UNIVERSIDAD VERACRUZANA
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS
Campus Tuxpan

Maestría en Ciencias del Ambiente

Sistema de Medición Electrónico de Gases Contaminantes Basado en Tecnología Libre en la Ciudad de Poza Rica

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias del Ambiente

Presenta

Macario Isaías Barrios Melchor

Director de Tesis:

Dr. Alberto Manuel Benavides Cruz

Co - Director de Tesis

Dra. Aurora E. Galicia Badillo

Tuxpan, Ver. 2014

El presente Trabajo de intervención titulado: **"Sistema de medición electrónico de gases contaminantes basado en tecnología libre en la ciudad de Poza Rica"**, realizado por el C. Macario Isaías Barrios Melchor, bajo la dirección del DR. ALBERTO MANUEL BENAVIDES CRUZ y asesoría del consejo particular de la DRA. AURORA E. GALICIA BADILLO, ha sido revisado y aprobado como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AMBIENTE

DR. ALBERTO MANUEL BENAVIDES CRUZ

DIRECTOR

DRA. AURORA E. GALICIA BADILLO

CODIRECTOR

Tuxpan de Rodríguez Cano, Ver. enero 2015

Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA
Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
Maestría en Ciencias del Ambiente

Universidad Veracruzana

Revisión del trabajo de intervención del alumno: **Macario Isaías Barrios Melchor**

Nombre	Fecha	Dictamen	Firma
Mtra. Blanca Esther Raya Cruz	06/01/2015	Aprobado	
Dra. Rosa Idalia Hernández H.	06/01/2015	Aprobado	
Mtro. Roberto Santiago Bravo	06/01/2015	Aprobado	

En la presente revisión se acordó que el trabajo de intervención denominado "Sistema de medición electrónico de gases contaminantes basado en tecnología libre en la ciudad de Poza Rica" que presenta el sustentante para obtener el Título de Maestro, está terminado por lo que puede proceder a su inmediata impresión.

Agradecimientos

Al Dr. ALBERTO MANUEL BENAVIDES CRUZ, mi director de tesis, es un intelectual a quien admiro por ser una persona de gran calidad humana y por su completo e invaluable apoyo al dirigirme en mi proyecto de intervención, por su presencia incondicional, sus apreciados y relevantes aportes, críticas, comentarios y sugerencias.

A la DRA. AURORA GALICIA BADILLO, mi Co-directora de tesis, por su constante y paciente seguimiento, también por compartir su tiempo de manera generosa durante el desarrollo del presente trabajo.

A la DRA. ROSA IDALIA HERNANDEZ HERRERA, mi tutora, por su participación y empuje al inicio y parte del desarrollo de mi proyecto, por su constante espíritu servicial, desinteresada colaboración, lectura del manuscrito y las sugerencias y críticas constructivas.

Al DR. SERGII TORBA: por su desinteresada colaboración y asistencia profesional al poner a disposición toda su información estadística, lo que facilito el análisis con detalle en el proyecto, y por su sostenido apoyo moral.

A las siguientes instituciones que contribuyeron con el aporte de información, servicios e instalaciones: Facultad de Biología de la UV campus Tuxpan, Facultad de Ingeniería de la UV Campus Poza Rica, CINVESTAV campus Querétaro.

A los miembros del jurado de esta tesis por sus valorables sugerencias a la versión original del manuscrito, que contribuyeron al mejoramiento y ordenamiento del presente trabajo.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado como becario con numero 279155 durante la realización de este proyecto.

Dedicatorias

A MIS PADRES:

José Isaías Barrio Cruz

Ofelia Melchor Almora (q.p.d)

Con agradecimientos por haberme educado en la medida de sus posibilidades y transmitirme sus fuerzas morales y energía perseverante, para seguir adelante.

A MIS HERMANAS:

Alma Rosa

América Patricia

Por todo su apoyo, consejos, paciencia, muestras de afecto y por transmitirme las ganas de superación.

A MIS SOBRINOS:

Carlos Eduardo

Edgar Javier

Manuel Alejandro

Hanna Patricia

Índice General

Agradecimientos ii

Dedicatoria iii

Índice general iv

Índice de cuadros v

Índice de figuras v

Resumen vi

Introducción..... 1

Antecedentes 3

Objetivo general 9

Objetivos específicos 9

Área de Estudio..... 10

Materiales y Métodos 11

Resultados 19

Discusión 28

Conclusión 35

Bibliografía 36

Anexo 1 41

Anexo 2 46

Anexo 3……..…….47

Anexo 4……48

Índice de cuadros

Cuadro 1. Características de microcontroladores de uso frecuente……..7

Cuadro 2. Prueba de diferencia de medias entre el sistema de medición diseñado y el industrial……24

Índice de figuras

Fig. 1 Ubicación geográfica de Poza Rica de Hgo. y el punto de muestreo…….10

Fig. 2 Arduino UNO R3 ATMEL…….…...12

Fig. 3 Organización del sistema…….…...15

Fig. 4 Archivo base de datos.txt…….17

Fig. 5 Sistema de mediciones de gases colocados en el mismo punto geográfico……..…...18

Fig. 6 Ejemplos de Shields para Arduino UNO……..…20

Fig. 7 Circuito del microcontrolador del sistema de medición de gases……....22

Fig. 8 Niveles de concentración de ozono……...25

Fig. 9 Niveles de concentración de ozono de las primeras 100 horas…….26

Fig. 10 Niveles de concentración de monóxido de carbono……..27

Fig. 11 Niveles de temperatura……...…27

Resumen

El aumento de las emisiones de gases contaminantes ha impulsado una atención creciente a la vigilancia de la calidad del aire. La vigilancia se realiza mediante un monitoreo atmosférico industrial, el cual carece de resolución temporal, espacial, además de tener un gran consumo de energía y alto costo; por lo tanto da un panorama poco realista para la implementación de este tipo de técnicas en pequeñas y medianas ciudades. El monitoreo atmosférico usando sensores comerciales es un reto debido a su arquitectura y la falta de selectividad de los recursos electrónicos existentes. Por esta razón el objetivo del presente proyecto fue desarrollar y verificar un sistema de medición electrónico de gases contaminantes (ozono y monóxido de carbono) basado en tecnología libre, integrado por un microcontrolador llamado Arduino y conectado a redes de sensores comerciales, los sensores utilizados son el MQ-131 para la detección de ozono y el TGS 5042 para la detección de monóxido de carbono. El dispositivo fue comparado con un sistema de medición industrial en la ciudad de Poza Rica durante un mes, dando como resultado una herramienta como opción de monitoreo atmosférico, la exactitud del sistema diseñado mejora conforme aumenta la concentración de gases contaminantes, es de bajo costo y con una resolución espacial y temporal, además permite la posibilidad de adaptar una gran variedad de sensores para medir variables ambientales que se adecuen a las necesidades de los operadores.

Palabras claves: contaminación atmosférica, monitoreo atmosférico, microcontrolador, Arduino, MQ-131,TGS 5042.

Introducción

En la actualidad, el planeta está sufriendo una degradación de la calidad de un elemento vital; el cual es el aire, esto provocado por un aumento de emisiones de contaminantes gaseosos que son originados por el incremento de población en las ciudades, la industrialización, la productividad y el tráfico (Viricelle et al., 2006).

En México la principal actividad industrial es la explotación del petróleo, y el municipio de Poza Rica forma parte de una gran zona productora de petróleo y gas en la parte del Golfo de México (García-Cuellar, 2004), por lo tanto, en este municipio una de las fuentes de emisión importante son las instalaciones de Petróleos Mexicanos (PEMEX), en el año 2012 estas instalaciones presentaron un ligero incremento en relación de óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de carbono (COx), dichas emisiones aún se encuentran dentro de las Normas Oficiales Mexicanas, pero en valores muy cercanos a sobrepasarlas (PEMEX,2012). Además de la industria petrolera otras industrias como las energéticas provocan emisiones contaminantes, en ejemplo de esto es la planta Termoeléctrica “Adolfo López Mateos”, ubicada en Tuxpan; la cual es otra fuente de emisión de gases contaminantes, estos gases se dispersan principalmente al sur; afectando a Poza Rica (López et al., 2005, Almanza et al., 2013). Otro factor que genera gases contaminantes; es el aumento de población y parque vehicular que se ha presentado en los últimos años en la zona conurbada del municipio (INEGI, 2010).

Por lo tanto, es de gran importancia la vigilancia de la contaminación del aire en esta ciudad; para limitar y controlar sus efectos, es indispensable conocer los niveles de gases contaminantes en la atmosfera y sus riesgos de exposición (Seinfeld & Pandis, 2012). Al realizar monitoreo de gases, es necesario instalar

redes de estaciones de base de espectrómetros industriales en puntos estratégicos, sin embargo estas redes carecen de resolución temporal, espacial, además tienen un gran consumo de energía y alto costo; lo cual da un panorama poco realista para la implementación de este tipo de técnicas (Tsujita et al.,2005)

En la última década, han surgido diversas tecnologías que se pueden adoptar para la medición de gases contaminantes, una de esas alternativas son el uso de microcontroladores, ya que se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones como la de ser el controlador central para realizar múltiples tareas, tales como la lectura de información de diferentes sensores, realizar el protocolo de red, el procesamiento de señales, la gestión del consumo de energía, entre otras (Guo et al., 2011). Los microcontroladores conectados a un banco de sensores electrónicos comerciales permiten desarrollar sistemas de detección de gases compactos, de bajo costo y confiables (De Caterina & Zampolli, 2004, Tsujita et al.,2005).

Por tal motivo el presente proyecto propone diseñar, implementar y verificar un sistema de medición electrónico de gases contaminantes basado en tecnologías libre y redes de sensores.

Antecedentes

La atmósfera es una delgada capa de gases, partículas y nubes que rodea el planeta, anualmente está siendo afectada por miles de millones de toneladas de contaminantes. Entre los principales contaminantes se encuentran los CO_x, NO_x, y el ozono (Ramanathan y Feng, 2009).

Una de las fuentes principales de monóxido de carbono (CO) es la oxidación del metano (CH_4), así como procesos tecnológicos (combustión y procesos industriales), la quema de biomasa y la oxidación de otros hidrocarburos diferentes al metano. Se estima que alrededor de dos tercios de las emisiones de CO provienen de actividades antropogénicas. (Seinfield y Pandis, 2012)

El ozono troposférico (O3) se forma en la atmósfera por la reacción fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles (COV) y NOx debido a la presencia de la luz solar. Los COV se emiten desde una variedad de acciones por el hombre y fuentes naturales. Las fuentes antropogénicas incluyen a los vehículos de motor, plantas químicas, refinerías, fábricas de consumo y otras fuentes industriales (Seinfield y Pandis, 2012). El ozono ha tenido un aumento generalizado en sus concentraciones desde finales del siglo XIX y en la actualidad ha tenido un gran crecimiento de emisiones de este gas, siendo el continente Asiático el principal productor, y como cada parte del mundo está conectada por el transporte atmosférico, estas emisiones están afectando a todo el planeta (Cooper et al., 2010).

De acuerdo a Bernard y col. (2001) los efectos de estos gases contaminantes en la población que ha sido expuesta a altas concentraciones en un periodo largo de tiempo son la disminución de la función pulmonar, inflamación pulmonar, disminución de la capacidad para realizar ejercicio, angina de pecho, problemas cardiacos y mortalidad prematura.

El país de México durante los últimos cincuenta años ha construido una de las mayores economías industriales del mundo en desarrollo. Sin embargo, la regulación ambiental ha recibido escasa atención. El resultado ha sido la contaminación del aire, siendo la ciudad de México una de las más contaminadas en el mundo, y otras ciudades del país también están sufriendo de la contaminación excesiva (Dasgupta et. al.,2000).

En México existen normas oficiales para la detección de gases contaminantes en el aire ambiente, el monitoreo se realiza con analizadores electrónicos industriales, estos trabajan en las estaciones de calidad del aire ubicados en lugares estratégicos de la ciudad, que detectan y miden selectivamente muchos gases ambientales (Penza et al., 2012). El ozono de acuerdo a NOM-CCAM-003-ECOL/1993 para que los resultados tengan validez oficial requiere de equipos con técnicas de luminiscencia química la cual se basa en la capacidad que tiene el ozono de emitir luz al reaccionar con etileno. El CO está regido por la NOM-034-SEMARNAT-1993 y establece que el equipo de detección debe aplicar la técnica de fotometría de absorción de radiación infrarroja.

Los datos obtenidos a partir de las estaciones de monitoreo ambiental son, sin duda, una colección de mediciones confiables en lugares representativos, pero pueden no reflejar los detalles de las verdaderas distribuciones espaciales de estos contaminantes, por lo tanto es necesario realizar una densa red de sistema de sensores de gas que para poder obtener información detallada sobre la contaminación del aire local, esto hace que este tipo de monitoreo se convierta en un método de alto costo y por este motivo es poco realista que las ciudades cuenten con ello (Tsujita et al., 2005).

Poza Rica es una ciudad petrolera desde el descubrimiento del yacimiento Poza Rica y en donde se encuentra el 18.7% de las reservas de gas, y por lo consiguiente tiene una gran inversión en plantas petroleras (Márquez, 2013). En el

año de 1950 una fuga de gas de ácido sulfhídrico (H_2S) provocó que 320 personas que viven alrededor de las refinerías fueran hospitalizadas y 22 murieran, los efectos nocivos de este accidente se pudieron haber prevenido con la oportuna detección de este gas mediante dispositivos (McCabe y Clayton, 1952).

La economía en Poza Rica depende en gran medida de la industria petrolera; esto y su actual crecimiento de población ha provocado altas emisiones de gases contaminantes (Almanza et al., 2013). A pesar de esto, Poza Rica no cuenta con un monitoreo de la gases contaminantes que indiquen el nivel de su calidad del aire (Gómez, 2006).

La tecnología en red de sensores es una tecnología clave para el futuro y ha sido identificadas como una de las tecnologías más importantes para el siglo XXI (Chong & Kumar, 2003). Las aplicaciones actuales y potenciales de las redes de sensores incluyen: militares, la seguridad física, el control del tráfico aéreo, vigilancia del tráfico terrestre, vigilancia por video, industrial y de fabricación, automatización, robótica y ambiental (Verdone et al., 2010)

En el campo ambiental existe muchas aplicaciones para las redes de sensores, algunas pueden ser: la vigilancia, el control del clima interior del medio ambiente, monitoreo estructural, la gestión de desastres, respuesta a emergencias, el monitoreo del aire ambiental y la recolección de información de detección en lugares inhóspitos entre muchas otras que falta por explorar (Mártinez et al., 2004).

Para lograr realizar este tipo de redes de sensores ambientales es necesario conocer tres diferentes áreas de investigación: la detección, la comunicación y la informática (Chong y Kumar, 2003).

Para cumplir con la detección y comunicación según Martínez (2004) las redes de sensores deben tener los siguientes requisitos:

• Bajo costo: por lo que muchas unidades se pueden producir.

• Bajo consumo: para operaciones a largo plazo.

• Automatizado: libre de mantenimiento

• Robusto: soportar los errores y fracasos.

• No intrusivo: baja perturbación ambiental.

• La contaminación baja

Y cuando se habla de la informática, se hace referencia que los sensores deben de ser conectados a un dispositivo capaz de procesar las señales, gestionar y visualizarlas (Guo et al., 2011); el dispositivo capaz de realizar esa tarea es el microcontrolador, el cual, debe seguir los mismos requisitos de los sensores por eso es muy importante la selección de este en los diseños de las redes (Khedo et al., 2010).

Según Saponara y col. (2007) un microcontrolador se encarga de gobernar uno o más procesos, la diferencia radica en su mayor flexibilidad siendo considerado un pequeño computador con funciones operacionales de mayor potencial en un tamaño muy compacto, compuestos por un microchip que es el corazón del microcontrolador.

Cady (2009) menciona que a la hora de escoger el microcontrolador a emplear en un diseño concreto hay que tener en cuenta multitud de factores, como la documentación y herramientas de desarrollo disponibles y su precio, la cantidad de fabricantes que lo producen y por supuesto las características del microcontrolador como:

- Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para Contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.

- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, Puertas Serie y Paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

Entre las marcas de microcontroladores de uso frecuente para la recolección de datos ambientales se encuentran ATMEL, Microchip, Texas Instruments (TI), Freescale (Navarro et al., 2010). El cuadro 1 muestra las características de las distintas marcas antes mencionadas.

Cuadro 1. Características de microcontroladores de uso frecuente.

Fabricante	Microchip	ATMEL	Freescale	TI
Microcontrolador	PIC16F877A	ATmega16u2	MC68HC908AP16	MSP430G2553
RAM en bytes	368	1024	1024	512
ROM en Kbytes	14	16	16	16
I/O	33	20	32	20
EEPROM bytes	256	1024	512	1024
Frecuencia Mhz	20	16	8	16
Open Software	Si	Si	Si	Si
Programación en alto nivel	Si	Si	Si	Si
Precio MXN	150	110	130	150

Fuente: Hojas de especificaciones técnicas

Los microcontroladores se componen de dos partes principales: la placa, que es la pieza de hardware que se trabaja cuando se generan los objetos, y el entorno del desarrollo integrado (IDE), la pieza de software que se ejecuta en su computadora. El IDE se utiliza para crear una unidad de código que se encarga de indicar a la tarjeta qué hacer (Sánchez y Canton, 2010).

Para la realización de la unidad de código es necesaria la utilización de bibliotecas (conjunto de archivos escritos en C), estas incrementan las funciones que puede realizar el microcontrolador, como pueden ser conectar a internet, almacenar dato en memoria y comunicación serial entre otras. Si una unidad de codigo no precisa de una biblioteca, simplemente borra su sentencia #include en la parte inicial de su código y no realiza esa tarea (Banzi, 2009).

El conjunto de estos avances tecnológicos, el uso de microcontroladores y las redes de sensores han permitido la miniaturización de sistemas de monitoreo del aire, así como la producción de más de estos por su bajo costo; esto a su vez aumenta en gran medida la vigilancia del aire ambiente y en algunos casos se abren nuevas técnicas para la toma de mediciones o permiten despliegues antes imposibles de sensores (Khedo et al., 2010).

Una de las ventajas de las redes de sensores en el monitoreo del aire son su miniaturización, bajo costo, bajo consumo de energía, detección espacial y temporal (Zampolli et al., 2004), y algunas desventajas de estas redes de sensores pueden ser la exactitud y confiabilidad de las mediciones, su tiempo de vida, la compatibilidad que existen entre los dispositivos (Jang et al., 2008).

Para el monitoreo de los niveles de contaminantes gaseosos en una ciudad mediana como Poza Rica, es necesario contar con un sistema de redes de sensores económicos, pequeños y con precisión, lo que permitirá recabar datos en tiempo real y tener más cobertura espacial para una mejor toma de decisiones sobre temas ambientales.

Objetivo general

- Verificar y analizar la variación del sistema de medición electrónico de gases contaminantes propuesto por el autor con el sistema de medición de gases contaminantes regido por las Normas Oficiales Mexicanas

Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de medición de gases contaminantes

- Implementar el sistema de medición de gases contaminantes

- Comparar los niveles obtenidos de concentración de gases contaminantes en Poza Rica del sistema de medición electrónico de gases contaminantes basado en tecnología libre y el sistema de medición de gases contaminantes regido por las Normas Oficiales Mexicanas

Área de Estudio

Poza Rica de Hidalgo, Veracruz de Ignacio de la Llave

Municipio ubicado entre los paralelos 20° 29’ y 20° 36’ de latitud norte; los meridianos 97° 24’ y 97° 29’ de longitud oeste; altitud entre 40 y 200 m. Colindando al norte con los municipios de Tihuatlán y Papantla; al este con el municipio de Papantla; al sur con los municipios de Papantla y Coatzintla; al oeste con los municipios de Coatzintla y Tihuatlán. Cuenta con un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (100%) y un rango de temperatura de 22 – 24°C.

El punto donde se realizó el muestreo es latitud 20.51902 norte y longitud 97.453920 oeste como se muestra en la fig. 1.

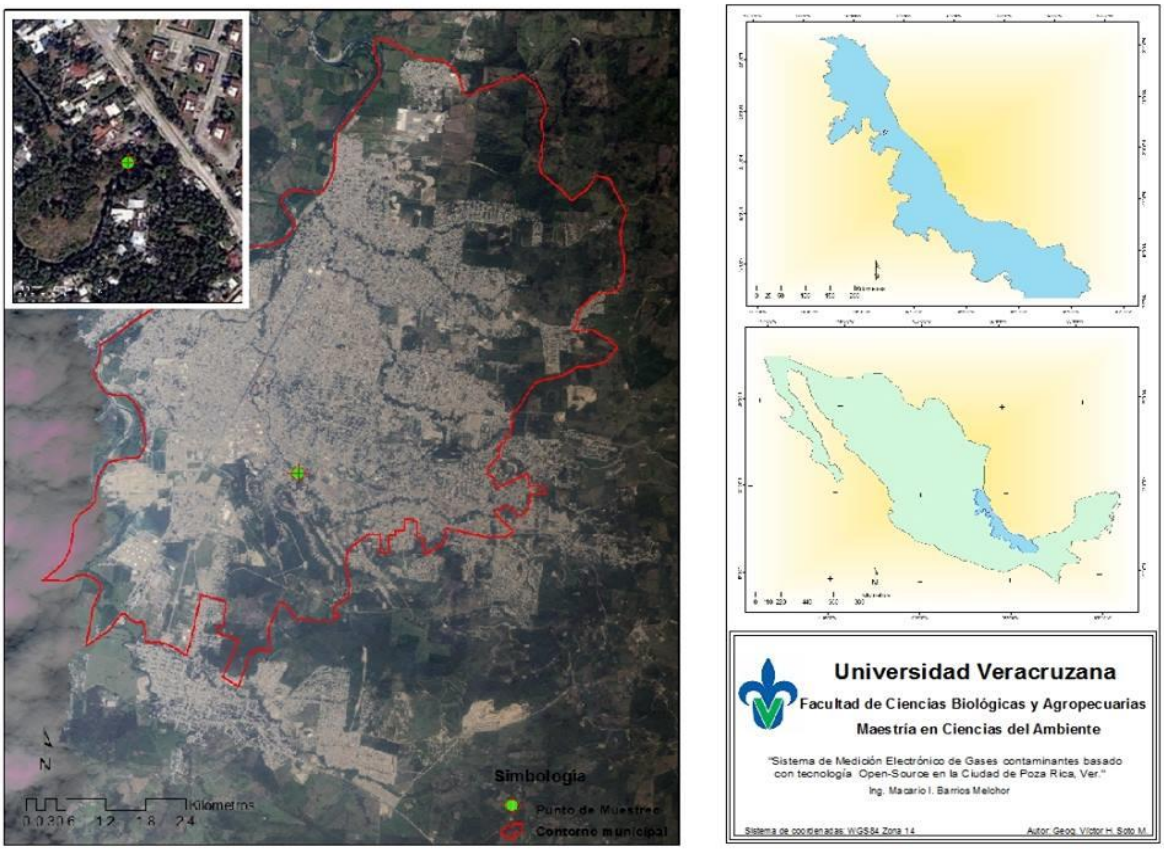


Fig. 1 Ubicación geográfica de Poza Rica de Hgo. y el punto de muestreo.

Materiales y Métodos

Para la realización del sistema de medición de gases contaminantes se tuvo que seguir los siguientes pasos:

- Selección del microcontrolador
- Selección de sensores
- Programación del microcontrolador
- Elección de bibliotecas
- Construcción del sistema
- Calibración del sistema
- Adquisición de datos
- Comparación de los datos del sistema diseñado y el sistema ya establecido

Selección del microcontrolador.

El microcontrolador se seleccionó de acuerdo a la aplicación, en este caso un medidor de gases contaminantes., el cual cuenta con las siguientes características mínimas requeridas:

- 4 entradas analógicas y digitales.
- Capacidad para guardar información en una base de datos.
- Que sea Hardware libre y trabaje con Software libre.
- EEPROM 512 bytes o mayor.
- Velocidad de trabajo 4 MHz o mayor.
- Económico

Aunado a otras características más prácticas como la posibilidad de programar con un lenguaje de programación de alto nivel (C, C++) y un montaje accesible en el armado del circuito.

El microcontrolador seleccionado fue el Arduino UNO R3 ATMEL, (Fig. 2).

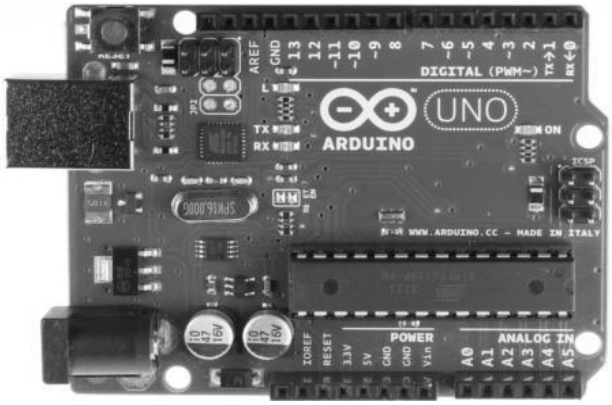


Fig. 2 Arduino UNO R3 ATMEL

Selección de los Sensores

La selección de los sensores se realizó con los siguientes criterios:

- Compatible con microcontroladores (Salidas analógicas o digitales)
- Rango de operación (Que comenzarán desde 0)
- Precisión
- Disponibilidad
- Económico

Los sensores utilizados para el diseño y armado del circuito fueron:

Sensor de ozono MQ-131

El sensor MQ-131 contiene un LED de indicador de señal, 2 vías de salida de la señal (salida analógica y salida TTL-nivel), la señal de salida TTL válida es baja; (luz baja señal de salida, que se puede acceder con cualquier puerto entrada-salida IO microcontrolador), salida analógica aumenta con la concentración, es decir, a mayor tensión será mayor la concentración. El sensor tiene una alta sensibilidad (rango de detección de 10 ppb concentración-0 ppm), con una larga vida y estabilidad fiable, características de reacción rápida, con agujeros de

montaje para la fácil instalación permanente. Su tamaño es de 32mm x 22mm x 30mm y cuenta con un voltaje de funcionamiento de corriente directa (DC) de 5V.

Sensor electroquímico de monóxido de carbono (CO) TGS 5042

El sensor TGS5042 del monóxido de carbono de Fígaro es un sensor electroquímico operable de la batería que ofrece varias ventajas sobre los sensores electroquímicos tradicionales: su electrolito es respetuoso del medio ambiente, no plantea ningún riesgo de salida del electrolito, no consume los materiales activos o sus electrodos durante la operación, y tiene sensibilidad más baja a los gases de interferencia. Con larga vida, buena estabilidad a largo plazo, y alta exactitud de ±5%, este sensor es una opción ideal para los detectores del CO con el indicador digital. Los clientes del OEM encontrarán datos individuales del sensor impresos en forma de la clave de barras en cada sensor, permitiendo el sensor individual que sigue y que permite a usuarios saltar la calibración costosa del gas. Utiliza un paquete batería-clasificado AA estándar, con un rango de detección de 0 a 10000 ppm.

Sensor de temperatura digital - TMP102

Esta es una tarjeta que detecta los cambios en la variable, este sensor tiene una resolución de 0.0625°C, con una exactitud de hasta 0.5°C; además requiere de muy poca corriente.

La comunicación con el TMP102 se realiza mediante una interfaz de dos vías serial. No posee regulador de voltaje por lo que es alimentarlo entre 1.4 y 3.6V de DC.

Logger Shield para Arduino (uSD + RTC) [DEV5H-09803]

La Logger Shield es una placa que tiene incorporado un reloj en tiempo real (RTC) y una tarjeta de memoria SD, esta Shield brinda capacidades de almacenamiento masivo para proyectos de almacenamiento de datos, entre otros

y adicionalmente proporciona la hora y fecha en tiempo real para crear una bitácora de capturas. La comunicación con la tarjeta microSD es realizada a través de la interfaz periférica serial (SPI). Las patillas de sistemas de reloj (SCK),datos de entrada (DI) y datos de salida (DO) de la microSD se conectan a las patillas digitales 11 a 13 del ATmega168/328's mientras que la patilla selección del chip (CS) está conectado a la patilla D10 del Arduino. Esta Shield trae soldado una ranura para microSD, LED indicador de alimentación rojo y un botón de reinicio.

El reloj está basado en un DS1338 Real Time Clock. Está totalmente ensamblado y pre-programado con la fecha y hora actual (Tiempo de Monterrey, NL). Incluye una batería de litio (CR1225 41mAh) que permitirá que el módulo funcione por un mínimo de 9 años (17 años es el valor típico) sin necesidad de una fuente externa de 5V. El DS1338 es accesado mediante protocolo I2C. Así mismo incluye un LED con su respectiva resistencia limitadora conectado a través de un puente de soldadura a la patilla de salida de onda cuadrada o digital (SQW) de tal forma que puedas monitorear de manera visual el segundero.

Programación del microcontrolador

Para programar la placa Arduino, primero debe instalar el entorno del desarrollo del integrado (IDE) que en este caso es la plataforma Arduino en su ordenador; se debe elegir la versión adecuada para el sistema operativo, ya sea Windows, Linux, Mac. Posteriormente cargar las bibliotecas a utilizar.

Elección de bibliotecas

Existe una lista de bibliotecas estándar. Algunas bilbiotecas están incluidas en el IDE Arduino, otras pueden ser descargadas desde una gran variedad de fuentes, las bibliotecas más comunes para la programación del dispositivo fueron:

- EEPROM - Para leer y escribir en memorias permanentes.
- ETHERNET - Para conectar a internet usando el Ethernet Shield.

- FIRMATA - Para comunicarse con aplicaciones en la computadora usando un protocolo estándar serial.
- LIQUIDCRYSTAL - Para controlar pantallas de cristal líquido (*LCD*)
- SERVO - Para controlar *servomotores*
- SOFTWARESERIAL - Para la comunicación serial de cualquier patilla digital.
- STEPPER - Para controlar motores paso a paso (*Stepper motors*)
- WIRE - Interfaz de dos cables, ó *Two Wire Interface (*TWI/I2C*)*, para enviar y recibir datos a través de una red de dispositivos y sensores.

Arquitectura del sistema

La figura 3 muestra el diagrama de como los sensores de CO, O3, y temperatura están tomando datos del ambiente y mandando señales al Arduino, de manera simultánea el tiempo también está siendo registrado por la Shield y está también manda la señal al Arduino, éste es el encargado de procesar y almacenar, para su posterior visualización y obtención de resultados (Fig. 3).

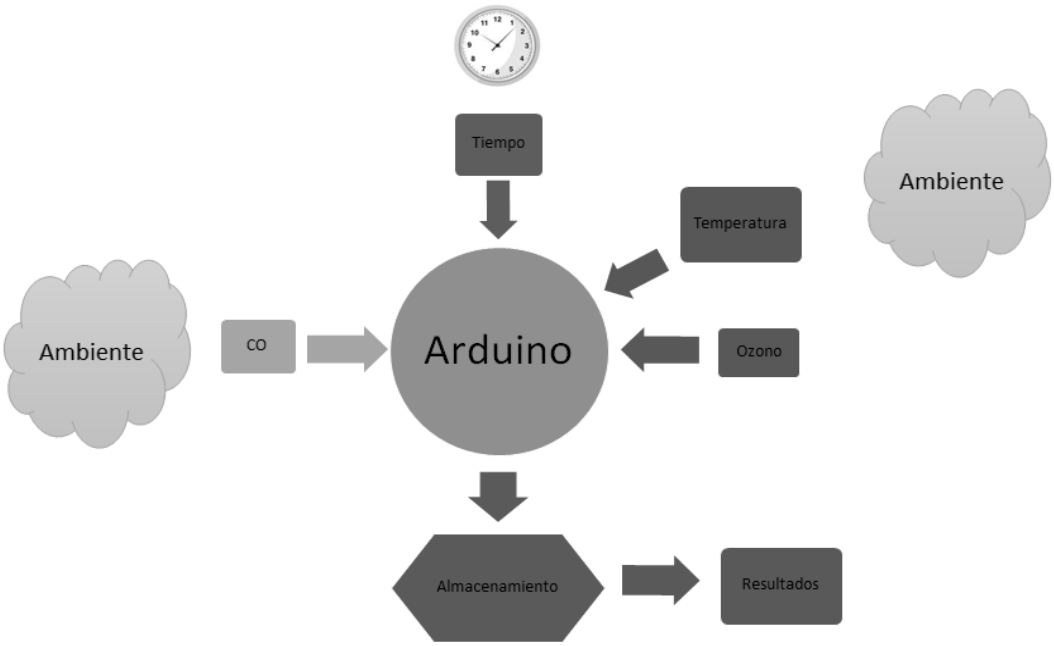


Fig. 3 Organización del sistema

Construcción del sistema

La programación del microcontrolador fue un paso muy importante, porque es donde al microcontrolador se le indicó las tareas a realizar. El ciclo de programación de Arduino fue básicamente como lo describe Banzi (2009):

- Se conectó la tarjeta en un puerto USB del ordenador.
- Posteriormente se escribió el programa o unidad de codigo ver Anexo 1 para que el microcontrolador realice las tareas deseadas.
- Se compilo este programa a la tarjeta a través de la conexión USB y se esperó un par de segundos para que reinicie sus tareas.
- La tarjeta ejecuta el programa que se cargó.

Para la realización de la unidad de código se configuró los registros y las variables globales y se determinaron los valores de las variables globales del programa así como el número de pines de los sensores y los registros correspondientes a dichas variable. Se incluyeron las bibliotecas para la comunicación con los sensores, lectura, memoria y tiempo. Se estableció la configuración de entradas, salidas y la comunicación entre la Shield y los sensores y para finalizar se le agrego las funciones requeridas para lograr cumplir con la adquisición de datos de los sensores en un lapso de tiempo determinado.

Una vez programado el microcontrolador se comenzó el armado del circuito.

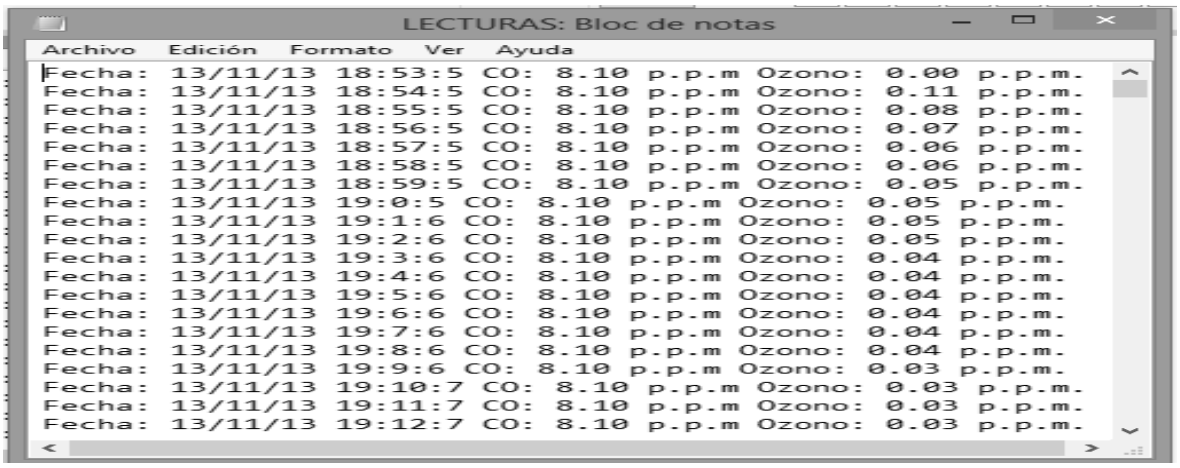
Calibración del sistema

Para la calibración del sistema diseñado, primero se mantuvo encendido el sistema industrial de monitoreo de gases contaminantes por varias horas, hasta que comenzará a brindar datos estables. Una vez realizado esto se ajustaron los mismos valores para el sistema diseñado y se sincronizaron ambos relojes para que fueran los mismos tiempos de muestreo.

Adquisición de datos

Para el sensor de ozono y monóxido de carbono los datos se reportan en partes por millón; si la medición contó con valores de cuatro cifras decimales, el valor de la tercera cifra decimal fue redondeado.

A partir del 15 de noviembre del 2013 y durante 30 días consecutivos se tomó la concentración de los gases en el punto localizado en los paralelos 20.51902 latitud norte y 97.45392 longitud oeste cada minuto con el sistema de medición diseñado. Posteriormente se retiró la memoria microSD al sistema de medición y se extrajo el archivo generado con extensión .TXT, este archivo es la base de datos que generaron los sensores como lo muestra la fig. 4


LECTURAS: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
Fecha: 13/11/13 18:53:5 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.00 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 18:54:5 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.11 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 18:55:5 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.08 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 18:56:5 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.07 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 18:57:5 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.06 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 18:58:5 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.06 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 18:59:5 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.05 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:0:5 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.05 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:1:6 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.05 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:2:6 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.05 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:3:6 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.04 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:4:6 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.04 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:5:6 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.04 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:6:6 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.04 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:7:6 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.04 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:8:6 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.04 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:9:6 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.03 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:10:7 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.03 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:11:7 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.03 p.p.m.
Fecha: 13/11/13 19:12:7 CO: 8.10 p.p.m Ozono: 0.03 p.p.m.
```

Fig. 4 Archivo base de datos.txt

A partir de la base de datos generada se calculó el valor promedio por hora, con estos valores se pudo calcular el valor promedio por ocho horas y el valor promedio máximo por día.

Simultáneamente el laboratorio móvil de la Universidad Veracruzana (UV) estaba recabando datos de estos gases en el mismo punto geográfico (Latitud 20.51902 N y Longitud 97.453920 O) como se muestra en la fig. 5

Fig. 5 Sistema de mediciones de gases colocados en el mismo punto geográfico.

El sensor de ozono del laboratorio móvil de la UV es marca Teledyne, modelo 400E y cuenta con las siguientes características:

- Rangos de 0-100 ppb a 0-10 ppm
- Controlado por microprocesador para mayor versatilidad
- Software multi-tarea permite la visualización de la prueba las variables durante el funcionamiento
- Puertos bidireccionales duales RS-232 para control remoto y operación (opcional RS-485 o Ethernet)
- Registro de datos interno con 1 min a 365 días promedios múltiples
- APICOM software de operación remota

La marca del sensor de monóxido de carbono es Teledyne y su modelo es 300E, la mayoría de sus especificaciones son las mismas que el anterior solo que su rango es de 0-1 ppm de 0-1000 ppm.

Comparación de los datos

Una vez obtenidos los datos se realizó una prueba t Student, considerando los valores obtenidos de ambos sistemas de medición. Para esto se usó el paquete informático Minitab 16, se graficaron los datos y se calculó su error relativo con un nivel de confianza del 95%.

Resultados

Selección del microcontrolador

El análisis para determinar el tipo de microcontrolador da como resultado una preselección entre dos microcontroladores con las mejores características a un precio asequible. Estos dos son el microcontrolador fabricado por ATMEL y el fabricado por TI. Tanto el microcontrolador desarrollado por ATMEL, el ATmega16u2, como el fabricado por TI, MSP430G2553, se comercializan en una plataforma de desarrollo de tecnología libre, llamadas Arduino y Launchpad respectivamente. Este es uno de los motivos principales por los que se eligieron estos dos microcontroladores para analizar más a fondo.

Se elige el Arduino Uno al cumplir con las características de entradas y salidas digitales, entradas analógicas, una conexión Universal Serial Bus (USB), es de alto rendimiento, bajo consumo de energía y cuenta con un reducido conjunto de instrucciones de computación (RISC) para su programación.

Además una de las características trascendentales de elección de este microcotrolador es la disponibilidad de herramientas y accesorios adaptables al diseño pre establecido del hardware y la plataforma Arduino es la que tiene más mercado, contando con los llamados Shields (Son placas que pueden ser conectadas encima de la placa Arduino extendiendo sus capacidades). Las diferentes "Shields" siguen la misma filosofía que el conjunto original Arduino: son fáciles de montar y baratas de producir.

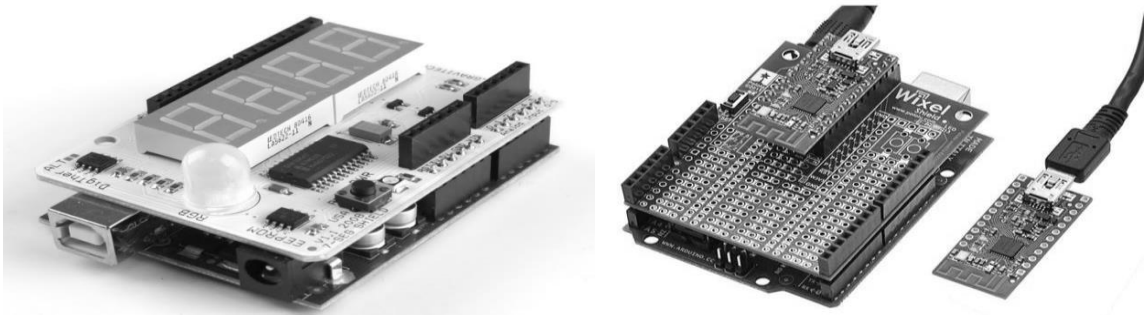


Fig. 6 Ejemplos de Shields para Arduino UNO

Así se decidió que para el uso de una base de datos y un registro de horarios y fechas con el cual se tiene un registro del momento exacto de cada muestreo y con la capacidad de poder almacenarlo en una memoria microSD se tiene un Shield para Arduino que el microcontrolador Launchpad no tiene, este Shield es Logger Shield para Arduino (uSD + RTC-Real Time Clock) que cuenta con una unidad de almacenamiento microSD y su RTC para manejar las funciones temporales como el día y la hora de eventos.

El circuito

El circuito del sistema de medición de gases lo podemos dividir en las siguientes partes: circuito de alimentación, el circuito del microcotrolador, el circuito del sensor de monóxido de carbono, el circuito del sensor ozono y el circuito del RTC. El circuito de alimentación tiene la función de proporcionar la tensión necesaria a los demás circuitos, es decir 5VDC, 7VDC, 12VDC. El circuito del microcontrolador se conecta al computador por medio de un puerto USB, su función es recolectar los datos y darle un tratamiento para su almacenamiento en la microSD, la conexión de este circuito se muestra en la fig. 6, donde se observa que se conectó la alimentación con un voltaje de 5v en las patillas 6 y 20 llamadas

Vcc y la tierra se conectó en las patillas 7 y 22 llamados GND. Se realizó un puente entre la patilla 1 a la patilla Vcc con una resistencia de 10kOhms para habilitar el reseteo.

Posteriormente se procedió a conectar las patillas 2 y 3, que son la comunicación serial de recepción (RX) y Transmisión (TX) respectivamente a las patillas de la Shield Real Time Clock (RTC) para que trasmita la información de hora y fecha al Arduino, estas patillas de comunicación serial también sirven como conducto para enviar la información del sensor a la memoria de almacenamiento con la que cuenta el Shield, esta tarjeta también fue conectada a Vcc y a GND.

Después se conectó cada sensor a uno de las seis patillas disponibles de conversión de señales analógicas a digitales llamados ADC por sus siglas en inglés (Analog to Digital Converter); el sensor de temperatura envía la información a la patilla 23, el de Ozono a la patilla 24 y el de monóxido de carbono a la patilla 25; al sensor de monóxido de carbono se le realizó un arreglo con resistencias y un circuito integrado para que su salida fuera en voltaje y no en corriente como está configurado por fabrica. Estos sensores se alimentan respectivamente con Vcc y su respectiva tierra.

El circuito del sensor de monóxido de carbono, del sensor ozono y del RTC son arreglos de resistencias, capacitores, diodos e inductores para poder amplificar o minimizar un voltaje o una corriente, o para transformar corriente a voltaje o viceversa y de esta forma pueda llegar a las patillas del microcontrolador y puedan ser tratados correctamente.

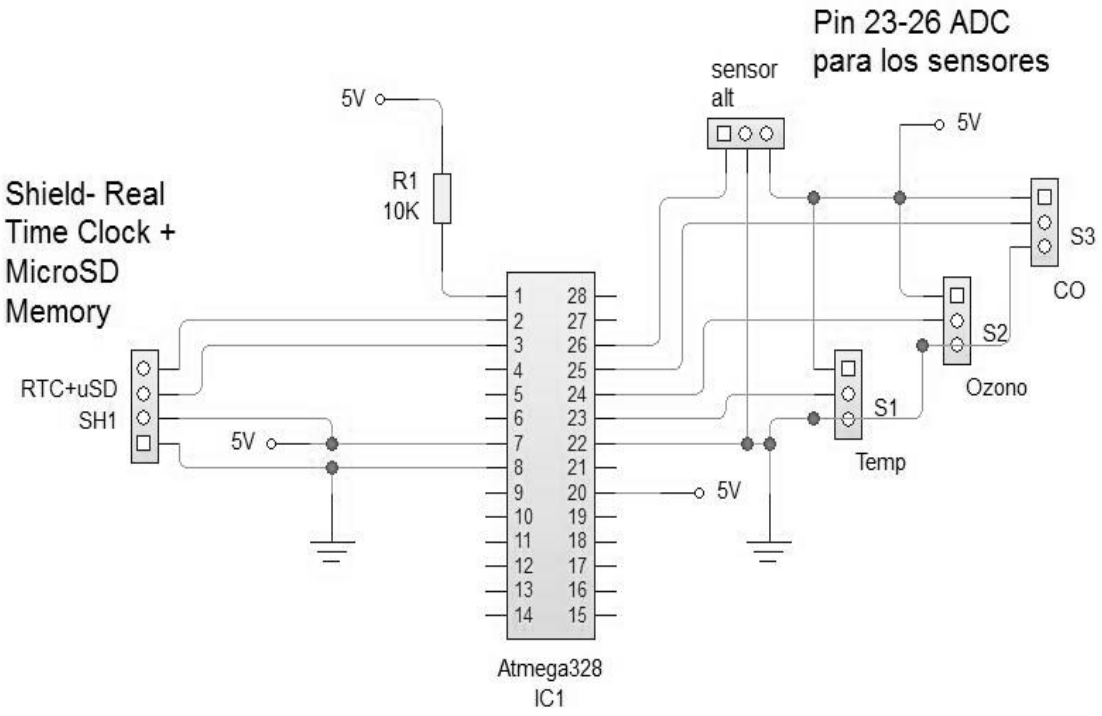


Fig. 7 Circuito del microcontrolador del sistema de medición de gases.

Unidad de Código

El anexo 1 muestra la unidad de código (lenguaje de programación para el proyecto) que se utiliza para programar el microcontrolador Arduino, este fue separado en bloques para entender mejor su programación, los cuales son: inicio, bibliotecas, configuración de sensores, configuración del RLC y microSD, conversión de entradas a valores de salida, ciclo y cierre.

Para la realización de este se utiliza la función inicial setup() que configura al microcontrolador y lo prepara para la comunicación que existe entre sus diferentes sensores y la Shield, posteriormente se elige la función instrucción Serial.begin(9600) en donde 9600 es la velocidad en baudios a los que se transmite la información. La función Wire.begin() se encarga de preparar al sensor de

temperatura para que esté listo para comenzar la secuencia de transmisión de datos. La instrucción pinMode() representó la configuración para las salidas/entradas digitales.

Se coloca un ciclo for (instrucción para evaluar una secuencia de datos varias veces) para iniciar la comunicación entre el Arduino y la Shield de memoria uSD mandando un dato de error en el caso de que no exista memoria dentro del Shield hasta que se introduzca la memoria.

La primera función que contiene la unidad de código es llamada Temperatura y su objetivo es adquirir el valor medido por el sensor de temperatura, debido a que es un sensor digital, los datos que se adquieren son digitales y se le asigna una variable tipo int (entera) llamada celsius, la función Wire.requestFrom() se utiliza para direccionar el flujo de información hacia el sensor y se le asigna la variable byte MSB y LSB.

La segunda función es la que se encargara de convertir del código BCD (binario codificado en decimal a un valor decimal), y se llamara bite. Otra función incluida es printDate() y se usa para hacer el proceso de enviar las lecturas de los sensores a la memoria e imprimir los datos de fecha y hora junto con los valores de las variables en el registro de la memoria. Los sensores proveen los datos al microcontrolador y el RTC le asigna un único valor en cada momento, después el microcontrolador organiza la información y la manda de vuelta al Shield organizada y lista para guardarse en la memoria uSD.

Se incluye un lazo principal, el cual abre el archivo de la memoria para poder escribir nueva información en él, con el comando SD.open() y se utiliza la función FILE_WRITE de la librería SD. En seguida si el archivo está abierto se comienza un ciclo de escritura donde empieza por la fecha obtenida con la función printDate() del RTC, también se escribe la temperatura obtenida con la función ya mencionada getTemperature() y se le asigna el valor a la variable temp, también

se manda esta variable al registro de la memoria seguido de la letra C que denotara los grados en los que la temperatura es medida.

Para obtener el valor del sensor de ozono y el monóxido de carbono se utiliza la función analogRead() que se encarga de obtener con el convertidor analógico a digital interno del Arduino las medidas que presentan los sensores. Por último se aplica un retraso de 1 segundo antes de cerrar el archivo e iniciar un nuevo ciclo. También se acuerda enviar los datos al monitor serial incluido en el IDE de Arduino para verificar constantemente la información en tiempo real sin necesidad de desconectar la memoria. Este lazo se repetirá indefinidamente mientras el microcontrolador este energizado y la memoria y los sensores en sus posiciones.

Mediciones de Gases y Temperatura

Como se ha señalado, uno de los objetivos principales del trabajo fue comparar y analizar la variación de los niveles de gases contaminantes obtenidos del sistema de medición diseñado y el industrial, para esto se computaron los datos obtenidos de los dos sistemas y se utilizó la prueba estadística “t” Student, el estudio se hizo con el programa estadístico minitab. La prueba “t” se eligió para demostrar si existen diferencias significativas entre ambas muestras con un nivel de confianza del 95%. A continuación se presentan los resultados.

Cuadro 2. Prueba de diferencia de medias entre el sistema de medición.

Gas	Media del Sistema Diseñado ppm (500 hrs)	Media del Sistema Industrial ppm (500 hrs)	GL	t	p
Ozono	0.00183	0.00262	989	2.09	0.037
Monóxido de Carbono	2.068	1.990	980	-2.87	0.004

Profundizando estadísticamente en el análisis y después de realizar la prueba de diferencia de medias para muestras independientes, se observa que si existen diferencias entre los dos sistemas, sin embargo es importante analizar el valor del error relativo que maneja el sistema diseñado en distintos momentos ya que en algunos las diferencias son menos significativas, por tal motivo se utiliza las siguientes distribuciones gráficas para analizar mejor su comportamiento.

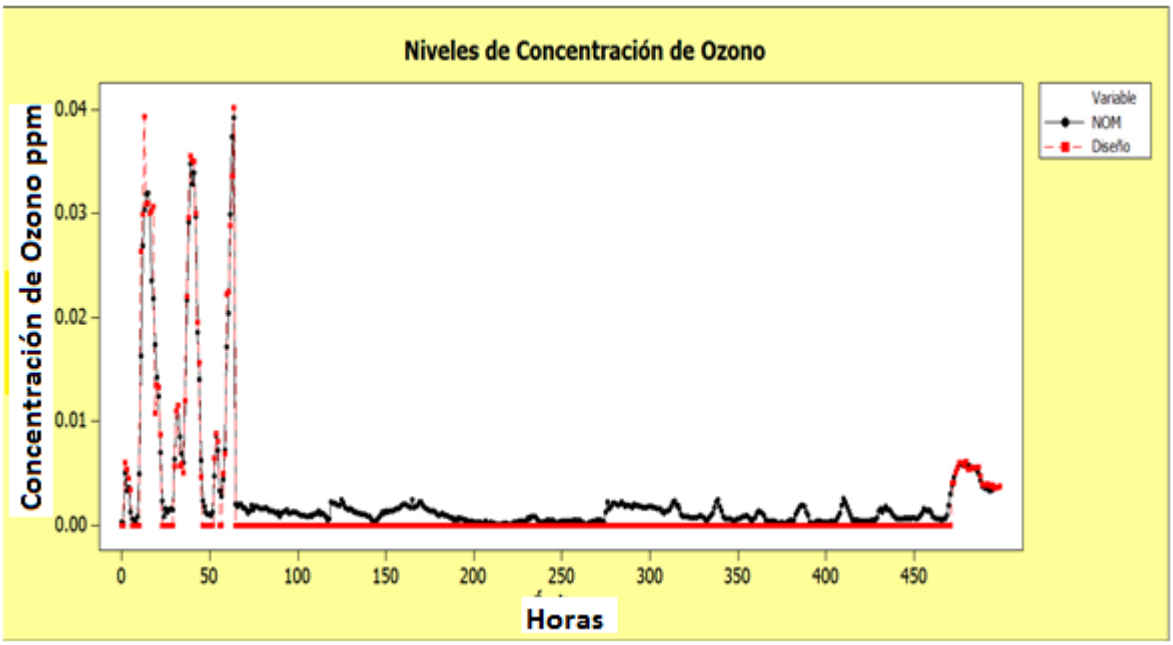


Fig. 8 Niveles de concentración de ozono

De la gráfica de los niveles de concentración de ozono en la fig. 8, muestra los valores obtenidos por ambos sistemas en un lapso de 500 horas de funcionamiento, se observa en esta gráfica que los valores registrados fueron muy bajas concentraciones de ozono, y también que para valores por debajo de 0.006 ppm el sistema de medición diseñado no es capaz de percibir alguna concentración de este gas, teniendo un error relativo total de 87.9% . En la gráfica 9, la cual registra las primeras 100 horas de funcionamiento de ambos dispositivos, se muestra con mayor detalle la distribución de niveles de concentración por arriba de los 0.006 ppm, reflejando que en el sistema de

medición diseñado disminuye las diferencias en valores, teniendo un error relativo de 34.8%.

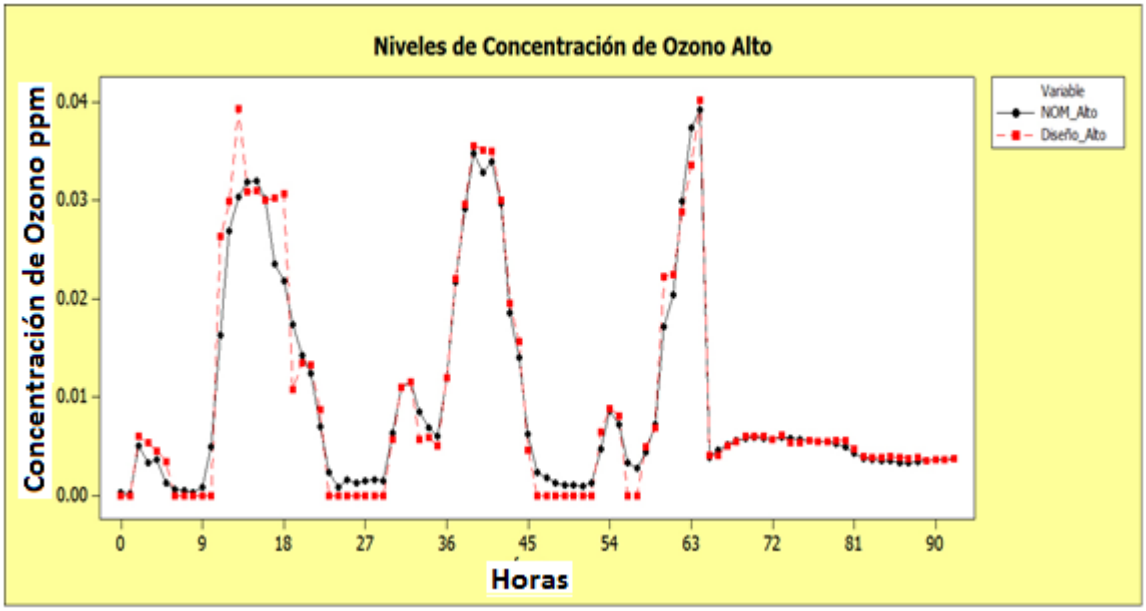


Fig. 9 Niveles de concentración de ozono de las primeras 100 horas

En la gráfica de la figura 10 de los niveles de concentración de monóxido de carbono, muestra el registro de 450 horas de trabajo de ambos dispositivos, se puede observar que el sistema de medición diseñado mantuvo una pequeña diferencia de valores en las primeras 350 horas de trabajo; posteriormente se presentan mediciones con un nivel elevado de error, originando diferencias significativas entre ambos sistemas y teniendo un error relativo porcentual de 6.8%.

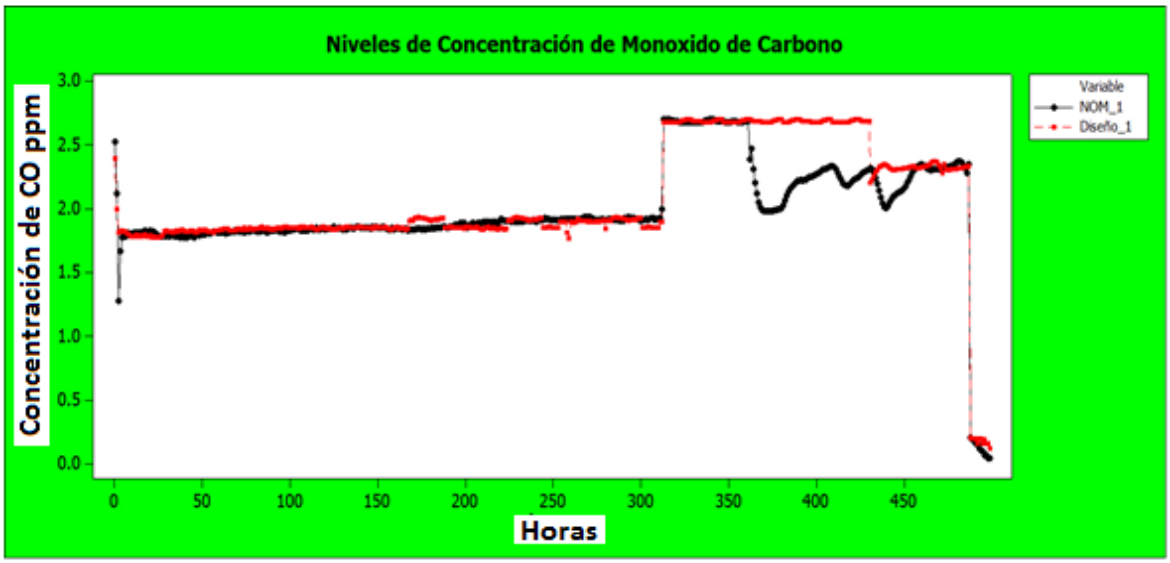


Fig. 10 Niveles de concentración de monóxido de carbono

En la gráfica de temperatura de la fig. 11 se presentan los niveles de temperatura registrados durante el tiempo de muestreo, los cuales influyen en las mediciones de niveles de gases.

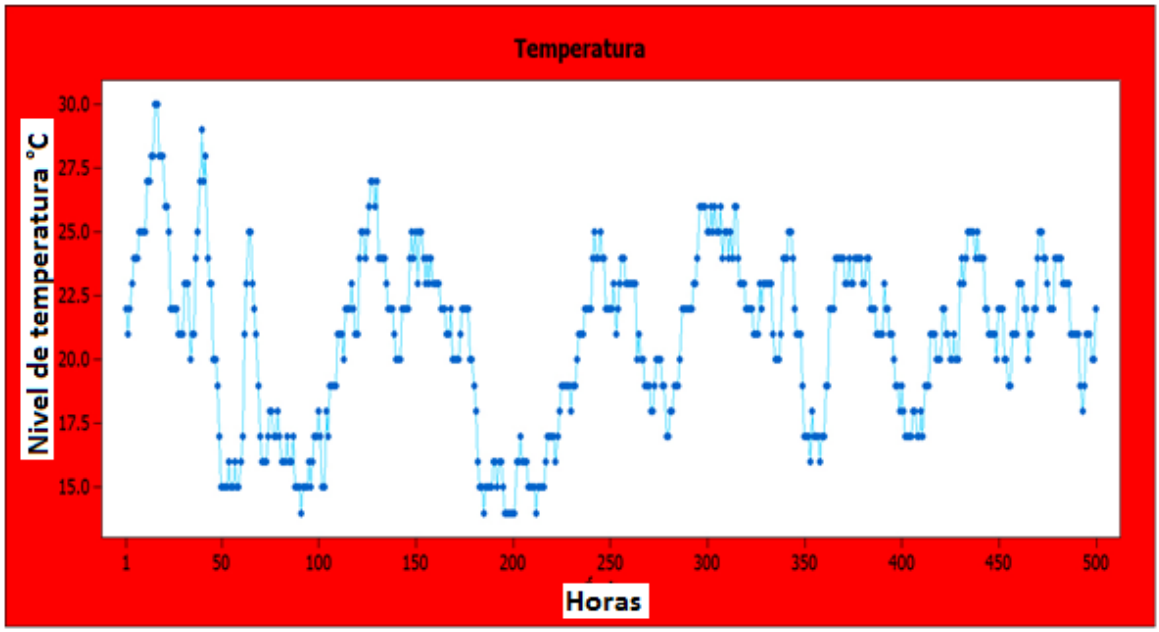


Fig. 11 Niveles de temperatura

Discusión

El sistema de medición de gases con tecnología libre diseñado en este trabajo es un conjunto de sensores con usos diversos, conectados a un microcontrolador, el cual procesa los datos y da el registro de niveles de gases como el ozono, monóxido de carbono y el parámetro ambiental de temperatura. La vigilancia de la contaminación atmosférica utilizando sensores comerciales y su adquisición de datos es un reto debido a la falta de selectividad de la mayoría de los dispositivos existentes, pero superando el reto, estos sistemas pueden ser útil para el monitoreo de los niveles de contaminantes gaseosos en ciudades medianas como Poza Rica, debido a que están integrados con sensores económicos, pequeños, de fácil adquisición y operación.

Respecto al sistema de adquisición de datos de los sistemas de medición de gases contaminantes; es fundamental elegir un microcontrolador que cumpla con todas las características necesarias, el microcontrolador se encarga de gobernar uno o más procesos dentro del sistema, procesar y almacenar los datos (Saponara y col., 2007), para la presente investigación se utilizó la placa Arduino con el microcontrolador ATmega16u2, lo que coincide con el estudio relacionado desarrollo del sistema de monitoreo de CO2 portátil de Liu y Col. (2014); quienes eligieron este mismo microcontrolador por utilizar una plataforma de código abierto y contener el núcleo de la marca ATMEGA, la cual es considerado como una de las familias de microcontroladores más sofisticados. Otra de las características de elección fue su bajo costo, fácil manejo, además que este microcontrolador trabaja en distintos modos como es el modo inactivo, el de trasmisión, de recepción y de operación; esto permite tener un ahorro de energía, convirtiéndolo en un dispositivo más amigable al medio ambiente y prolonga su tiempo de vida. Estas características también son descritas en el estudio relacionado de Abdullah y col. (2012) titulado desarrollo de la red de sensores inalámbrica para la vigilancia del calentamiento global en donde se puso a prueba

este microcontrolador, demostrando su eficacia en estos diferentes modos; lo que conlleva a su facilidad de uso y eficiencia energética, la diferencia con el sistema de medición descrito en este proyecto es que utilizan sensores con un rango alto de detección de gases, lo que no lo hace viable para monitoreo ambiental pero es óptimo para monitoreo industrial.

Una de las ventajas más importante del Arduino es la disponibilidad de herramientas y accesorios adaptables, ya que existen diversas placas o módulos montables para implementar nuevas funciones al microcontrolador, en el presente trabajo de investigación fueron utilizados el RTC y el zócalo de microSD, los cuales permiten el almacenamiento y registro por hora de la muestra de datos lo que es semejante al estudio relacionado de Chauhan y Semwal (2013) quienes refieren seleccionar el mismo microcontrolador en su sistema de monitoreo ambiental por la disponibilidad y fácil montaje de módulos; pero en el caso del estudio relacionado de Chauhan y Semwal fue un módulo de internet inalámbrico utilizado para la transmisión y almacenamiento de los datos, dándole mayor rapidez a la recolección de estos pero aumentando el costo del sistema.

El diseño del software fue realizado en la plataforma Arduino (leguaje “C”) y programado en bloques de acuerdo a su función; siendo semejante al estudio relacionado sistema de monitoreo inalámbrico de contaminación del aire basado en Zigbee de Ustad y col. (2013) puesto que al utilizar el microcontrolador 16F877, perteneciente a la familia ATMEGA comparten estas características. En cuanto a la programación entre ambos estudios los hace diferente la elección de librerías, debido que en el estudio de Ustad son programadas las librerías GPS y Etherneth, las cuales activan los códigos de localización de tomas de los puntos de muestreo y los transmite por internet a una base de datos, sin embargo, en el sistema construido en este trabajo se utilizan las bibliotecas SD.h y Wire.h las cuales transmiten los datos a una memoria Sd y los almacena, dejando abierta la posibilidad de agregar una o más bibliotecas para aumentar las aplicaciones del sistema de medición y mejorarlo.

Respecto al circuito eléctrico del sistema de medición, se decidió dividirlo en pequeños circuitos con funciones específicas como: el de alimentación, microcontrolador, sensores y RTC, resultados que coinciden con el estudio relacionado de Ardi y col. (2012) quienes en su instrumento de detección de humedad, temperatura y monóxido de carbono decidieron separar su circuito general en pequeñas partes, la diferencia entre estas divisiones es que ellos agregaron un circuito cuya función era integrar el LCD (pantalla de cristal líquido) la cual proporcionaría al sistema la ventaja de poder visualizar los datos en tiempo real en el LCD, para poder lograr esto, ellos utilizaron el microcontrolador AVR ATmega1280 un microcontrolador hermano al ATmega16u2 utilizado en este trabajo.

La elección de los sensores para la detección de los gases fue muy importante, se escogieron sensores económicos, precisos, compatibles con el microcontrolador y con disponibilidad en el mercado, con el fin de que el sistema de medición fuera de bajo costo, portátil, de tamaño pequeño y que sus datos fueran reales para poder ser utilizado comercialmente por un gran número de personas tal como lo propone Chaudhry (2013) en su proyecto Arduair: Monitoreo de la calidad del aire en donde selecciono sensores con estas características y contrasto el resultado de un solo sensor el MQ-5 (Sensor de CO) con los datos del Comité de Control de la Contaminación de su país, dando como resultados un sensor muy estable y confiable para altos niveles contaminantes, lo que lo excluye para un monitoreo ambiental de la calidad del aire en una ciudad poco contaminada. Chaudhry deja abierta la posibilidad de ocupar diversos sensores para el monitoreo de los demás gases contaminantes del aire, ya que solo prueba experimentalmente con un sensor y con los demás describe los pasos para conectar y programar más sensores al microcontrolador.

En relación con el gas de ozono el sensor seleccionado fue el MQ-131, un sensor muy comercial, de bajo costo debido a que está compuesto por un semiconductor de cerámica y Al_2O_3, el funcionamiento se basa en el cambio de

resistencia que presenta al estar expuesto al aire sin ozono y con ozono. Este sensor presento mucha variación como consecuencia del clima, en días soleados los niveles de concentración eran más altos y con un error relativo menor, en días con lluvia los niveles de concentración fueron casi nulos y con un error relativo muy alto, estos resultados concuerdan con el estudio relacionado de Eranna y col. (2004) donde se menciona que los sensores basados en materiales de óxido de aluminio expuestos a temperatura ambiente y baja humedad muestran una buena estabilidad y no presentan ninguna reacción química con otros materiales, solo con el ozono, pero a altas condiciones de humedad muestra una degradación significativa en su sensibilidad, dando como resultado que las condiciones idóneas para este tipo de sensor es un margen de temperatura de -20°C a 45°C y a un bajo nivel de humedad.

El sensor MQ-131 ha sido utilizado en los estudios relacionados sistema de información del monitoreo ambiental de Franz y Calix (2014) y el esterilizador de ozono de Kim (2014), ambos estudios concuerdan que es un sensor muy preciso y estable, cabe mencionar que el sistema de Kim es para detección de ozono en un ambiente industrial y el trabajo de Franz y Calix es solo determinar si se presenta contaminación por este gas o no; los resultados de estos estudios difieren con los resultados obtenidos en el presente trabajo, debido a que el sensor de ozono presento una gran variación en sus datos, el error relativo calculado al compararse con los sensores regidos por las normas oficiales mexicanas fue alto, es decir arriba del 80% para niveles por debajo de los 0.006 ppm y para valores mayores de 0.006ppm el error se redujo a valores por debajo de 35%, así que su precisión depende del nivel de concentración de ozono y presencia de humedad, es decir, para muy bajas concentraciones de ozono el sensor presenta un error relativo muy alto e inclusive no detecta presencia del contaminante y para valores de concentración de ozono más altos aumenta la exactitud del sensor, es por esta razón que en los estudios relacionados antes mencionados y para este trabajo podemos decir que para altos niveles de ozono

es un dispositivo preciso y fiable, ya que los niveles mínimos permisibles que marca la norma oficial mexicana NOM-020-SSA1-1993 son de 0.11ppm por hora y 0.08ppm por 8 horas.

El sensor seleccionado de monóxido de carbono fue el TGS5042, es un sensor electroquímico que mediante el uso de una muy baja concentración de electrolito alcalino, la integración de una cantidad extremadamente pequeña de metal noble catalizador en la capa de catalizador, y la aplicación de un separador, puede medir la concentración de CO detectando el cambio de corriente cuando hay una variación del contaminante (Inoue et al.,2004), esta variación de corriente es transformada a voltaje para su lectura por el microcontrolador, de acuerdo a los resultados obtenidos fue necesario un arreglo electrónico que convierta la corriente a voltaje y la amplifique. Lo anterior coincide con el estudio relacionado de Ardi y col. (2012), en él se menciona que para niveles altos de CO la resistencia del sensor se hace muy pequeña y por lo tanto deberá contener un arreglo electrónico que es un circuito amplificador para poder enviar datos confiables al microcontrolador, además se necesita un tiempo para la producción estable del voltaje, en el caso del presente trabajo fueron de 5 a 10 minutos para que el sensor pudiera arrojar datos fiables.

Inoue y col. (2004) realizaron pruebas para determinar la confiabilidad de este sensor, estas pruebas se dieron por un lapso largo de tiempo (6 meses), con distintas concentraciones de contaminantes, diferentes condiciones de temperatura y humedad, dando como resultado la creación de uno de los sensores de CO más estables con sensibilidad de ±5%, lo que coincide con el presente estudio, ya que los datos obtenidos por este sensor fueron estables, no fueron afectados por condiciones externas del medio ambiente y al contrastar los dalos obtenidos con los datos del sensor industrial dio como resultado un error relativo de 6.8%, dando veracidad a los datos recabados por este sensor. Además este sensor mediante el uso de una batería seca en su estructura no plantea ningún riesgo de fuga del electrolito, lo que lo convierte en un sensor más

respetuoso al ambiente (Inoue et al.,2004), siendo esta otra de las razones de elección del sensor para el sistema de monitoreo de gases contaminantes de este trabajo.

Los datos obtenidos de los niveles de concentración de ozono para el sensor regido por las NOMs y para el sistema diseñado tuvieron un comportamiento muy similar, durante las primeras horas de muestreo se presentaron picos, en este periodo se presentaron días muy soleados y con las más altas temperaturas de todo el muestreo, cabe mencionar que a pesar que fueron los niveles más altos de concentración de ozono en Poza Rica no sobrepaso los niveles permisibles que marca la NOM-020-SSA1-1993, después de este periodo los niveles de ozono se mantuvieron muy bajos, y el clima predominante fueron lluvias significantes y una temperatura promedio por debajo de los 20°C, de esta manera relacionamos la variación de los niveles de ozono y el clima, ya que el ozono tiene una característica importante, este gas no es emitido directamente a la atmosfera, sino que es formado en el aire a través de reacciones fotoquímicas (Finlayson-Pitts, 1997). A lo largo del muestreo se obtuvo una media de 0.00183 ppm para el sistema diseñado y una de 0.00262 ppm para el sistema industrial, ambos sistemas marcan que existe baja concentración de ozono en la ciudad de Poza Rica.

En cuanto a los niveles de monóxido de carbono registrados en la ciudad de Poza Rica tenemos que ambos sistemas son muy similares, teniendo en un solo lapso de tiempo unas diferencias significativas entre ellos, esto se debió a que en este periodo el sistema diseñado no conto con las condiciones ideales del funcionamiento debido a que la batería utilizada para el sensor presento una descarga y el circuito estuvo operando con menor voltaje y corriente necesaria. Durante las mediciones se presentó un ligero incremento en las concentraciones de CO lo que se relaciona directamente con el nivel de tráfico vehicular que presentó la ciudad, ya que las emisiones por automóviles es una de las principales causas de origen de este gas ((Seinfield y Pandis, 2012), a pesar de esto ambos

sistemas registraron una media de concentración de CO de 2 ppm, valor que está dentro de la NOM-021-SSA1-1993, dejando claro que Poza Rica presento valores bajos de monóxido de carbono en este periodo.

Conclusión

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación se concluye lo siguiente:

Se realizó con detalle la arquitectura, construcción, funcionamiento y comprobación de un sistema de medición de gases, cumpliendo las características de ser pequeño, portátil, proporcionar información en tiempo real sobre el nivel de contaminación de ozono y monóxido de carbono en la ciudad de Poza Rica, teniendo una resolución temporal y espacial.

Los sensores de monóxido de carbono y temperatura resultaron ser eficientes y confiables para aplicaciones de monitoreo ambiental, sin embargo, el sensor de ozono solo es estable y preciso para aplicaciones de monitoreo industrial. Los niveles de concentraciones de estos gases en la ciudad de Poza Rica son aun bajos y están cumpliendo con los niveles permisibles que marcan las normas oficiales mexicanas.

El sistema de medición se implementó con tecnología libre, utilizando el microcontrolador Arduino, convirtiéndolo en un sistema con varias ventajas tales como bajo costo, flexibilidad, facilidad de manejo y eficiencia energética considerándose como una medida primaria de protección preventiva contra la contaminación de gases contaminantes en el ambiente. Lo que permite dejar abierta la posibilidad de adaptar una gran variedad de sensores para medir variables ambientales que se adecuen a las necesidades de los operadores.

Este sistema de medición puede ser utilizado fácilmente por un gran número de personas para el seguimiento de gases contaminantes en el ambiente. Los datos recogidos por el sistema no serán oficiales pero podrán aplicarse a todos los niveles de organización para crear conciencia, realización de estudios científicos y pronosticar políticas de mediación por parte de autoridades para evitar la contaminación atmosférica en ciudades pequeñas y medianas.

Bibliografía

Abdullah, A., Sidek, O., Amran, N. and Za'bah, U.(2012). Development of wireless sensor network for monitoring global warming, International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS), 107 - 111.

Almanza, V. H., Molina, L. T., Li, G., Fast, J., & Sosa, G. (2013). Impact of external industrial sources on the regional and local air quality of Mexico Megacity. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, *13*(10), 26579-26625.

Ardi, S., Hidayat, M., & Adrian, M. G. (2012). Humidity, Temperature and Carbon Monoxide Detection Instrument in the Air Using Lcd Monitor and Microcontroller. Journal of Asian Scientific Research, 2(8), 393-403.

Banzi, M. (2009). *Getting Started with Arduino*. O'Reilly Media, Inc..

Bernard, S. M., Samet, J. M., Grambsch, A., Ebi, K. L., & Romieu, I. (2001). The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related health effects in the United States. *Environmental Health Perspectives*,*109*(Suppl 2), 199.

Cady, F. M. (2009). *Microcontrollers and Microcomputers Principles of Software and Hardware Engineering*. Oxford University Press, Inc..

Chaudhry, V. Arduair: Air Quality Monitoring. (2013) International Journal of Environmental Engineering and Management. ISSN 2231-1319, Volume 4, Number 6 (2013), pp. 639-646

Chauhan, A., & Semwal, S. (2013). Sensor Network based Enviornmental Monitoring. International Journal of Engineering, 6(3), 307-314.

Chong, C. Y., & Kumar, S. P. (2003). Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, *91*(8), 1247-1256.

Cooper, O. R., Parrish, D. D., Stohl, A., Trainer, M., Nédélec, P., Thouret, V., ... & Avery, M. A. (2010). Increasing springtime ozone mixing ratios in the free troposphere over western North America. *Nature*, *463*(7279), 344-348.

Dasgupta, S., Hettige, H., & Wheeler, D. (2000). What improves environmental compliance? Evidence from Mexican industry. *Journal of Environmental Economics and Management*, *39*(1), 39-66.

De Caterina, R., & Zampolli, A. (2004). From asthma to atherosclerosis--5-lipoxygenase, leukotrienes, and inflammation. *The New England journal of medicine*, *350*(1), 4-7.

Eranna, G., Joshi, B. C., Runthala, D. P., & Gupta, R. P. (2004). Oxide materials for development of integrated gas sensors—a comprehensive review.Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 29(3-4), 111-188.

Finlayson-Pitts, B. J., & Pitts, J. N. (1997). Tropospheric air pollution: ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particles. Science,276(5315), 1045-1051.

Franz, D. R., & Calix, R. A. (2014, March). Semantic Content Enrichment of Sensor Network Data for Environmental Monitoring. In The Twenty-Seventh International Flairs Conference.

García-Cuellar, A., Arreguín-Sánchez, F., Hernández-Vázquez, S., & Lluch-Cota, D. B. (2004). Impacto ecológico de la industria petrolera en la Sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: una revisión. *Interciencia*,*29*(6), 311-319.

Gómez, M. A. C. (2006). Actualización de la página web de la dirección de investigación sobre la calidad del aire.

Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., D'Angiola, A., Van Der Gon, H. D., Frost, G. J., ... & Van Vuuren, D. P. (2011). Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period. *Climatic Change*, *109*(1-2), 163-190.

Guo, H., Low, K. S., & Nguyen, H. A. (2011). Optimizing the localization of a wireless sensor network in real time based on a low-cost microcontroller.*Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, *58*(3), 741-749.

INEGI, X. (2010). Censo General de Población y Vivienda, México.

Inoue, T., Fujimori, Y., Kato, Y., & Matsuura, Y. (2004, October). A new and environmentally friendly liquid electrolyte gas sensor. In Sensors, 2004. Proceedings of IEEE (pp. 138-141). IEEE.

Jang, W. S., Healy, W. M., & Skibniewski, M. J. (2008). Wireless sensor networks as part of a web-based building environmental monitoring system.*Automation in Construction*, *17*(6), 729-736.

Khedo, K. K., Perseedoss, R., & Mungur, A. (2010). A wireless sensor network air pollution monitoring system. *arXiv preprint arXiv:1005.1737*.

Kim, H., Song, I., Kim, J., & Chen, K. (2014). Ozone Sterilizer.

LA, S. A. C. P. E. PROYECTO de Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, ozono (O3). Valor permisible para la concentración de ozono en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. *PODER EJECUTIVO*.

Liu, C., Anuruddha, T. A., Minato, A., & Ozawa, S. (2014). Development of Portable CO2 monitoring System. Advanced Materials Research, 838, 2547-2551

Lopez, M. T., Zuk, M., Garibay, V., Tzintzun, G., Iniestra, R., & Fernandez, A. (2005). Health impacts from power plant emissions in Mexico. Atmospheric Environment, 39(7), 1199-1209.

Márquez, M. (2013). La industria del gas natural en México. *Problemas del Desarrollo*, *19*(75).

Martinez, K., Hart, J. K., & Ong, R. (2004). Environmental sensor networks.*Computer*, *37*(8), 50-56.

McCabe, L. C., & Clayton, G. D. (1952). Air pollution by hydrogen sulfide in Poza Rica, Mexico; an evaluation of the incident of Nov. 24, 1950. *AMA archives of industrial hygiene and occupational medicine*, *6*(3), 199.

Mendez, D., Perez, A. J., Labrador, M. A., & Marron, J. J. (2011, March). P-sense: A participatory sensing system for air pollution monitoring and control. In *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 344-347). IEEE.

Navarro, D., Du, W., Mieyeville, F., & Carrel, L. (2010). Hardware and software system-level simulator for wireless sensor networks. *Procedia Engineering*, *5*, 228-231.

Penza, M., Suriano, D., Cassano, G., Pfister, V., Alvisi, M., Rossi, R., ... & De Gennaro, G. (2012). P2. 9.23 Portable Chemical Sensor-System for Urban Air-Pollution Monitoring. *Tagungsband*, 1767-1770.

PEMEX: Informe Anual 2012, 183 pp., 2012

Ramanathan, V., & Feng, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*,*43*(1), 37-50.

Sanchez, J., & Canton, M. P. (2010). *Microcontroller programming: the microchip PIC*. CRC Press.

Saponara, S., Fanucci, L., & Terreni, P. (2007). Architectural-level power optimization of microcontroller cores in embedded systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, *54*(1), 680-683.

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2012). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.

Tsujita, W., Yoshino, A., Ishida, H., & Moriizumi, T. (2005). Gas sensor network for air-pollution monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*,*110*(2), 304-311.

Ustad, M. V. K., Mali, A. S., & Kibile, M. S. S.(2013) Zigbee Based Wireless Air Pollution Monitoring System Using Low Cost and Energy Efficient Sensors.

Verdone, R., Dardari, D., Mazzini, G., & Conti, A. (2010). *Wireless sensor and actuator networks: technologies, analysis and design*. Access Online via Elsevier.

Viricelle, J. P., Pauly, A., Mazet, L., Brunet, J., Bouvet, M., Varenne, C., & Pijolat, C. (2006). Selectivity improvement of semi-conducting gas sensors by selective filter for atmospheric pollutants detection. *Materials Science and Engineering: C*, *26*(2), 186-195.

Zampolli, S., Elmi, I., Ahmed, F., Passini, M., Cardinali, G. C., Nicoletti, S., & Dori, L. (2004). An electronic nose based on solid state sensor arrays for low-cost indoor air quality monitoring applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *101*(1), 39-46.

Anexo 1

Lenguaje de Programación del sistema de medición electrónica de gases contaminantes.

```
int ozono=2;  //Pin analogo para lectura del sensor de ozono

int valor_ozono=0;  //Variable para almacenar la lectura del sensor de ozono

#include <Wire.h>  //Libreria para la comunicion con el Sensor de Temperatura

#include <SD.h>    //Libreria para lectura y escritura de la microSD

#define DS1307_ADDRESS 0x68

File Archivo;  //Variable para la creacion del archivo en la microSD

int dia=0;

int tmp102Address = 0x48;

void setup(){

  Serial.begin(9600);  //Abre el puerto serial a 9600 bps

  Wire.begin();   //Inicialisacion de la comunicacion con el sensor de temperatura

  pinMode(10, OUTPUT);  //Configurar Pin 10 Digital como Salida o

if (!SD.begin(10)) {

    Serial.println("initialization failed!"); //Sino encuntra memoria mensaje de error

    return;

  }

  Serial.println("initialization done."); //Mensaje de conexion exitosa

}

void loop(){
```

```
  Archivo=SD.open("Lecturas.txt", FILE_WRITE);
  if (Archivo) {
    Serial.print("Fecha: ");
    printDate();
    Serial.print(" Temperatura: ");
    Archivo.print(" Temperatura: ");
    float temp=getTemperature();
    Serial.print(temp);
    Archivo.print(temp);
    Serial.print(" C");
    Archivo.print(" C");
    valor_ozono=analogRead(ozono);
    Serial.print(" Ozono: ");
    Archivo.print(" Ozono: ");
    Serial.print(valor_ozono);
    Archivo.print(valor_ozono);
    Serial.println(" p.p.m.");
     Archivo.println(" p.p.m.");
    delay(1000);
    Archivo.close();
  }
}
```

```
float getTemperature(){
  Wire.requestFrom(tmp102Address,2);
  byte MSB = Wire.read();
  byte LSB = Wire.read();
  //it's a 12bit int, using two's compliment for negative
  int TemperatureSum = ((MSB << 8) | LSB) >> 4;
  float celsius = TemperatureSum*0.0625;
  return celsius;
}
byte bcdToDec(byte val)  {
// Convert binary coded decimal to normal decimal numbers
  return ( (val/16*10) + (val%16) );
}
void printDate(){
  // Reset the register pointer
  Wire.beginTransmission(DS1307_ADDRESS);
  byte zero = 0x00;
  Wire.write(zero);
  Wire.endTransmission();
  Wire.requestFrom(DS1307_ADDRESS, 7);
  int second = bcdToDec(Wire.read())+2;
  int minute = bcdToDec(Wire.read());
```

```
int hour = bcdToDec(Wire.read() & 0b111111); //24 hour time

int weekDay = bcdToDec(Wire.read()); //0-6 -> sunday - Saturday

int monthDay = bcdToDec(Wire.read());

dia=monthDay;

int month = bcdToDec(Wire.read());

int year = bcdToDec(Wire.read());

Archivo.print("Fecha: ");

//print the date EG   3/1/11 23:59:59

Serial.print(monthDay);

Archivo.print(monthDay);

Serial.print("/");

Archivo.print("/");

Serial.print(month);

Archivo.print(month);

Serial.print("/");

Archivo.print("/");

Serial.print(year);

Archivo.print(year);

Serial.print(" ");

Archivo.print(" ");

Serial.print(hour);

Archivo.print(hour);
```

```
  Serial.print(":");
  Archivo.print(":");
  Serial.print(minute);
  Archivo.print(minute);
  Serial.print(":");
  Archivo.print(":");
  Serial.print(second);
  Archivo.print(second);
}
```

Anexo 2

Autorización para colocación de dispositivo junto al Sistema de Monitoreo de la UV

Universidad Veracruzana

Universidad Veracruzana
Facultad de Ciencias Bilógicas y Agropecuarias
Maestría en Ciencias del Ambiente

Dr. Carlos Rodríguez Flores
Secretario Académico
Facultad de Electrónica y Comunicaciones
Región Poza Rica – Tuxpan

El que suscribe Ing. Macario Isaías Barrios Melchor inscrito al posgrado Maestría en Ciencias del Ambiente con matricula S12015014, solicita a usted la autorización para la instalación del Sistema de Medición Electrónico de Gases Contaminantes a partir del 14 de noviembre del 2013 a enero 2014 para implementar el proyecto de investigación titulado "Sistema de Medición Electrónico de Gases Contaminantes basado en Tecnología Libre en Poza Rica, Ver."

No habiendo otro asunto que tratar, me reitero a sus finas atenciones.

Atentamente

I.E.C. Macario Isaías Barrios Melchor

Secretaría de la Facultad de Ingeniería Poza Rica, Ver.
7/Nov/2013

Poza Rica, Ver. a 06 de noviembre del 2013

Anexo 3

Constancia foro ambiental UPIBI 2013

El Instituto Politécnico Nacional
a través de la **Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología,** el **Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C.** y el **Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo**
otorgan la presente:

CONSTANCIA

A: Barrios Melchor Macario Isaías

Por su participación en el "3er Foro Ambiental UPIBI 2013", en la modalidad de carteles, con la presentación del proyecto titulado:

Sistema de medición electrónico de gases contaminantes basado con tecnología open-source en Poza Rica, Ver.

Realizado de18 al 19 de Septiembre del 2013, en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología

M. en C. Yesica Ma. Domínguez Galicia
DIRECTORA UPIBI-IPN

Anexo 4

Constancia IV congreso internacional de cambio climático y desarrollo sostenible

IV CONGRESO INTERNACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DESARROLLO SOSTENIBLE
MONTERREY, N.L., MÉXICO
6, 7 y 8 NOVIEMBRE 2013

UANL FCB

Monterrey, Nuevo León, México a 22 de septiembre de 2013

Clave: DU-01

Estimados Colegas:

Me es grato comunicarle que su trabajo titulado:

MICROCONTROLADOR, SENSORES Y OPEN-SOURCE: ALTERNATIVA PARA EL MONITOREO DE GASES CONTAMINANTES EN POZA RICA, VER.

Cuyo(s) autor(es) es (son):

Ing. Barrios-Melchor Macario Isaías, Dr. Benavides-Cruz Alberto Manuel y Dra. Barrios-Melchor Alma Rosa

Ha sido **ACEPTADO** para su presentación en Modalidad **Oral** en el *IV Congreso Internacional de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible*, la fecha y horario de su participación será publicado en la página oficial del Congreso.

A nombre del comité organizador le agradecemos su interés y colaboración. Esperamos tener oportunidad de saludarle.

Atentamente.-

Comité Organizador del
IV Congreso Internacional de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible