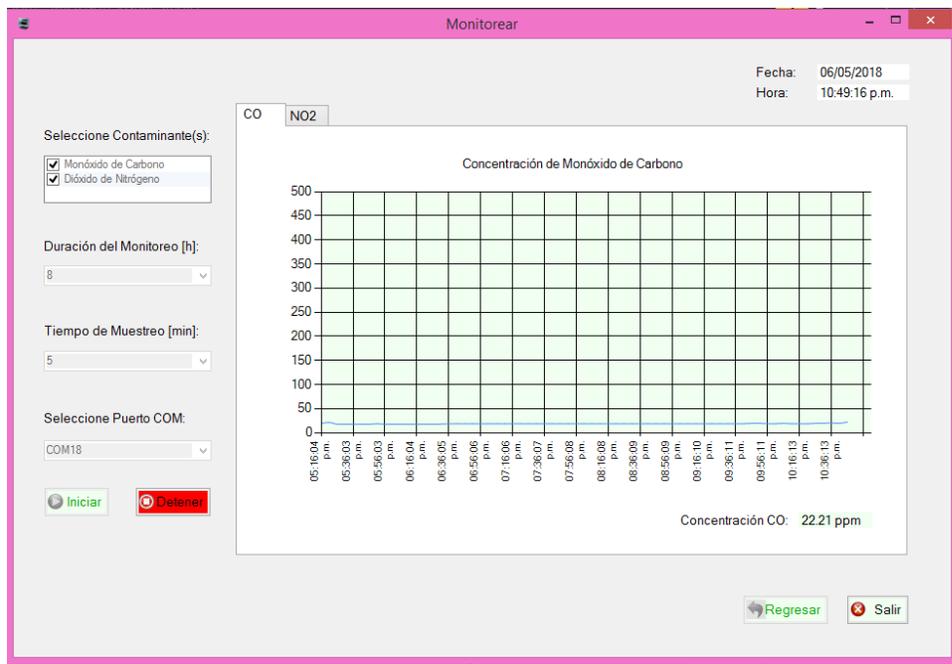
**Figura 2.43:** *Punto de instalación del prototipo. (Fotografía).*

En la tabla 2.5, la cual fue elaborada de acuerdo a lo establecido en la norma técnica nicaragüense de calidad del aire, se detallan los periodos de muestreo para cada uno de los contaminantes seleccionados para el prototipo implementado. Para fines de prueba, se efectuó el monitoreo durante 8 horas continuas, obteniendo las mediciones de ambos contaminantes cada 5 minutos.

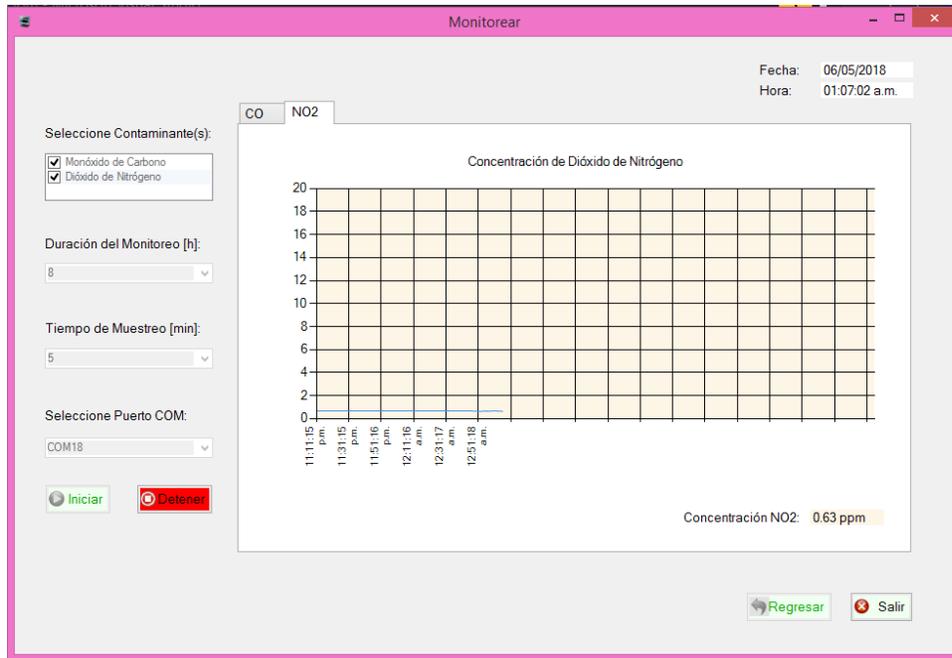
**Tabla 2.5:** *Periodo de muestreo de los contaminantes atmosféricos*

Contaminante	Método de muestreo
Monóxido de Carbono (CO)	5 minutos cada 1 hora, durante 8 horas continuas
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	5 minutos cada 1 hora, durante 24 horas continuas

El monitoreo empezó a las 5:16 PM del día 06 de mayo del 2018 y terminó a las 1:11 AM del día siguiente. Las figuras 2.44 y 2.45 muestran las gráficas en tiempo real de los valores medidos por el subsistema de medición. Como se puede observar, los valores obtenidos de ambos contaminantes fueron constantes durante todo el periodo de monitoreo.

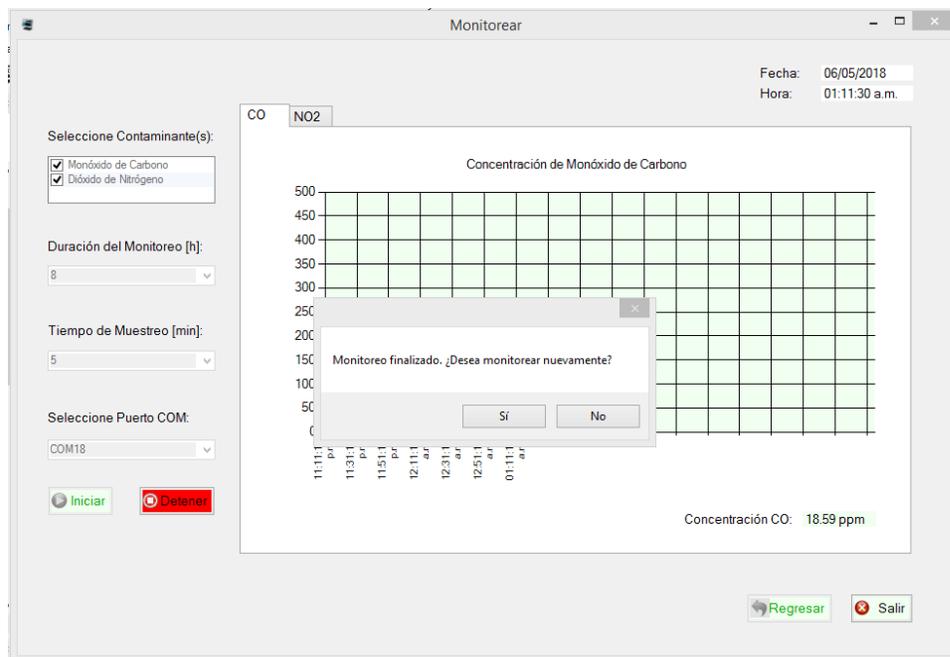


**Figura 2.44:** *Valores medidos durante periodo de monitoreo de CO. (Captura de pantalla).*



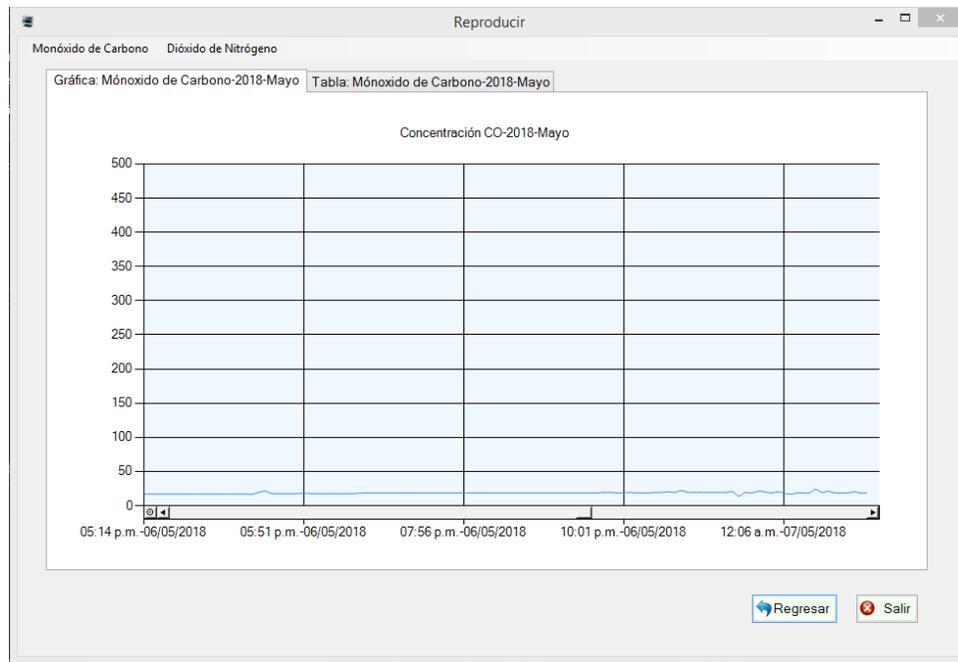
**Figura 2.45: Valores medidos durante periodo de monitoreo de NO<sub>2</sub>. (Captura de pantalla).**

La figura 2.46 muestra el instante en que la interfaz detiene el monitoreo realizado, tras haber transcurrido la toma de muestras, efectuada durante las 8 horas continuas, y pregunta al usuario si desea monitorear nuevamente o no.

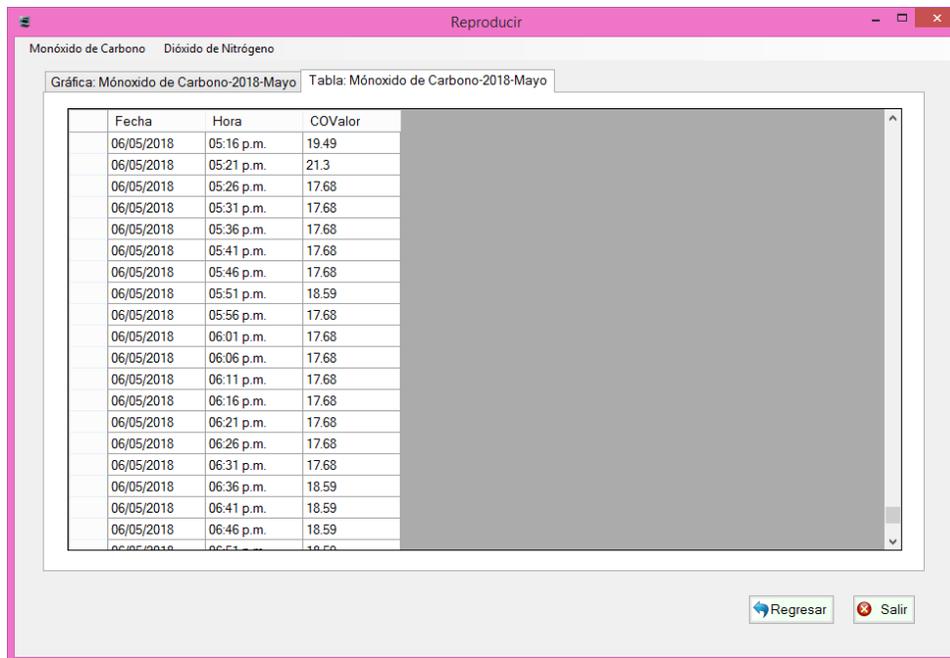


**Figura 2.46: Finalización de monitoreo. (Captura de pantalla).**

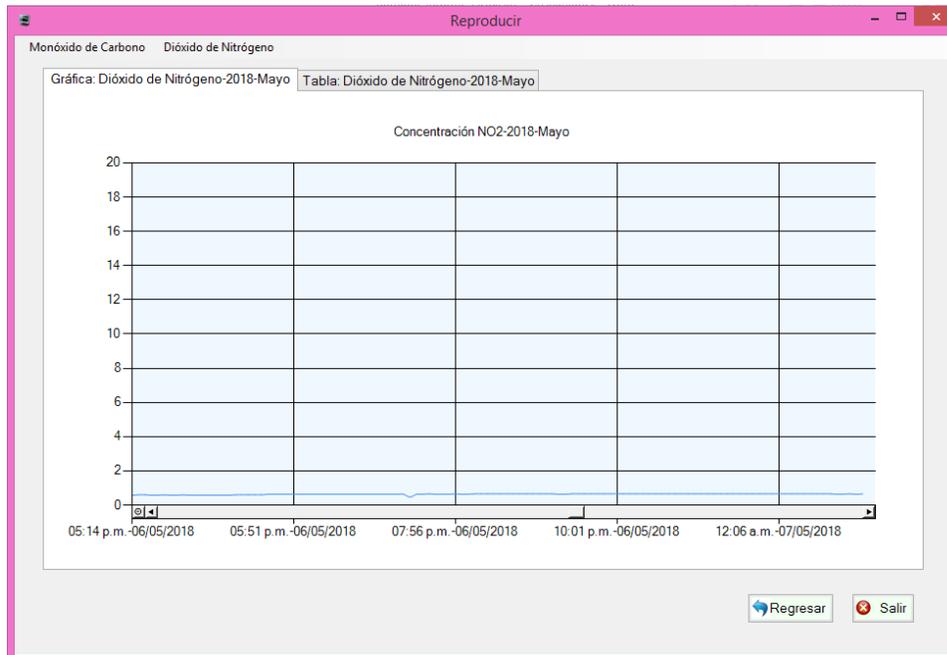
Las figuras 2.47, 2.48, 2.49 y 2.50 muestran las gráficas y tablas producto del monitoreo realizado. Estas gráficas y tablas se obtuvieron en la función de reproducción de la interfaz gráfica, al seleccionar el mes de mayo para cada uno de los contaminantes. Las primeras dos muestran los resultados de las mediciones de monóxido de carbono, y las últimas dos, del dióxido de carbono.



**Figura 2.47: Gráfica de valores medidos de CO almacenados en la base de datos. (Captura de pantalla).**



**Figura 2.48: Tabla de datos obtenidos durante el periodo de monitoreo de CO. (Captura de pantalla).**



**Figura 2.49: Gráfica de valores medidos de NO<sub>2</sub> almacenados en la base de datos. (Captura de pantalla).**

Reproducir

Monóxido de Carbono Dióxido de Nitrógeno

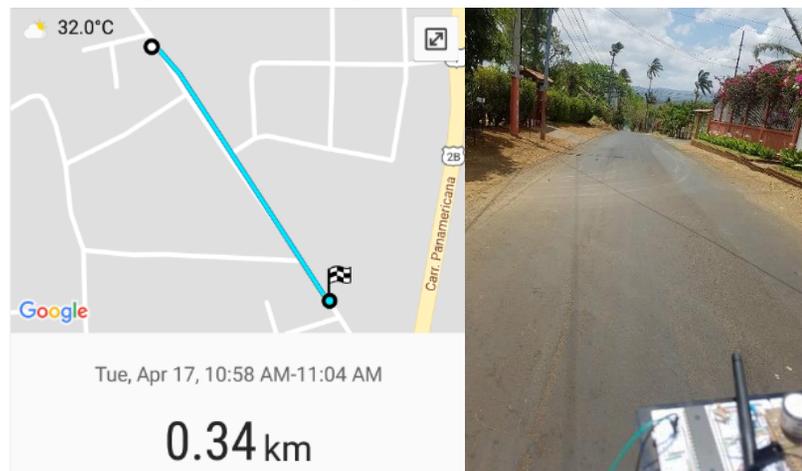
Gráfica: Dióxido de Nitrógeno-2018-Mayo Tabla: Dióxido de Nitrógeno-2018-Mayo

Fecha	Hora	NO2Valor
06/05/2018	05:16 p.m.	0.6
06/05/2018	05:21 p.m.	0.6
06/05/2018	05:26 p.m.	0.6
06/05/2018	05:31 p.m.	0.63
06/05/2018	05:36 p.m.	0.63
06/05/2018	05:41 p.m.	0.63
06/05/2018	05:46 p.m.	0.63
06/05/2018	05:51 p.m.	0.63
06/05/2018	05:56 p.m.	0.63
06/05/2018	06:01 p.m.	0.63
06/05/2018	06:06 p.m.	0.63
06/05/2018	06:11 p.m.	0.63
06/05/2018	06:16 p.m.	0.63
06/05/2018	06:21 p.m.	0.63
06/05/2018	06:26 p.m.	0.63
06/05/2018	06:31 p.m.	0.63
06/05/2018	06:36 p.m.	0.63
06/05/2018	06:41 p.m.	0.63
06/05/2018	06:46 p.m.	0.63
06/05/2018	06:51 p.m.	0.63

Regresar Salir

**Figura 2.50: Tabla de datos obtenidos durante el periodo de monitoreo de NO<sub>2</sub>. (Captura de pantalla).**

La distancia entre el nodo sensor y la computadora donde se efectuó este monitoreo fue de 4.55 metros, para efectos de prueba. Sin embargo, previamente, se hicieron otras pruebas de rango, para el intercambio de información empleando la tecnología de comunicación inalámbrica, en las que se alcanzó a una distancia de 340 metros en línea de vista. Estas pruebas de distancia se realizaron en la entrada al residencial “Altos de Ticomó” y la distancia se determinó con ayuda de la aplicación Samsung Health (ver figura 2.51).



**Figura 2.51: Pruebas de distancia realizadas.**

## 2.11 Costo del sistema de monitoreo

Los componentes principales que se utilizaron para la implementación de este prototipo de medición fueron importados, debido a que no se encuentran disponibles en el país. Por otra parte, los componentes básicos como resistores, capacitores y circuitos integrados comunes como reguladores de voltaje, fueron adquiridos en el mercado nacional. En la tabla 2.6 se muestra el costo de cada componente, en dólares y en córdobas en el caso de los componentes importados, y sólo en córdobas para los componentes que se compraron en Nicaragua. La tasa de cambio del dólar que se usó fue de treinta y un córdobas y veinticinco centavos (C\$ 31.25). Al hacer la conversión, empleando la tasa de cambio especificada, el equipo desarrollado tiene un costo de seiscientos cincuenta y cuatro dólares y cuarenta y siete centavos (\$ 654.47).

<b>Tasa de Cambio:</b>	C\$31.25
------------------------	----------

**Tabla 2.6:** *Costos de elaboración de sistema de monitoreo de calidad del aire.*

Cantidad	Artículo	Precio Unitario [\$]	Precio Unitario [C\$]	Importe [C\$]
<b>Compras en línea</b>				
1	PIC 18F45K22	\$5.03	C\$157.02	C\$157.02
2	XBee Pro 60mW U.FL Connection	\$56.93	C\$1,778.74	C\$3,557.47
2	Antena de media onda 2.4 GHz	\$7.50	C\$234.35	C\$468.71
1	SparkFun XBee Explorer Dongle	\$37.43	C\$1,169.42	C\$1,169.42
1	SparkFun XBee Explorer Regulated	\$14.93	C\$466.36	C\$466.36
2	AFE Configurable LMP91000	\$6.54	C\$204.36	C\$408.71
1	RTC DS3234	\$29.93	C\$935.07	C\$935.07
1	Módulo para tarjeta MicroSD	\$11.25	C\$351.53	C\$351.53
1	Sensor 4CO-500		C\$3,000.00	C\$3,000.00
1	Sensor 4NO2-20		C\$4,000.00	C\$4,000.00

<b>Compras en el país</b>				
1	Tarjeta MicroSD HC de 4 Gb		C\$268.00	C\$268.00
1	Inspección aduanal de Telcor para antenas de telecomunicaciones		C\$285.00	C\$285.00
1	Batería para RTC de 12 mm		C\$62.00	C\$62.00
1	Batería de 9 V		C\$160.00	C\$160.00
1	Regulador de voltaje LM7805		C\$20.00	C\$20.00
1	Capacitor electrolítico de 0.33 uF		C\$10.00	C\$10.00
5	Capacitor electrolítico de 0.1 uF		C\$10.00	C\$50.00
2	Capacitor electrolítico de 10 uF		C\$10.00	C\$20.00
2	Capacitor cerámico de 10 nF		C\$10.00	C\$20.00
10	Resistencias 1/4 W de diferentes valores		C\$3.00	C\$30.00
1	Push Button		C\$4.00	C\$4.00
1	Interruptor		C\$20.00	C\$20.00
1	Barrel Jack		C\$19.00	C\$19.00
1	Base de 40 pines		C\$30.00	C\$30.00
1	LCD 4x20		C\$300.00	C\$300.00
1	Tarjeta de Fibra de Vidrio		C\$80.00	C\$80.00
1	Impresión para PCB		C\$30.00	C\$30.00
1	Paquete de 40 Pin Headers Hembra		C\$15.00	C\$15.00
1	Paquete de 40 Pin Headers Macho		C\$15.00	C\$15.00
<b>Mano de Obra</b>				C\$4,500.00
<b>TOTAL</b>				<b>C\$20,452.28</b>

Cabe destacar que si se añaden los sensores correspondientes a la medición de los niveles de concentración de los gases dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y ozono (O<sub>3</sub>), con los cuales el circuito acondicionador de señal del sistema puede interactuar, el equipo aumentaría su costo en una cantidad de 210 dólares (\$ 210). Asimismo, si se considera en el valor total, la elaboración de una carcasa que cumpla con las especificaciones establecidas en los estándares internacionales

para su uso en condiciones al aire libre, el costo puede aumentar en una cantidad estimada de 300 dólares (\$ 300). Añadiendo estas mejoras al costo inicial de seiscientos sesenta dólares (\$ 660), el prototipo tendría un costo aproximado de mil doscientos dólares (\$ 1200).

La tabla 2.7 muestra una comparación de este costo estimado del prototipo con los precios de algunos equipos comerciales que poseen prestaciones similares al equipo desarrollado. Si bien los otros equipos son capaces de medir una mayor cantidad de contaminantes, al incorporar las mejoras descritas, el prototipo propuesto sería considerablemente menos costoso que alguno de ellos.

**Tabla 2.7:** *Comparación de precios con equipos existentes en el mercado*

<b>Equipo</b>	<b>Precio</b>
Kit de Valarm	\$ 4990
Kit de Aeroequal	\$ 5244
Kit de Libelium	\$ 6440
Prototipo desarrollado	~\$ 1200

Cabe señalar que los precios de estos kits, no incluyen costos de envío y aduanales, ni impuestos. Esto quiere decir que, para adquirirlos comercialmente en el país, se deben añadir estos costos al precio inicial, lo que implica una mayor inversión inicial para los entes interesados. Por otro lado, el equipo propuesto, al ser una solución desarrollada por profesionales nicaragüenses, contaría con el soporte técnico calificado en el territorio nacional, y estaría disponible en poco tiempo y con una inversión mucho menor.

# Conclusiones y Recomendaciones

---

## Conclusiones

Al finalizar este trabajo monográfico se logró realizar el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de calidad del aire, el cual obtiene las concentraciones de monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno y luego, envía inalámbricamente las mediciones hacia una interfaz gráfica donde se puede apreciar el comportamiento de los gases remotamente. El sistema muestra también en el punto de medición los valores de las mediciones, y la hora y la fecha.

A continuación, se presentan las conclusiones en base a los objetivos específicos planteados para lograr el objetivo general de este trabajo monográfico.

- En el diseño del sistema de medición, se seleccionó un circuito integrado AFE, que permitió optimizar la etapa correspondiente al acondicionamiento de señal, puesto que las señales de corriente de salida de los sensores en el orden de los microamperios, se pudieron adecuar a un voltaje perceptible por el microcontrolador.
- Se realizó el diseño e implementación de un sistema de comunicación inalámbrica para la transmisión/recepción de datos entre el nodo de monitoreo y la interfaz gráfica desarrollada que, según las pruebas realizadas, permite un alcance de hasta 340 metros en línea de vista.
- La interfaz gráfica desarrollada, utilizando software libre, permite al usuario final obtener en tiempo real la información proporcionada por el nodo de monitoreo, almacenarla en una base de datos, y realizar funciones tales como reproducción y comparación de datos, facilitando así el análisis de los valores medidos.
- Se verificó el funcionamiento de los subsistemas a nivel de simulación y a nivel de tabla de nodos, para poder identificar fallas o errores de diseño, y luego hacer las correcciones y mejoras necesarias para la tarjeta de circuito impreso final.

- Se verificó la efectividad del sistema en general, mediante las pruebas correspondientes, una vez integrados todos los subsistemas en un circuito impreso para observar su comportamiento y así poder realizar los debidos ajustes.
- Las pruebas realizadas al aire libre, se llevaron a cabo tomando en cuenta, tanto los periodos de monitoreo, como los criterios para la ubicación de la altura de la toma de muestras, los cuales se encuentran establecidos en la norma técnica nicaragüense de calidad del aire para ambos gases. De esta manera, se pudo verificar el funcionamiento correcto del sistema.

## **Recomendaciones**

El sistema de monitoreo remoto de gases contaminantes del aire desarrollado es capaz de detectar la concentración de monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno y envía correctamente las mediciones hacia la interfaz gráfica. Sin embargo, es necesario implementar algunas mejoras que ayuden a incrementar el nivel de funcionalidad del sistema, brindando así mayor confiabilidad y seguridad en la calidad del equipo. Tales recomendaciones son las siguientes:

- Agregar al sistema, los sensores correspondientes a las mediciones de los otros gases contemplados en la norma técnica nicaragüense de calidad del aire.
- Crear una red de monitoreo que permita conocer los distintos niveles de concentración de los gases contaminantes del aire en distintos puntos de interés.
- Incorporar al sistema la capacidad de conectarse a Internet para permitir que el usuario pueda recibir las mediciones desde cualquier punto.
- Utilizar sensores calibrados para la obtención de mediciones más confiables.
- Desarrollar un tipo de carcasa más resistente a condiciones exteriores tales como polvo, lluvia, y otros, que cumpla con los estándares internacionales.

## Bibliografía

---

- Aeroqual. (2018). *Outdoor Portable Monitor Pro Kit*. Obtenido de Aeroqual: <https://www.aeroqual.com/product/outdoor-portable-monitor-pro-kit>
- Álvarez M., R. (17 de Septiembre de 2016). *Contaminación del aire genera muertes y pérdidas en Nicaragua*. Obtenido de LA PRENSA: <http://www.laprensa.com.ni/2016/09/17/nacionales/2101606-contaminacion-del-aire-genera-muertes-perdidas-nicaragua>
- Banco Mundial. (8 de Septiembre de 2016). *La contaminación atmosférica le cuesta USD 225 mil millones a la economía mundial*. Obtenido de Banco Mundial: <http://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2016/09/08/air-pollution-deaths-cost-global-economy-225-billion>
- Bendaña, J. C., Rosales Centeno, G., Otero, J., Cruz, H., Choza, A., Yescas, N., . . . Solano Lacayo, N. (6 de Noviembre de 2002). *Norma técnica obligatoria nicaragüense de calidad del aire*. Obtenido de Asamblea Nacional de Nicaragua: <http://sajurin.enriquebolanos.org/vega/docs/Gaceta%20211-2002.pdf>
- Bentley, J. P. (2005). *Principles of Measurement System*. Inglaterra: Pearson Education.
- Brienza, S., Galli, A., Anastasii, G., & Bruschi, P. (26 de Mayo de 2015). A Low-Cost Sensing System for Cooperative Air Quality Monitoring in Urban Areas. *Sensors*. Obtenido de MDPI: <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/6/12242>
- Dávila Altamirano, R. (2000). *Estudio comparativo de contaminantes: PM10, NO2, y O3 durante 1997 y 1998 en tres puntos de alto tráfico vehicular en la ciudad Managua*. Managua: Universidad Nacional de Ingeniería.
- DESIGNSPARK. (20 de Abril de 2015). *11 Internet of Things (IoT) Protocols You Need to Know About*. Obtenido de DESIGNSPARK: <https://www.rs-online.com/designspark/eleven-internet-of-things-iot-protocols-you-need-to-know-about>
- DIGI. (s.f.). *ZIGBEE WIRELESS STANDARD*. Obtenido de DIGI: <https://www.digi.com/resources/standards-and-technologies/rfmodems/zigbee-wireless-standard>

- Elmasri, R., & B. Navathe, S. (2011). *Database Systems*. Estados Unidos: Pearson Education.
- Flores, A. R. (Mayo de 2014). *Mediciones Ambientales*. Obtenido de Universidad del Santa: [http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/energiaamb\\_2014u1\\_4.pdf](http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/energiaamb_2014u1_4.pdf)
- García, E. (2008). *Compilador C CCS y simulador PROTEUS para Microcontroladores PIC*. México : Alfaomega Grupo Editor .
- Halvorsen, H.-P. (26 de Septiembre de 2016). *Introduction to Visual Studio and C#*. Obtenido de University College of Southeast Norway: <http://home.hit.no/~hansha/documents/microsoft.net/tutorials/introduction%20to%20visual%20studio/Introduction%20to%20Visual%20Studio%20and%20CSharp.pdf>
- Ibrahim, D. (2008). *Advanced PIC Microcontroller Projects in C (From USB to ZIGBEE with the PIC 18F Series)*. Oxford: ELSEVIER Newnes.
- Ibrahim, D. (2010). *SD Cards Projects Using the PIC Microcontroller*. Oxford: Elsevier.
- Instruments, T. (2016). *LMP91000 Configurable AFE Potentiostat for Low-Power Chemical Sensing Applications*. Obtenido de Texas Instruments: <http://www.ti.com/product/LMP91000>
- LA PRENSA. (29 de Agosto de 2002). *Managua con aire más sucio*. Obtenido de LA PRENSA / Nacionales: <http://www.laprensa.com.ni/2002/08/29/nacionales/846886-managua-con-aire-ms-sucio>
- Libelium. (2017). *Product Catalogue 2017*. España.
- LoRa Alliance. (2015). *LoRaWAN What is it? A technical overview of LoRa and LoraWAN*. Obtenido de LoRa Alliance, Wide Area Networks for IoT: <https://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRaWAN101.pdf>
- Mayné, J. (2015). *Estado actual de las comunicaciones inalámbricas*. Obtenido de JCEE 2014: [http://www.jcee.upc.edu/JCEE2004/pdf/EstadoActual\\_WirelessRF\\_SILICA.pdf](http://www.jcee.upc.edu/JCEE2004/pdf/EstadoActual_WirelessRF_SILICA.pdf)

- MikroElektronika; Hi-Tech-C Compilers. (s.f.). *PIC Microcontrollers – The basics of C programming language*. Obtenido de Universidad de Belgrado: [http://tnt.etf.rs/~ir3ode/pdf/vezbe/support\\_c.pdf](http://tnt.etf.rs/~ir3ode/pdf/vezbe/support_c.pdf)
- Morris, A., & Langari, R. (2012). *Measurement and Instrumentation, Theory and Application*. San Diego, California: Elsevier Inc.
- MySQL. (13 de Marzo de 2017). *MySQL 5.7 Reference Manual*. Obtenido de MySQL: <https://downloads.mysql.com/docs/refman-5.6-en.pdf>
- National Instruments. (23 de Marzo de 2012). *Serial Communication Overview*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: <http://www.ni.com/white-paper/2895/en/>
- OMS. (27 de Septiembre de 2016). *La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/air-pollution-estimates/es/>
- Oyarzún G., M. (2010). *Contaminación aérea y sus efectos en la salud*. Obtenido de Scielo Chile: <http://www.scielo.cl/pdf/rcher/v26n1/art04.pdf>
- Pallás Areny, R. (2005). *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Barcelona: Marcombo, S. A.
- Pérez Mercado, E. J., & Conde Gómez, E. L. (2014). *Medidor de Calidad Ambiental para MARENA*. Obtenido de ÁLVARO ANTONIO GAITÁN: <https://alvarogaitanuni.files.wordpress.com/2014/09/articulo-erick-conde-elmer-perez.pdf>
- Romero Placeres, M., Diego Olite, F., & Álvarez Toste, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*.
- Sins, C. (1 de Marzo de 2011). *A new class of sensor analog front ends*. Obtenido de Sensors online : <http://www.sensorsmag.com/components/a-new-class-sensor-analog-front-ends>
- Sparkfun. (s.f.). *Bluetooth Basics a learn.sparkfun.com tutorial*. Obtenido de Sparkfun: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/bluetooth-basics/all.pdf>
- Suntaxi Pichuasamin, J. (Enero de 2015). *Diseño y construcción de un prototipo portátil de monitoreo ambiental, mediante un sistema autónomo de adquisición de datos portátil con comunicación USB hacia un PC*. Obtenido

de Escuela politécnica Nacional:  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9078/3/CD-6049.pdf>

Technology, International Sensor. (s.f.). *Chapter 2: Electrochemical Sensors*.  
Obtenido de International Sensor Technology :  
<http://www.intlsensor.com/pdf/electrochemical.pdf>

Universidad de Buenos Aires. (s.f.). *Contaminación atmosférica*. Obtenido de  
Universidad de Buenos Aires (Facultad de Agronomía):  
[://www.agro.uba.ar/users/semmarti/Atmosfera/contatmosf.pdf](http://www.agro.uba.ar/users/semmarti/Atmosfera/contatmosf.pdf)

Universidad de Sevilla. (s.f.). *Interfaz gráfica de usuario*. Obtenido de Biblioteca  
de Ingeniería, Universidad de Sevilla:  
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11300/fichero/PROYECTO%252FCapitulo3.pdf>

Valarm. (2018). *AIR QUALITY MONITORING KIT - PARTICULATE MATTER, DUST, PM1, PM2.5, PM10, SPECIFIC GASES, O3, NO2, VOCS PID, YOCTOPUCE + ALPHASENSE SENSORS FOR YOUR INDUSTRIAL IOT TELEMETRY WITH TOOLS*. VALARM.NET. Obtenido de Valarm:  
<https://shop.valarm.net/collections/kits/products/air-quality-monitoring-kit-particulate-matter-dust-pm1-pm2-5-pm10-specific-gases-o3-no2-vocs-pid-alphasense-yoctopuce-sensors-for-tools-valarm-net>

Wei-Ying, Y., Kin-Ming, L., Terrence, M., Kwong-Sak, L., Yee, L., & Mei-Ling, M. (2015). A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems. *Sensors*.

Zarr, R. (24 de Junio de 2013). *The Evolution Of Sensor Analog Front Ends*.  
Obtenido de Electronic Design :  
<http://www.electronicdesign.com/analog/evolution-sensor-analog-front-ends>