

Sistema sensor inalámbrico para el estudio y control de la calidad del aire en interiores

Wireless sensor system for the study and control of indoor air quality

MSc. Daniel Garnier Fernández¹

MSc. Bradies Lambert Navarrete²

Dr. Alejandro Durán Carrillo de Albornoz²

Dra. Olimpia Arias de Fuentes^{2*}

¹Departamento de Bioingeniería (CEBIO), Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE, La Habana, Cuba

²Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), Universidad de la Habana (UH), La Habana, Cuba

*Autor para la correspondencia. correo electrónico: oarias@imre.uh.cu

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo, en su primera etapa, de un sistema sensor electrónico con comunicación inalámbrica, basado en la plataforma Arduino, para la detección de gases, vapores y otras variables ambientales. El sistema se ha diseñado para el estudio y control de la calidad del aire en interiores, mediante la visualización y el registro de las concentraciones de vapor de etanol –como compuesto orgánico volátil (COV)– y oxígeno (O₂) presentes en el medio, así como la humedad relativa y la temperatura. El sistema sensor se ajustó y programó para medir concentraciones de vapor de etanol entre 0,17 y 3,43 ppm, con un error relativo de 1.5%; concentraciones de oxígeno entre 0% y 100% respectivamente, con una incertidumbre de $\pm 1\%$. La humedad relativa en el rango de 0 % a 100 % y la temperatura entre -10 °C y +50 °C, con incertidumbres de $\pm 3,5\%$ y $\pm 1^\circ\text{C}$ respectivamente.

Palabras clave: calidad del aire, plataforma Arduino, sistema inalámbrico, sensores.

ABSTRACT

The development, in its first stage, of an electronic sensor system for the detection of gases, vapors and other environmental variables is presented. This system is based on electronic sensors and an Arduino platform comprising a wireless communication module. The sensor system is intended for the study and control of indoor air quality, by visualizing and recording the concentrations of ethanol vapor - such as volatile organic compound (VOC) - and oxygen (O₂) present in the environment, as well as the relative humidity and temperature. The system was tuned to measure ethanol vapor concentrations in the range from 0, 17 to 3, 43 ppm with a relative error of 1,5 %; oxygen concentrations from 0 % to 100 %, with an uncertainty of $\pm 1\%$. The relative humidity in the range from 0% to 100% and the temperature from -10 °C to +50 °C, with uncertainties of $\pm 3,5\%$ and $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectively.

Keywords: air quality, arduino platform, wireless system, sensors.

Recibido: 19/2/2019

Aprobado: 7/5/2019

Introducción

En la actualidad se conoce que la industrialización, la reducción de áreas verdes y la acción indiscriminada del hombre sobre la naturaleza han influido en el desbalance de la proporción de determinados gases presentes en el medio ambiente. Tales son los casos del monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), todos ellos considerados contaminantes y cuyo desbalance afecta considerablemente la salud.^(1,2)

En nuestro país, al igual que en grandes países como China y México, se han reportado niveles de contaminación, calificados como altos y muy altos, en zonas cercanas a los principales polos industriales, lo cual constituye un riesgo para la vida humana.⁽³⁾ Esta contaminación, en Cuba, se suma a la carente atención sobre la calidad de aire en entornos interiores de ambientes laborales o sociales.

Desde décadas pasadas se han implementado dispositivos y sistemas comerciales destinados al monitoreo de variables, gases y vapores ambientales, a fin de conocer y

controlar estos elementos contaminantes en entornos laborales. Los principales reportes muestran la existencia de tecnologías que evalúan variables como la temperatura, la humedad relativa, el punto de rocío y gases como el CO, CO₂, N₂O, NO₂, los COVs y el SO₂, entre otros.⁽⁴⁾

Aunque existe una variedad de sistemas y dispositivos reportados para evaluar la calidad del aire, tales como el sistema de alarma CO1224T/CO1224TR (~\$60,0 USD) del fabricante *System Sensor*, para la detección de CO y los dispositivos *X-am® 5000 Personal Monitor*, *X-am® 5600* y *X-zone® 5000 Area Monitor* (~\$1300,0 – \$2200,0 USD) del fabricante *Dräger*, para medir varios de los compuestos anteriores, estos resultan bastante costosos, lo cual constituye una limitante para su empleo en países de bajos recursos, como el nuestro. En este sentido, los sistemas no comerciales, basados en plataformas de desarrollo constituyen una alternativa interesante.⁽⁵⁻⁷⁾

Por lo antes comentado, y dada las limitaciones en cuanto a condiciones laborales que garanticen una calidad del aire óptima, la poca información que existe sobre ello en nuestro país y ante la necesidad de estudiar el comportamiento de determinados gases, vapores y otras variables ambientales en interiores, en este trabajo se desarrolló un sistema basado en sensores químicos y físicos y la plataforma Arduino Megacon un módulo de comunicación inalámbrica XBee que resulta más económico que los dispositivos comerciales.^(8,9) Este sistema está destinado a monitorizar las concentraciones de algunos compuestos orgánicos volátiles (COVs) y oxígeno, así como la humedad relativa y temperatura, en ambientes interiores. Ello permite evaluar parcialmente la calidad del aire de forma automatizada.

Materiales y métodos

Para la medición de la temperatura fue seleccionado el sensor comercial monolítico LM335. Este sensor presenta una salida lineal con una sensibilidad de 10 mV/°C.⁽¹⁰⁾ Para la medición de la humedad relativa, se utilizó el sensor integrado HIH-4030, el cual posee buena sensibilidad (30,7mV/%RH), reducido tamaño (4,17x2, 68x12,9 cm) y un tiempo de respuesta rápido (≈ 70 ms).⁽¹¹⁾ En el caso del oxígeno, fue seleccionado el sensor electroquímico KE-25, cuya respuesta es lineal, y tiene una precisión de $\pm 1\%$.⁽¹²⁾ Con relación a la medición de los COVs, se trabajó con el sensor MQ-3, del fabricante *Hanwei Electronics Co. Ltd.* Este último es un sensor químico, de principio resistivo, en el que su conductividad varía cuando es expuesto a vapores de etanol, en presencia de oxígeno y a una temperatura entre 300°C y 600°C según el óxido. Está basado en un óxido metálico semiconductor y entre sus principales características están su rápida respuesta (del orden

de los segundos), buena sensibilidad, estabilidad, larga vida, bajo costo y fácil conexión con sistemas electrónicos, tal y como plantea el fabricante.⁽¹³⁾ Debe notarse que en esta etapa de desarrollo se concibió el prototipo utilizando solamente un sensor de vapores, en este caso de etanol, por ser un vapor inocuo, volátil, disponible en el laboratorio y barato. En trabajos futuros el sistema puede escalarse para medir otros compuestos y gases como H₂S, NO_x, propano, butano, metano y CO, entre otros, añadiendo a la disponibilidad de sensores de gases basados en semiconductores de óxidos metálicos, en dependencia del ambiente a evaluar.

Para la adquisición multicanal y el procesamiento de los datos, fue utilizada la plataforma de desarrollo Arduino Mega 2560, como elemento principal del *hardware*. A esta se conectaron los sensores, con sus respectivos circuitos de acondicionamiento, y también la estación de trabajo (PC) por vía inalámbrica. En la figura 1, se muestra el esquema general del sistema.

La comunicación inalámbrica entre la PC y el módulo de medición se estableció con una interfaz de comunicación bajo el estándar IEEE 802.15.4. Para ello se utilizó el módulo *XBee Shield*, conectado al módulo de medición implementado. Conectado a la PC, se empleó el módulo XBee-PRO[®] 868, para lograr el enlace final.

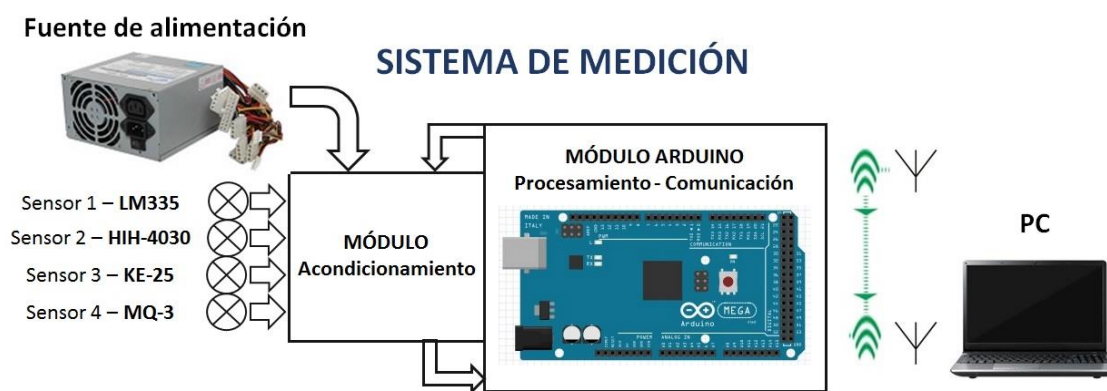


Fig. 1. Esquema general del sistema

A nivel de *software*, se implementó un programa, incorporado a la plataforma Arduino, para el procesamiento de los datos y la transmisión de información hacia la PC, el cual se conformó en tres etapas: adquisición, procesamiento, y comunicación. En la figura 2 se muestra el soporte físico del sistema desarrollado.

Para evaluar el comportamiento del sistema de medición se estableció un procedimiento experimental bajo condiciones de laboratorio. En este caso se verificaron los valores de

temperatura y la humedad relativa del ambiente, las que fueron monitorizadas con el registrador digital de datos TH0160, el cual se empleó también, como referencia para la calibración del sistema. Este instrumento comercial es adecuado como patrón para la realización de estas mediciones en ambientes interiores.⁽¹⁴⁾ El procedimiento consistió en realizar mediciones en continuo por un período de siete horas, en un mismo local tomando, cada una hora, cien mediciones con intervalos de 1 s.

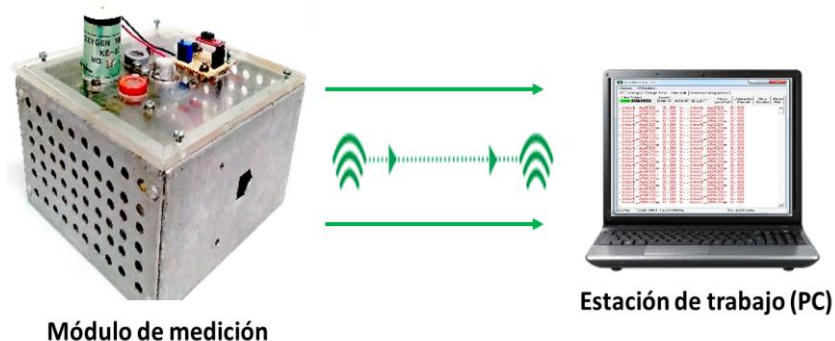


Fig. 2. Soporte físico del sistema

Con el objetivo de conocer y corregir los errores sistemáticos introducidos por el sistema de medición multicanal, así como verificar su linealidad, se realizó una prueba “en seco” y posteriormente una interpolación lineal, con los valores de tensión medidos con el sistema implementado, con relación a los valores medidos con un instrumento de referencia para cada uno de los canales analógicos. Esto es posible ya que cada canal de medición recibe un nivel de tensión (voltaje) determinado, proveniente del circuito de acondicionamiento de cada sensor, el cual a nivel de simulación eléctrica se modela con un divisor de tensión, cuya respuesta depende de los valores de resistividad del circuito. Para ello se empleó una caja de resistencia tipo BOX P33 con un intervalo de valores de resistencia de 0.1Ω a $99,99 \text{ k}\Omega$ y un multímetro digital *Fluke* modelo 45 DDM como instrumento de referencia.

Para evaluar el sistema en la detección de vapores volátiles, se emplearon muestras de etanol líquido que fueron inyectadas con una micropipeta en bolsas de *Tedlar*[®] previamente limpias y luego rellenas con aire filtrado. Los volúmenes de etanol líquido inyectados se consideraron despreciables frente al volumen de aire limpio (40L) suministrado en las bolsas. Luego de transcurrir un tiempo de 2 h se asumió que las muestras fueron evaporadas totalmente. De esta manera se garantizó la homogeneidad de la mezcla en la bolsa para efectuar las mediciones correspondientes a las 11 concentraciones de vapores de etanol.

Con las muestras ya preparadas, se realizaron las mediciones haciendo circular todo el contenido de las bolsas por un circuito de arrastre de fluidos compuesto por: la bolsa de Tedlar[®], un filtro de aire, una bomba de vacío, una cámara de medidas de volumen igual a 1 L, tres válvulas manuales, y el instrumento implementado. En la figura 3, se muestra el esquema correspondiente al sistema de arrastre de fluidos.

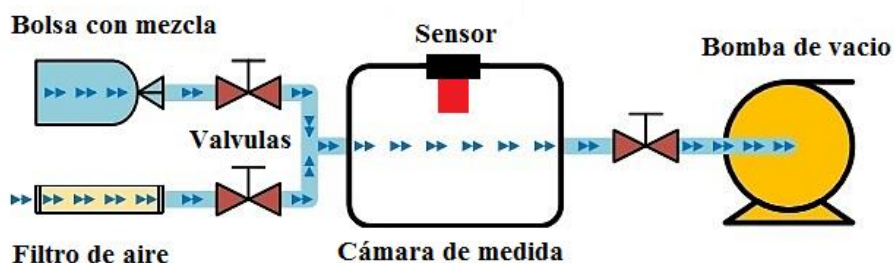


Fig. 3. Sistema de arrastre de fluidos

Para evaluar una nueva muestra, se requirió limpiar la cámara de medidas, lo cual se hizo aislando la bolsa de la bomba de vacío, y conectando la cámara de medidas directamente a la salida de aire filtrado. Este sistema permitió conformar pulsos de concentración de vapores de etanol con una línea base de aire filtrado. Las muestras fueron presentadas al sistema en una secuencia inyectando proporciones de 10, 30, 50, 70, 90, 100, 120, 140, 160 y 180 y 200 μL en 40 L de aire limpio. Para evaluar la repetibilidad del sistema, se obtuvieron tres replicados por cada muestra, en bolsas diferentes. Estos valores se promediaron y se representaron en un gráfico de tensión (relacionada con la concentración) vs tiempo. Para obtener la curva de calibración, se promediaron los valores del período estacionario correspondientes a cada muestra lo que permitió relacionar, el volumen inyectado con la respuesta eléctrica del sensor (R_s).

Resultados y discusión

De la prueba “en seco”, se obtuvieron los errores de intercepto y ganancia para los cuatro canales de medición del instrumento y los valores promedios de todos los canales, resultando $E_i=0,001\ 93\ \text{k}\Omega$, y $E_G=1,036\ 35$ respectivamente. Como resultado del ajuste se obtuvo la gráfica representada en la figura 1.3. Los datos de la gráfica se muestran en la tabla 1. Para corregir estos errores sistemáticos durante la medición de vapores se aplicó

a nivel de *software* la ecuación 1 con los valores equivalentes de resistencia, obtenidos midiendo la tensión de salida en cada canal de medición.

$$R_{S\text{ corregido}} = \frac{R_{S\text{ medido}} - 0,001\ 93}{1,036\ 35} \quad (1)$$

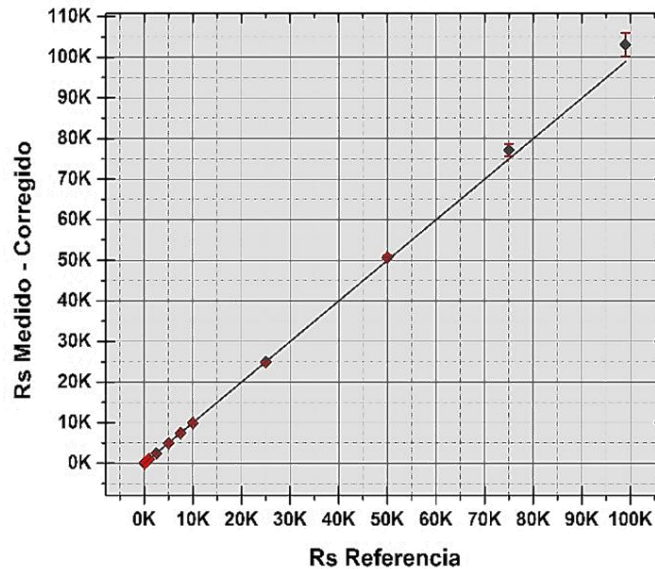


Fig. 4. Curva de calibración de valores promediados de los cuatro canales de medición

Tabla 1- Resultados estadísticos del ajuste lineal, con corrección por *software*.

Canales	Valores promedios		
	<i>y = mx + n</i>	<i>Pendiente (m)</i>	<i>Intercepto (n)</i>
Valor		0,998 80	0,000 06
Error estándar		0,000 76	0,000 04
Coefficiente R ²		0,999 99	

En la tabla 1 puede observarse como se reduce el error de intercepto a 0,000 06 kΩ, y el de ganancia se aproxima, aún más, al valor unitario, siendo este de 0,998 80. También puede verificarse el valor tomado por el índice de correlación R²=0,999 99, lo que indica cuán próximos están los puntos tomados de las mediciones, con los puntos ideales de la ecuación de la recta lineal.

En la figura 5 se muestran los resultados de las mediciones de temperatura medidas con el sistema y medidas simultáneamente con el instrumento de referencia.

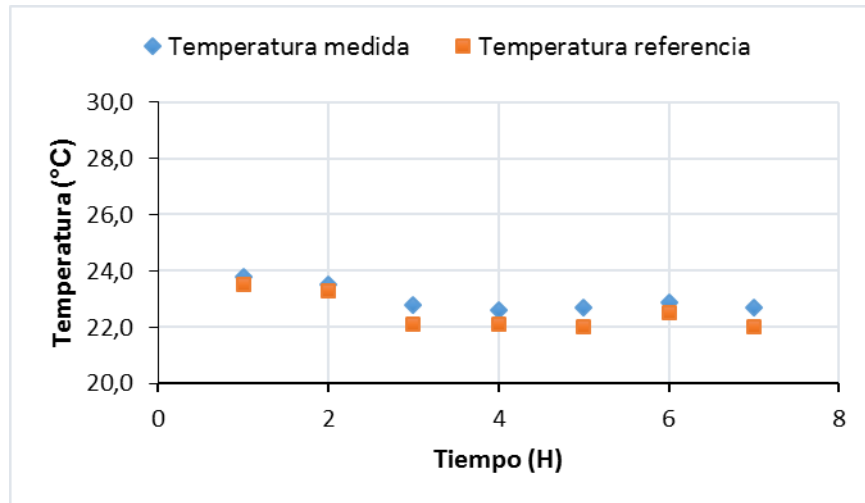


Fig. 5. Gráfico de temperatura medida con el sistema y temperatura de referencia, en un período de siete horas

Los resultados obtenidos han arrojado que la incertidumbre en las mediciones no excede del valor de ± 1 °C, cuyo valor se considera aceptable ⁽¹⁵⁾, y con un error relativo de 3,2 %.

Con relación a la medición de humedad relativa, se siguió un procedimiento similar al empleado para evaluar la temperatura. En la figura 6 se muestra el resultado de esta evaluación. En este caso, la incertidumbre en las mediciones no sobrepasa de $\pm 4,5$ %, con un error relativo que no excede de 6,5 %. Estos valores son aceptables en aplicaciones medioambientales. ⁽¹⁶⁾

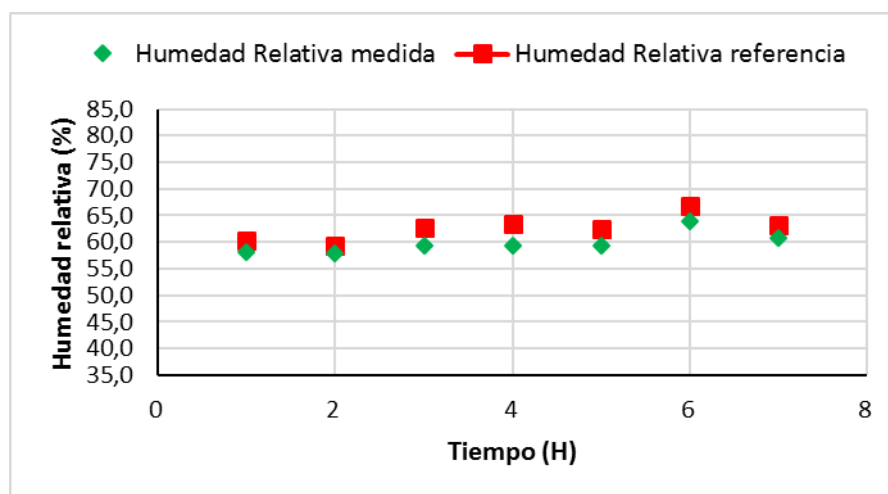


Fig. 6. Gráfico de humedad relativa medida con el sistema y humedad relativa de referencia, en un período de siete horas

En la figura 7 se muestran los pulsos promedios, de tres replicados por muestra, registrados por el sistema, como respuesta a diferentes volúmenes de vapores de etanol.

En ésta puede apreciarse la evolución temporal del nivel de tensión correspondiente a las fases transitoria, estacionaria y de recuperación, como respuesta del sistema (sensor) a la presencia del vapor de etanol. Igualmente se aprecia el nivel de tensión de la fase estacionaria el cual corresponde a diferentes concentraciones de vapor generadas.

En esta misma figura puede apreciarse como al incrementar la concentración asociada a una muestra, aumenta el nivel de tensión de salida correspondiente.

En la figura 8 se presenta la curva de calibración linealizada del sensor, con los valores obtenidos de resistencia promedio durante la fase estacionaria, con respecto a diferentes concentraciones de vapores de etanol. Se han tomado los valores de tensión correspondientes a la media de tiempo de la fase estacionaria correspondiente a 176 s, indicada con una línea punteada en la figura 1.7.

El modelo matemático que mejor se ajustó a los puntos experimentales, fue el de la función potencial, con ecuación igual a $\gamma = a \cdot x^b$, tal y como plantea el fabricante, y según lo consultado en la literatura científica.⁽¹³⁾

Con el ajuste, se obtuvieron valores de $a = 2,279$ y de $b = -0,798 2$, con un coeficiente de correlación ($R^2 = 0,982 5$).

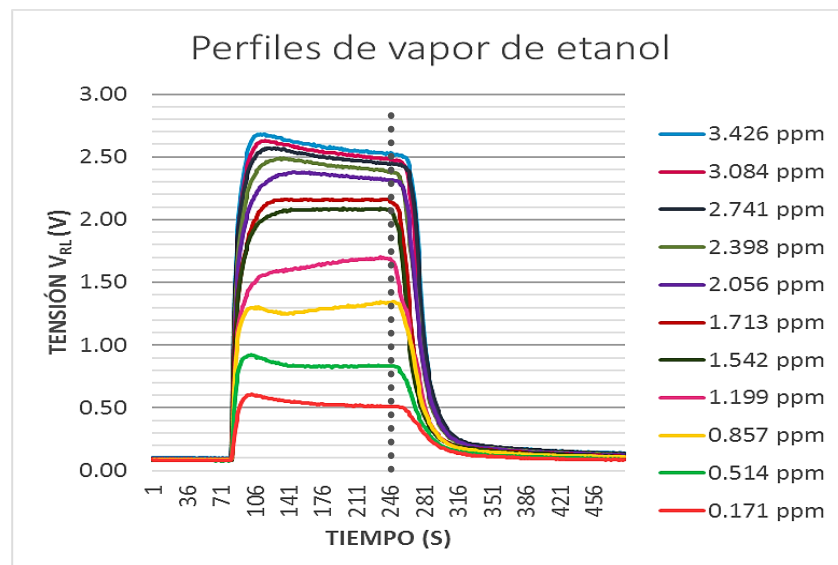


Fig. 7. Perfiles de vapor de etanol, para diferentes concentraciones de la muestra

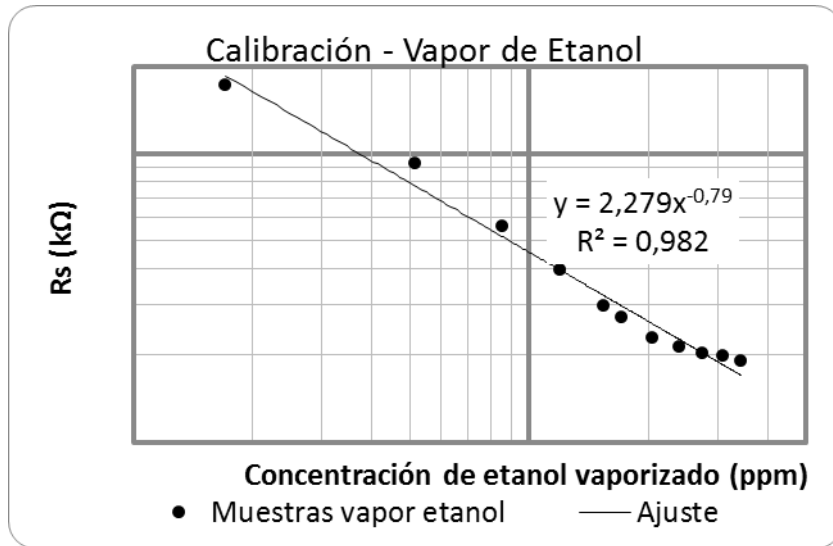


Fig. 8. Curva de calibración del sensor de vapor de etanol

Es importante resaltar que, con la ecuación obtenida, puede estimarse la concentración de vapores de etanol presente en el medio, a partir del valor de la resistencia del sensor R_s medida en la fase estacionaria.

Posteriormente, se evaluó la respuesta del sistema en la medición de oxígeno. En la figura 9 se muestra la gráfica correspondiente al promedio de tres replicados, obtenidos como respuesta del sistema, durante el vaciado de un recipiente, con volumen de 1 L, en un tiempo aproximado de 1 min.

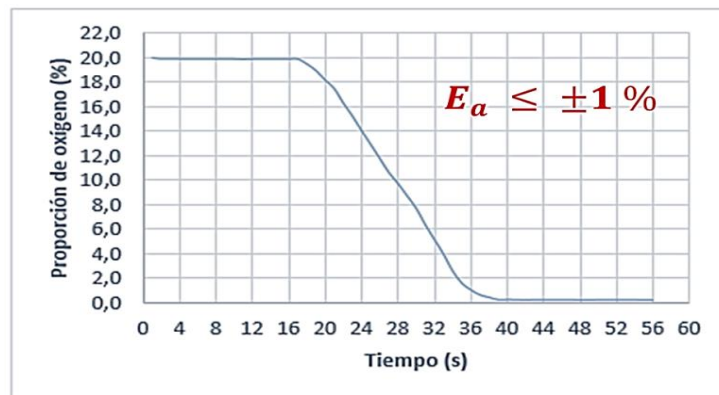


Fig. 9. Respuesta del sistema midiendo O_2 durante un proceso de vacío

Los valores obtenidos, antes y después de efectuar la prueba, fueron $V_{20\%} = 11,73$ mV y $V_{0\%} = 0,71$ mV, respectivamente. Según lo planteado por el fabricante del sensor, para una concentración de O_2 ambiental de aproximadamente un 20 %, la respuesta del sensor debe estar comprendida en el rango entre 11 mV – 15 mV. Los errores que se introducen en el proceso de medición del O_2 no son significativos. El sistema mide concentración de O_2 de forma estable, continua y con una incertidumbre en la medición de $\pm 1\%$.

Conclusiones

Se desarrolló, en una primera etapa, un sistema sensor electrónico con comunicación inalámbrica, basado en la plataforma Arduino, para la detección de gases, vapores y otras variables ambientales. El sistema ofrece la posibilidad de medir concentraciones de vapores de etanol, como muestra de compuesto orgánico volátil, en un rango entre 0,17 y 3,43 ppm, con un error relativo de $\pm 1,5$ % y con un tiempo de respuesta de, aproximadamente, 26 s. La función obtenida del ajuste se corresponde con lo reportado en la literatura. El sistema además mide, de forma estable, proporciones entre 0 % y 100 % de concentración de oxígeno con una incertidumbre en la medición de ± 1 %; la temperatura en un rango comprendido entre -10 °C y $+50$ °C, con una incertidumbre en la medición que no excede de ± 1 °C y la humedad relativa en un rango de 0 al 100 % con una incertidumbre de $\pm 3,5$ %. Todos estos valores están en correspondencia con los estándares aceptados para la medición experimental de estos parámetros ambientales.

Referencias bibliográficas

1. WOLKOFF P. "Indoor air humidity, air quality, and health—An overview". *International journal of hygiene and environmental health*. 2018, **221**(3), 376-90. ISSN: 1438-4639.
2. LEGARRETA PERUSQUIA A., DELGADO RIOS M., "Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas". *Culcyt//Medio Ambiente*. 2015, 234-245. ISSN: 2007-0411.
3. MUJAN I, ANĐELKOVIĆ A, MUNĆAN V, KLJAJIĆ M, SERBIA DR. "Influence of Indoor Environmental Quality on human Health and Productivity-A Review". *Journal of Cleaner Production*. 2019. ISSN: 0959-6526.
4. System Sensor, "Detectores de Monóxido de Carbono CO1224T y CO1224TR con Tecnología Real Test®," Instruction Manual 2012.

5. Oha INSTRUMENTS, "Instrument Catalog," ed, 2013, pp. 390-445.
6. OKOKPUJIE K, NOMA-OSAGHAE E, MODUPE O, JOHN S, OLUWATOSIN O. "A smart air pollution monitoring". *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2018, 799–809. ISSN: 0976-6316.
7. ARROYO P, HERRERO JL, SUÁREZ JI, LOZANO J. "Wireless Sensor Network Combined with Cloud Computing for Air Quality Monitoring". *Sensors*. 2019, **19**(3), 691. ISSN: 1424-8220.
8. WU Y, LIU T, LING SH, SZYMANSKI J, ZHANG W, SU SW. "Air Quality Monitoring for Vulnerable Groups in Residential Environments Using a Multiple Hazard Gas Detector". *Sensors*. 2019, **19**(2), 362. ISSN: 1424-8220.
9. GARNIER FERNÁNDEZ D, "Sistema detector de variables y gases ambientales para entornos interiores," Bioingeniería, Universidad Tecnológica de la Habana - CUJAE, 2017.
10. Technical data LM335A Temperature Sensor. SGSHOMSON[®] MICROELECTRONIS. October 1997.
11. Technical data HIH-4030 Humidity Sensor. HONEYWELL: Sensing and Control. 2008.
12. Technical information for KE-Series. KE-25 Oxygen Sensor. FIGARO ENGINEERING INC. 2005.
13. Technical data MQ-3 Gas Sensor. HANWEI ELETRONICS CO. LTD. 2012.
14. Technical information for Digital Instrument TH0160. Temperature & Humidity Data Logger TH0160.
15. AXIOMET: Instrumentos con alma digital. URL: <https://es.axiomet.eu/page/2374/Incertidumbre-de-la-medicion-de-la-temperatura-dependiendo-del-error-y-de-la-resolucion-del-termometro>, Visto: 4 de febrero/2019
16. Equipos de Laboratorio de Colombia. URL: https://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=4703, Visto: 4 de febrero/2019