

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SENSORES AUTOMATIZADOS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA BAJA TROPOSFERA

DESIGN, CONSTRUCTION AND AUTOMATION OF SENSORS FOR MONITORING GREENHOUSE GASES IN THE LOWER TROPOSPHERE

Jesús Palacios¹, Nelson Falcón² y Erith Muñoz^{3,*}

Resumen

La determinación del contenido de monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄) en la baja troposfera tiene gran importancia en los estudios de cambio climático y polución del aire. Por este motivo, este trabajo se enfocó en el diseño, construcción y calibración de un instrumento que permita medir la concentración de CO y CH₄, además de la temperatura y presión ambiental. El dispositivo diseñado cuenta con un circuito de acople para los sensores de CO, CH₄, temperatura y presión, un microcontrolador, una pantalla LCD, un reloj y una microSD para el almacenamiento y transmisión de datos a través de un convertidor RS-232 a USB. Los resultados indican que la señal de los detectores de CO y CH₄ genera una respuesta de tipo exponencial proporcional con la concentración en el rango de 0 a 120 ppm, sin embargo, se estableció que la respuesta fue de tipo lineal para concentraciones bajas en el rango 0 a 15 ppm. La respuesta de los gases evaluados difiere para cada uno de los sensores, siendo el CH₄ el que mostró la mejor sensibilidad en el rango de 0 a 2 ppm.

Palabras clave: Automatización, gases de efecto invernadero, polución atmosférica, construcción de sensores.

Abstract

The determination of carbon monoxide (CO) and methane (CH₄) in the lower troposphere is of great importance in studies of climate change and air pollution. This work is focused on the design, construction and calibration of an instrument to measure the concentration of CO and CH₄, as well as the temperature and pressure of atmospheric air. The designed device also has a coupling circuit, a microcontroller, a LCD display, a clock and a MicroSD which enables the storage and transmission of data via a RS-232 to USB. The results indicate that the signal of the CO and CH₄ detectors have an exponential response, which is proportional to the concentration in the range of 0 to 120 ppm, however, it was established that the response was linear for low concentrations in the range 0 to 15 ppm. The instrument sensitivity differs for both gases evaluated, being CH₄ which showed the best sensitivity in the range of 0 to 2 ppm.

Keywords: Automation, atmospheric pollution, greenhouse gases, construction of sensors.

¹Licenciado en Física, miembro del Laboratorio de Física de la Atmósfera y el Espacio Ultraterrestre, FaCYT Universidad de Carabobo, Apdo. postal 129 Avda. Bolívar Norte, Valencia, Edo. Carabobo, Venezuela.

²Doctor en Física, Licenciado en Física, Profesor del Departamento de Física de la Universidad de Carabobo, Jefe del Laboratorio de Física de la Atmósfera y el Espacio Ultraterrestre, FaCYT Universidad de Carabobo, Apdo. postal 129 Avda. Bolívar Norte, Valencia, Edo. Carabobo, Venezuela.

³Magíster en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias, Magíster en Ingeniería Eléctrica, Licenciado en Física, consultor de la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Quito, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: erith7@gmail.com

Recibido: 18-11-2015, aprobado tras revisión: 08-12-2015.

Forma sugerida de citación: Palacios, J.; Falcón, N.; Muñoz, E. (2015). "Diseño y construcción de sensores automatizados de gases de efecto invernadero en la baja troposfera". INGENIUS. N.º 14, (Julio-Diciembre). pp. 21-29. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

La medición de trazas de gases en la troposfera, tiene gran importancia en el entendimiento de los mecanismos químicos, transporte y deposición de los mismos, con el fin de establecer las estrategias de control, que permitan minimizar el impacto de estos sobre la contaminación del aire y el cambio climático. Las técnicas para estas mediciones han evolucionado enormemente desde la década de los años treinta, cuando se desarrolló la primera generación de equipos de monitoreo de gases contaminantes del aire, con la adaptación de los instrumentos de medición que se utilizaban en la industria de procesos químicos [1]. Posteriormente, la *National Air Pollution Control Administration* (NAPCA) inició el desarrollo de una segunda generación de instrumentos con el fin mejorar la sensibilidad, especificidad y velocidad de respuesta, sobre la base de la medición de las propiedades físicas que eran características del gas de interés.

Hoy en día, la combinación de las técnicas químicas y espectroscópicas ha permitido un avance significativo en el desarrollo de equipos de medición de gases atmosféricos [2]. Diversas técnicas de medición han sido utilizadas para los estudios de la química y los procesos dinámicos en la baja troposfera [3–9], las cuales han permitido medir, a lo largo del perfil atmosférico, la concentración de una variedad de gases como el ozono (O_3), óxidos de nitrógeno (N_xO_y), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), formaldehído (HCHO), ácido clorhídrico (HCl), entre otros [10], [11].

Por otra parte, una nueva generación de sensores denominados “de estado sólido”, muestran un menor tamaño, bajo costo, alta durabilidad, fácil construcción, ligeros y bajo límite de detección (menor a una parte por millón) en comparación a los ya mencionados. Estos sensores, que se basan en las propiedades electroquímicas o modulación de la resistencia eléctrica del material expuesto a diferentes gases, han venido tomando importancia en el monitoreo de la contaminación del aire [12], [13].

En las últimas tres décadas, los semiconductores de óxidos metálicos (SOM) como el SnO_2 , WO_3 y ZnO han sido estudiados extensivamente para el monitoreo de hidrocarburos y otras especies químicas, sin embargo, la principal desventaja de estos materiales ha sido la baja selectividad [12].

Estudios recientes han buscado maximizar la selectividad y sensibilidad, a partir de la combinación de métodos de filtración y concentración de los gases de interés a través de membranas, zeolitas y otros tipos de absorbentes capaces de separar y concentrar selectivamente las moléculas del gas que se desea medir, de aquellos que interfieren en la medición [12].

Por otra parte, los requerimientos de acople de estos sensores a un circuito capaz de medir la señal

de salida, también resultan complicados; ya que se requieren condiciones eléctricas y térmicas muy específicas para el funcionamiento de dichos sensores. Otro factor importante, que tiene un rol determinante en la selección de sensores para las estimaciones de concentraciones de gases en la atmósfera y que ha sido considerado en este trabajo, es la capacidad de almacenamiento y transmisión de datos.

El presente trabajo consiste en el diseño, construcción y calibración de un dispositivo que posee dos (2) sensores MQ-7 y MQ-4, de SnO_2 , los cuales permiten medir de forma selectiva el CH_4 y CO respectivamente.

Estos sensores presentan una baja conductividad para el oxígeno y nitrógeno molecular. Sin embargo, experimentan un incremento de la conductividad y una disminución de la resistencia cuando las moléculas del gas de interés son adsorbidos sobre la superficie de SnO_2 , produciéndose de esta manera una señal eléctrica que es proporcional a la concentración de la especie de interés en el aire.

El dispositivo diseñado posee dos entradas analógicas para incorporar los sensores de temperatura y presión; además, tiene incorporado un dispositivo de almacenamiento de datos. Este instrumento en fase experimental, que busca medir la concentración de las especies químicas presentes en la baja troposfera, también puede tener otras aplicaciones en el área de higiene ocupacional y seguridad industrial [14].

El diseño, construcción y la implementación efectiva de estos sensores representan una contribución importante en términos de reducción de costos para posteriores investigaciones en el estudio de concentración de contaminantes, y también fija una base elemental para establecer líneas de investigaciones en el desarrollo de instrumentación y equipos de medición de bajo costo, con características de precisión prediseñadas.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño del dispositivo

Para el diseño y construcción del dispositivo se consideró el acople de los cuatro (4) bloques mostrados en la Figura 1. El primero contempla los sensores, con el uso de dos tipos de semiconductores pasivos MQ-7 [15] y MQ-4 [16] capaces de medir el CO y CH_4 respectivamente. El segundo bloque corresponde al circuito de acople que permite igualar las impedancias de los sensores con las de entrada al microcontrolador. El tercero pertenece a la unidad central de procesamiento que cuenta con un microcontrolador PIC18 el cual se encarga de manejar los sensores, almacenar y procesar los datos. El último bloque es el dispositivo de almacenamiento de datos, que pese a que no interviene en el proceso de generación de datos, está encargado de

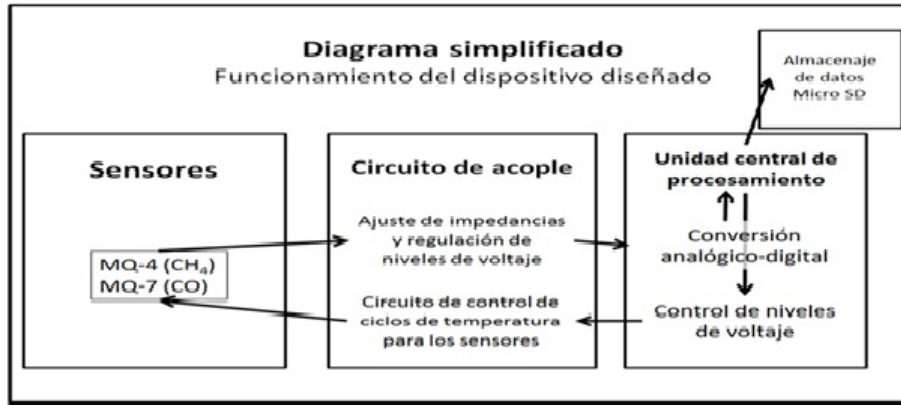


Figura 1. Diagrama de funcionamiento del dispositivo de medición de CH₄ y CO.

registrarlos y de esta manera simplificar el análisis de los mismos.

El dispositivo es alimentado con cualquier fuente DC con un rango de tensión de 11,5 a 27 V y consume 785 mA ± 4 %. Internamente regula la tensión de entrada a 5 V, que es el voltaje de trabajo de los sensores y el microcontrolador. Este cuenta con un dispositivo de control y procesamiento analógico digital que permite realizar las mediciones con los sensores, y también almacenar los datos obtenidos en una tarjeta microSD de hasta 32 Gb. A continuación se detalla cada uno de los componentes del dispositivo.

2.2. Sensores

Los sensores seleccionados para el diseño y construcción del equipo de CH₄ y CO fueron el MQ-7 y MQ-4 de fabricación comercial. Estos semiconductores que cambian su conductividad y resistencia en función de la cantidad de CH₄ y CO adsorbido, poseen un circuito interno que funge como divisor de tensión [15], [16]. En general, el elemento semiconductor del sensor, se encuentra conectado en serie con una resistencia de carga RL.

De esta forma, cuando se aplica una diferencia de potencial V_c de 5 V ± 0,1 V entre el punto de salida V_{out} y la tierra (V = 0), es posible identificar el cambio de resistencia R_S total en el sensor, como una función de la cantidad de moléculas absorbidas sobre la superficie del sensor. En otras palabras, la concentración del gas en el aire es medida a partir de la magnitud de R_S, que se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V_o = \left(\frac{V_c}{V_{out}} - 1 \right) \cdot R_L$$

Ahora bien, para desorber las moléculas de CH₄ y CO adsorbidas sobre la superficie de los semiconductores MQ-7 y MQ-4 respectivamente, y además, cerrar el ciclo de una medición, y dar inicio a otro, los sensores incorporan un calentador (*heater*) con una

resistencia típica de 31 Ω ± 3. El método de calentamiento empleado en el sensor MQ-7 y MQ-4, consiste en suministrar 5 V a la bobina de calentamiento, durante 60 s, y luego se cambia a 1.4 V por 90 s, con el fin de estabilizar y llevar a cabo la medición. Este proceso se repite nuevamente entrando en un ciclo donde se genera un dato cada 150 ss. El control cíclico del voltaje en las bobinas de calentamiento y el registro de voltaje de salida V_{out} de los sensores se lleva a cabo por medio del circuito de acople, mientras que el control cíclico lo lleva a cabo la unidad central de procesamiento. Estos se describen en las siguientes secciones.

2.3. Circuito de acople

El circuito de acople tiene la función de igualar las impedancias de los sensores con la de la entrada al microcontrolador, ya que la salida de los sensores no puede ir directamente hacia el microcontrolador, debido a la diferencia en las características eléctricas de ambos dispositivos. Es por esto por lo que se diseñó y construyó un circuito de acople tal y como se presenta en la Figura 2 para conectar los sensores al microcontrolador.

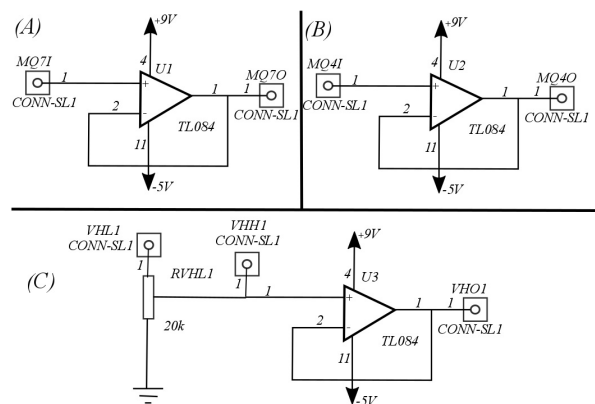


Figura 2. Esquema del circuito de acople de corriente para el microcontrolador.

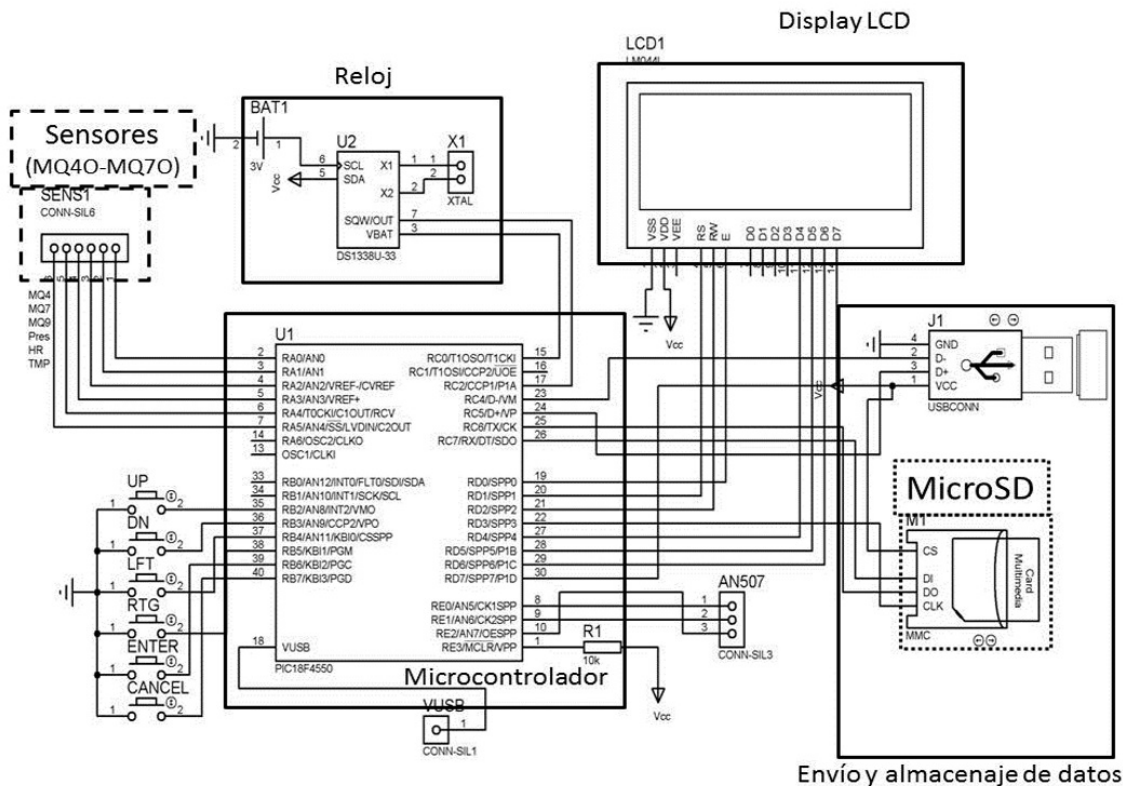


Figura 3. Esquema electrónico del microcontrolador.

Las Figura 2A y 2B son amplificadores configurados como seguidores. Las entradas etiquetadas como MQ7I y MQ4I es donde se conectan las salidas de los sensores. Y los conectores etiquetados como MQ40 y MQ70 son las salidas que van hasta el convertidor analógico - digital del microcontrolador. Estos amplificadores configurados como seguidores, proporcionan una alta impedancia de entrada para los sensores y una impedancia de salida baja hacia el microcontrolador con la finalidad de evitar caídas de tensión y por ende evitar medidas erróneas. La Figura 2C, muestra el circuito que se encarga de mantener el voltaje de encendido y apagado del microcontrolador.

El microprocesador tiene asignado dos terminales para el control de voltaje del calentador. Estos terminales provenientes del microcontrolador van a las entradas VHL1 y VHH1. Teniendo en cuenta que el voltaje de salida de estos terminales del microcontrolador es 5 V, cuando el terminal conectado a VHH1 se activa, el voltaje que se envía el amplificador será también de 5 V. Cuando la entrada VHL1 se activa, la corriente circula a través de RVHL1 (potenciometro) el cual funge como divisor de tensión.

2.4. Unidad central de procesamiento

La información proveniente de los circuitos de acople de la Figura 2 es procesada y almacenada por el microcon-

trolador, un PIC 18F4550 de la empresa Microchips(c) cuyo esquema electrónico para su operación fue diseñado como se muestra en la Figura 3. El reloj permite controlar la captura de datos a través del microcontrolador, el cual se lleva a cabo a intervalos de 150 s (60 + 90 s) como se explicó en la sección 2.2.

Este control de tiempo por parte del reloj, también se emplea para correlacionar las medidas de CH₄ y CO con la altitud, en el caso de utilizar este instrumento en globos aerostáticos con el fin de caracterizar el perfil vertical de la baja troposfera. Estas medidas de tiempo de ascenso o descenso del globo, junto con los valores de presión atmosférica permiten estimar la altitud en un momento determinado. La pantalla LCD permite visualizar los valores instantáneos registrados por los sensores, los tiempos de calentamiento y estabilización, y también la fecha y hora del día.

2.5. Almacenamiento de datos

La información proveniente de los sensores con la fecha y hora asociada, es almacenada en la microSD, la cual puede ser visualizada en un archivo con formato de texto (.txt), cuyo nombre es un número correlativo, que cambia secuencialmente cada vez que el equipo es encendido. En dicho archivo se ordenan en columnas separadas por coma, los parámetros de cada uno de los sensores (CH₄, CO, temperatura y presión).

Estos datos pueden ser leídos con un software de graficación y análisis de datos como MATLAB®, SCILAB® u ORIGINLAB®. En la Figura 4A se muestra el *holder* para la microSD y la abertura inferior del dispositivo que permite pasar el aire a través de los sensores por medio de un ventilador ubicado en el otro extremo del ducto. En la Figura 4B, se presenta la pantalla o display del dispositivo y los seis botones que permiten controlar y ajustar los parámetros de operación del sensor como el tiempo, fecha y configuración interna de calibración.

La Figura 5A exhibe en la pantalla del dispositivo el menú de inicio donde se modifican los parámetros de tiempo, tiempo de calentamiento y estabilización térmica de los sensores MQ-7 y MQ-4 durante sus ciclos de medición. Pulsando los botones de la derecha o izquierda, se puede recorrer en la pantalla los parámetros como hora, minutos, segundos, fecha, tiempo ON (calentador encendido) y tiempo OFF (calentador en estabilización). Con los botones más y menos se puede incrementar o disminuir los valores de cada uno de estos parámetros. Para salir del menú sin producir ningún cambio se presiona Cancelar, o si desea aplicar algún cambio se presiona ENTER.

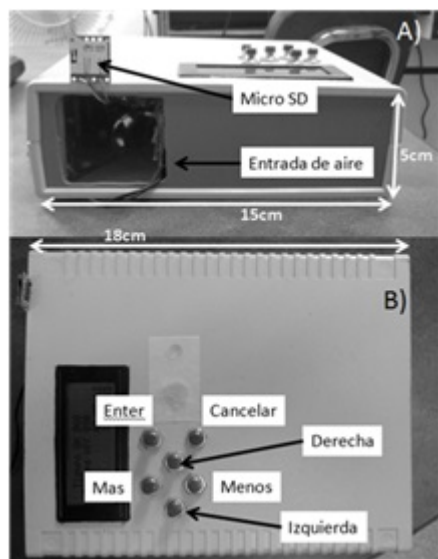


Figura 4. Vista externa del prototipo construido para la medición de CH₄ y CO.

La Figura 5B muestra el menú de STANDBY, donde el dispositivo detiene la medición temporalmente, en ese momento la pantalla mostrará la fecha y hora del día. Para salir de este menú se debe presionar Enter. En la Figura 5C se muestra la pantalla de precalentamiento de los sensores. Esta pantalla aparece de manera informativa una vez que se enciende el dispositivo. Este precalentamiento tiene una duración de cinco minutos y puede ser cancelado de ser requerido, pero no se recomienda para asegurar la estabilidad en las medidas.

Por último, el menú de medición se presenta en la Figura 5D donde se muestran los valores instantáneos de cada uno de los sensores de CO (mq4), CH₄ (mq7), presión (press) y temperatura (temp), además de la fecha y hora del día. Los valores mostrados corresponden a unidades arbitrarias que son correlacionadas con los valores de cada uno de estos parámetros por medio de sus respectivas curvas de calibración.

2.6. Calibración del dispositivo

Las pruebas de calibración se llevaron a cabo en el laboratorio de Contaminación Atmosférica y Tecnología de Control de Emisiones del Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (INTEVEP). Para ello el dispositivo se colocó dentro de una bolsa de polietileno con cierre hermético que cuenta con un orificio de entrada a un extremo y otro de salida o purga al otro extremo de la bolsa, con el fin de garantizar una condición estacionaria y controlada de concentración, temperatura, presión y humedad (Figura 6).

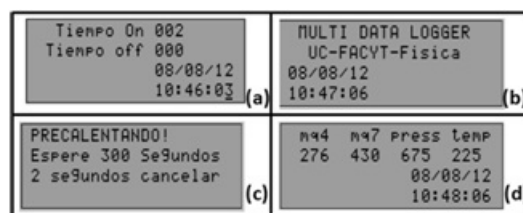


Figura 5. Parámetros de inicio y configuración del dispositivo.

En el orificio de entrada se introdujo la salida del mezclador de gases Thermo Scientific modelo 55i, el cual permitió variar las concentraciones de CO y CH₄ con una resolución de 1 ppm. Los gases patrones utilizados fueron marca Matheson de 700 ppm CO y 700 ppm de CH₄ en balance de nitrógeno, y el gas de dilución fue aire limpio y seco generado por un equipo de aire zero Teledyne modelo 701. El registro de temperatura y humedad dentro de la bolsa se realizó con un sensor Fisher Scientific. Para la calibración del dispositivo se prepararon concentraciones de CH₄ y CO entre 0 y 120 ppm.



Figura 6. Montaje experimental utilizado para calibración.

La curva de calibración se construyó a razón de 1 ppm entre 0 y 3 ppm, luego a razón de 5 ppm entre 5

y 100 ppm y finalmente a razón de 10 ppm entre 100 y 120 ppm. La calibración se realizó a una temperatura de 22 °C, una presión de 879 mbar y una humedad de 35 %. El flujo de gas de calibración que se introdujo a la bolsa fue de 5 l/min y el tiempo de calibración de cada uno de los puntos de la curva tuvo una duración no menor a 5 min.

Este tiempo está muy por encima del tiempo asociado al ciclo de medición del sensor de 2,4 min (150 s), el cual fue controlado de forma automática por el reloj del dispositivo. Los tiempos de calibración garantizaron alcanzar una condición estacionaria en cada uno de los puntos de la curva de calibración, además de disminuir la incertidumbre de la medición.

3. Resultados y discusión

Los valores de salida de los sensores a intervalos de 150 s fueron graficados con cada una de las concentraciones patrón con las se calibraron los sensores, siguiendo el montaje experimental de la Figura 6. Estas gráficas se presentan en las Figuras 7, 8, 9 y 10. Es importante mencionar que los valores arrojados por el sensor están expresados en una unidad arbitraria proporcional al voltaje de salida de cada uno de los sensores y que dicha unidad está dada por el convertidor analógico-digital del microcontrolador al momento de leer el voltaje que proviene de los sensores.

3.1. Sensor de metano

En la Figura 7 se observa la respuesta del sensor MQ-4 para el rango de concentración entre 0 y 120 ppm de CH₄. El sensor muestra una respuesta proporcional creciente con tendencia exponencial al aumento de la concentración de metano en ppm. Los parámetros de la curva de ajuste de la señal del sensor MQ-4 con la concentración de metano en el rango de 0 y 120 ppm son presentados en la Tabla 1. Para un n de 26 pares de datos se obtuvo un coeficiente cuadrático de Pearson de 0,997 y un residuo de 0,19, indicando que la curva de ajuste obtenida por el método de mínimos cuadrados para el rango de 0 a 120 ppm se ajusta muy bien para un 95 % de confianza, además la desviación estándar se encuentra por debajo de la unidad de medición.

La forma asintótica de la curva alcanzada por la señal del sensor a los 120 ppm de CH₄, sugiere explorar un rango mayor de concentración (hasta 10 000 ppm) especificado para este sensor, con el fin de estudiar su comportamiento y buscar otras aplicaciones de este sensor como monitor de gases de salida de las unidades combustión. Para el monitoreo del perfil atmosférico, la Figura 8 muestra que la señal del sensor correlaciona linealmente con la concentración de metano (n = 7, p < 0,005) para el rango de 0 a 15 ppm, siendo significativo para un 99,5 % de confianza. Esta alta correlación evidencia la capacidad del

sensor para responder linealmente a los cambios de concentración de metano en la baja troposfera. Por otra parte, el intercepto de esta curva arrojó un valor de $0,83 \pm 0,25$, el cual mostró no ser significativamente distinto de cero.

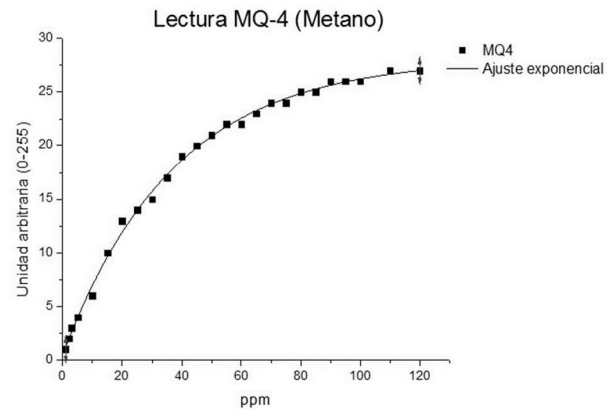


Figura 7. Curva de calibración del sensor de metano MQ-4 rango 0-120 ppm.

Tabla 1. Parámetros de la curva de ajuste del sensor MQ-4 rango 0 a 120 ppm.

Ecuación	$y = a - b \cdot c^x$	
Parámetro	Valor	Error estándar
a	28,13	0,32
b	27,61	0,32
c	0,97	0,001

Este nos indica que el sensor puede medir la concentración de metano a muy bajas concentraciones, específicamente en el orden de 0 a 2 ppm el cual se ubica en el rango de concentración a escala global. Es por esto por lo que se sugiere pasar a una segunda fase donde se pueda evaluar la respuesta de este sensor con medición de concentraciones ambientales.

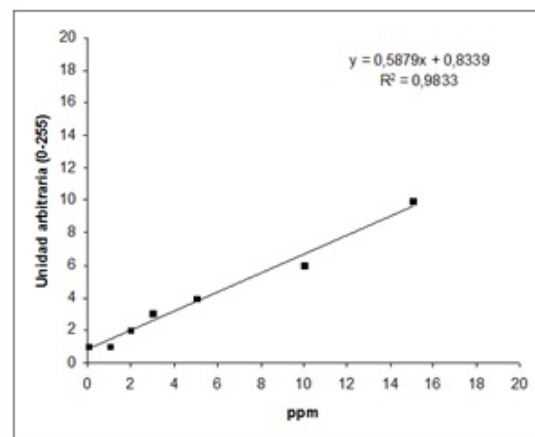


Figura 8. Curva de calibración del sensor de metano MQ-4 rango 0-15 ppm.

3.2. Sensor de monóxido de carbono

En la Figura 9 se muestra la respuesta del sensor MQ-7 para el rango de concentración entre 0 y 120 ppm de monóxido de carbono. Al igual que el sensor de metano, el CO muestra una respuesta creciente con tendencia exponencial proporcional al aumento de su concentración en ppm. Los parámetros de la curva de ajuste de la señal del sensor MQ-7 presentada en la Figura 9 con la concentración de monóxido de carbono en el rango de 0 y 120 ppm se muestra en la Tabla 2 y se observa un coeficiente cuadrático de Pearson 0,998 y un residuo de 42,46, que indica que la curva obtenida por el método de mínimos cuadrados se ajusta a los datos obtenidos para el sensor MQ-7; sin embargo, la precisión es menor a la del sensor MQ-4 de metano. A pesar de que su desviación estándar está ligeramente por encima de la apreciación del aparato, es posible medir concentraciones de monóxido de carbono en lugares donde sobrepase las 12 ppm aproximadamente.

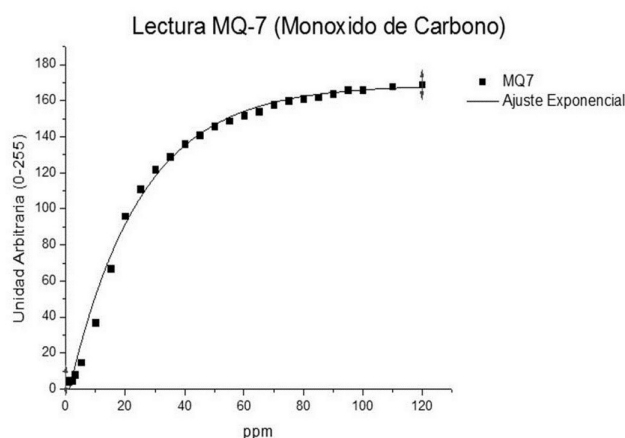


Figura 9. Curva de calibración del sensor de monóxido de carbono MQ-7, 0-120 ppm.

Por otra parte, en la Figura 10 se muestra la curva de la señal del sensor MQ-7 para un rango de concentración de monóxido de carbono entre 0 y 15 ppm. La correlación encontrada evidencia una significativa linealidad ($n = 7$, $p < 0,005$) para un 99,5 % de confianza. Esto puede generar apreciables errores en la medición de bajas concentraciones de monóxido de carbono ubicadas en el orden de 0 a 9 ppm que son típicas de áreas urbanas.

Es por esto por lo que se sugiere estudiar otros sensores de estado sólido que puedan tener una mayor sensibilidad y precisión para bajas concentraciones de monóxido de carbono. Finalmente, es importante mencionar que los cambios de temperatura y humedad ambiental, influyen en la señal generada por estos tipos de sensores, por lo que se sugiere llevar a cabo pruebas que permitan evaluar la respuesta de estos sensores a los cambios de temperatura, humedad y presión, con

el fin de evaluar su aplicación para el monitoreo de estos gases en el perfil vertical de la baja troposfera.

Tabla 2. Parámetros de la curva de ajuste del sensor MQ-7 rango 0 a 120 ppm

Ecuación	$y = a - b \cdot c^x$	
Parámetro	Valor	Error estándar
a	168,73	2,73
b	176,74	3,77
c	0,96	0,003

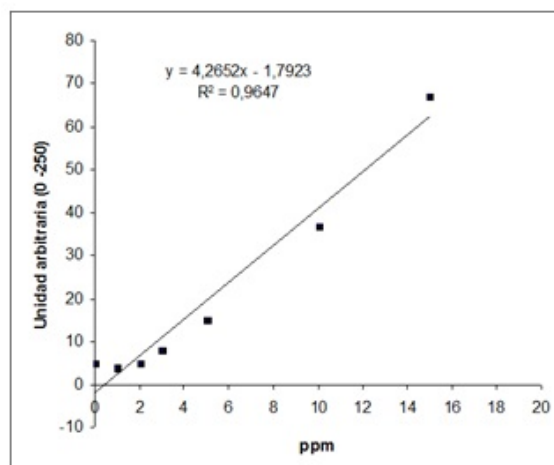


Figura 10. Curva de calibración del sensor de monóxido de carbono MQ-7 rango 0-15 ppm.

4. Conclusiones

En el rango de 0 a 120 ppm los sensores MQ-4 y MQ-7 muestran una respuesta exponencial a los cambios de concentración de CH_4 y CO respectivamente. A bajas concentraciones la respuesta de los sensores MQ-4 y MQ-7 es lineal con la concentración CH_4 y CO respectivamente, sin embargo, la sensibilidad en ambos sensores es distinta, siendo más sensible MQ-4. Se requiere estudiar la sensibilidad de estos sensores a diferentes condiciones de humedad, presión y temperatura para evaluar su aplicación para los estudios de estos gases en el perfil vertical de la baja tropósfera.

Se recomienda analizar otros tipos de sensores de estado sólido para el monitoreo de óxidos de azufre SO_x y óxidos de nitrógeno NO_x que son de gran importancia en los estudios atmosféricos. La investigación de la aplicación de estos tipos de sensores de bajo costo y flexibles abre una gran potencialidad en el desarrollo endógeno de instrumental para el monitoreo de calidad de aire en áreas urbanas e industriales.

Si bien es cierto que en este trabajo no se realiza la comparación de las salidas de los dispositivos, respecto

a equipos certificados de uso comercial, principalmente por motivos de presupuesto, es importante destacar que se ha realizado un proceso de calibración para condiciones de concentraciones controladas en laboratorio.

De tal forma que los niveles de ajuste entre la medición parametrizada de los dispositivos y los valores esperados en términos de partes por millón, configuradas cuidadosamente en laboratorio, reportan resultados congruentes, que soportan el alcance de la evaluación inicial presentada en este trabajo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Fonacit de la República Bolivariana de Venezuela a través del proyecto estratégico N.º 2011-000326, "Caracterización de fenómenos transitorios en la troposfera baja: electrometeoros, litometeoros, microtornados y trombas marinas". Agradecemos la colaboración del Laboratorio de Contaminación Atmosférica y Tecnología de control de emisiones de PDVSA Intevep, S. A. en la calibración del dispositivo.

Referencias

- [1] R. K. Stevens and A. E. O’Keeffe, “Modern aspects of air pollution monitoring, analytical chemistry,” vol. 42, no. 2, February 1970. 143A.
- [2] R. K. Roscoe and C. Kevin, “Clemittshaw measurement techniques in gas-phase tropospheric chemistry: A selective view of the past, present, and future science.” vol. 276, no. 5315, pp. 1065–1072, 16 May 1997.
- [3] S. S. Brown, W. P. Dubé, H. D. Osthoff, D. E. Wolfe, W. M. Angevine, and A. R. Ravishankara, *High resolution vertical distributions of NO₃ and N₂O₅ through the nocturnal boundary layer*. Atmos. Chem. Phys., 2007, vol. 7.
- [4] J. Stutz, B. Alicke, R. Ackermann, and A. Geyer, *Vertical profiles of NO₃, N₂O₅, O₃, and NO_x in the nocturnal boundary layer: 1. Observations during the Texas Air Quality Study 2000*. Journal of Geophysical Research, 2004, vol. 109.
- [5] C. Prados-Roman, A. Butz, T. Deutschmann, M. Dorf, L. Kritten, A. Minikin, U. Platt, H. Schlager, H. Sihler, N. Theys, M. Van Roozendael, T. Wagner, and K. Pfeilsticker, *Airborne DOAS limb measurements of tropospheric+ trace gas profiles: case studies on the profile retrieval of O₄ and BrO.*, D12306, doi:10.1029/2003JD004209 2011, vol. 4.
- [6] D. W. T. Griffith, N. M. Deutscher, C. G. R. Caldwell, G. Kettlewell, M. Riegenbach, and S. Hammer, “A fourier transform infrared trace gas analyser for atmospheric applications.” *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, vol. 5, pp. 3717–3769, 2012.
- [7] J. Ungermann, C. Kalicinsky, F. Olschewski, P. Knieling, L. Hoffmann, J. Blank, W. Woiwode, H. Oelhaf, E. Hösen, C. M. Volk, A. Ulanovsky, F. Ravegnani, K. Weigel, F. Stroh, and M. Riese, “Crista-nf measurements with unprecedented vertical resolution during the reconcile aircraft campaign.” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 5, pp. 1173–1191, 2008.
- [8] B. F. Taubman, J. C. Hains, A. M. Thompson, L. T. Marufu, B. G. Doddridge, J. W. Stehr, A. Piety, and R. R. Dickerson, “Aircraft vertical profiles of trace gas and aerosol pollution over the mid-atlantic united states: Statistics and meteorological cluster analysis,” *Journal of geophysical research*, vol. 111, D10S07, doi:10.1029/2005JD006196 2006.
- [9] M. O. Andreae, P. Artaxo, V. Beck, M. Bela, S. Freitas, C. Gerbig, K. Longo, J. W. Munger, K. T. Wiedemann, and S. C. Wofsy, “Carbon monoxide and related trace gases and aerosols over the amazon basin during the wet and dry seasons.” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, pp. 6041–6065, 2012.
- [10] A. Geyer and J. Stutz, “Vertical profiles of NO₃, N₂ O₅, O₃, and NO_x in the nocturnal boundary layer: 2. model studies on the altitude dependence of composition and chemistry.” *Journal of Geophysical Research*, vol. 53109, doi:10.1029/2003JD004211. 2004.
- [11] S. Wang, R. Ackermann, and J. Stutz, “Vertical profiles of no_x chemistry in the polluted nocturnal boundary layer in phoenix, az: I. field observations by long-path doas.” *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, vol. 6, pp. 45–106, 2006.
- [12] S. M. Kanan, O. M. El-Kadri, I. A. Abu-Yousef, and M. C. Kanan, “Semiconducting metal oxide based sensors for selective gas pollutant. detection sensors,” vol. 9, pp. 8158–8196, doi:10.3390/s91008158 2009.
- [13] Y. Zheng, X. Li, and P. K. Dutta, “Exploitation of unique properties of zeolites in the development of gas sensors.” 2012, iISSN 1424-8220.
- [14] D. T. Teitelbaum, *Farmacología básica y clínica. Lange medical book*, 11th ed. México: McGraw-Hill-Lange, 987 - 998 2009, ch. Introducción a la toxicología ocupacional y ambiental, pp. 1–207.

- [15] Z. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. (2014) Toxic gas sensor manual (MQ-7). [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>.
- [16] ——. (2014) Flammable gas sensor manual (MQ-4). [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>.