

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA SENSIBILIDAD DE SENSORES DE
METANO Y MONÓXIDO DE CARBONO AL ADICIONAR UN MATERIAL A
BASE DE ÓXIDO DE GRAFENO**

DANIEL RICARDO LÓPEZ GUTIÉRREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS, ESCUELA DE QUÍMICA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2020

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA SENSIBILIDAD DE SENSORES DE
METANO Y MONÓXIDO DE CARBONO AL ADICIONAR UN MATERIAL A
BASE DE ÓXIDO DE GRAFENO**

DANIEL RICARDO LOPEZ GUTIERREZ

Trabajo de grado para optar al título de Químico

Ph.D Enrique Mejía Ospino

(LEAM), UIS

M. Sc Elizabeth Ayala Blanco (GIFE), CDT de Gas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS, ESCUELA DE QUÍMICA**

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

BUCARAMANGA

2020

DEDICATORIA

Existen logros que son como escalar el Everest, muchos intentan subir, no todos llegan, no todos usan los mismos caminos y no todos tardan el mismo tiempo en llegar a la cima, al fin cada experiencia es única, este libro es prueba de ello, con él finalizo un largo camino de aprendizaje.

Dedico este trabajo a mi familia que siempre estuvo ahí, a mis papas que con su esfuerzo constante mantuvieron la esperanza a mis abuelos que nunca me dejaron a mi suerte y siempre conté con su amparo y a mis tíos que ofrecieron su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Faltarían hojas para agradecer lo que en media vida de aprendizaje, apoyo, consejos y experiencias corresponde, agradezco a mi familia, su apoyo fue más que fundamental en este proceso de ires y venires, a mis maestros por educarme y dar en muchos casos aprendizajes que trascienden la formación profesional, a la UIS que dentro de su entorno me forme en lo que soy hoy por hoy, al CDT del Gas quienes me permitieron el desarrollo de esta práctica, y a todos mis amigos, compañeros y colegas que acompañaron este largo trasegar.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES.....	19
2.1 DETECCIÓN DE GASES.....	19
2.2 TIPO DE SENSORES.....	20
2.2.1 Sensor electroquímico.....	20
2.2.2 Sensor catalítico.....	21
2.2.3 Sensores piezoeléctricos.....	22
2.3 Óxido de grafeno.....	23
3 SECCIÓN EXPERIMENTAL.....	26
3.2 REVISIÓN Y ENTRENAMIENTO.....	26
3.2 PREPARACIÓN DE MEZCLAS A NIVEL DE TRAZAS DE CH ₄ Y CO EN VALORES CRITERIO.	26
3.3 MEDICIÓN DE CORRIENTE CON SENSORES ELECTROQUÍMICOS Y CATALÍTICOS.....	26
3.4 ADICIÓN DEL MATERIAL A BASE DE ÓXIDO DE GRAFENO PREPARADO PREVIAMENTE EN EL LEAM.....	27
4 RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
5 CONCLUSIONES	36
6 RECOMENDACIONES	37
BIBLIOGRAFÍAS	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Señales eléctricas obtenidas en el sensor 1 tomado como referencia a diferentes concentraciones de CO	28
Tabla 2. Valores de concentración inicial y final a del sensor 2 de CO sin adicionar y adicionando 1 μL óxido de grafeno.....	30
Tabla 3. Valores de concentración inicial y final a del sensor 3 de CO sin adicionar y adicionando 2 μL óxido de grafeno.....	31
Tabla 4. Señales eléctricas obtenidas en el sensor 1 tomado como referencia a diferentes concentraciones de CH_4	32
Tabla 5. Valores de concentración inicial y final a del sensor 2 de CH_4 sin adicionar y adicionando 1 μL óxido de grafeno.....	34
Tabla 6. Valores de concentración inicial y final a del sensor 3 de CH_4 sin adicionar y adicionando 2 μL óxido de grafeno.....	35
Tabla 7. Mediciones de señales ADC en el sensor tomado como referencia a diferentes concentraciones de CO	42
Tabla 8 . Mediciones de señales eléctricas en el sensor 2 a diferentes concentraciones de CO sin adicionar óxido de grafeno	42

Tabla 9. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 2 a diferentes concentraciones de CO adicionando 1 μ L óxido de grafeno	43
Tabla 10. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 3 a diferentes concentraciones de CO sin adicionar óxido de grafeno	43
Tabla 11. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 3 a diferentes concentraciones de CO adicionando 2 μ L óxido de grafeno	44
Tabla 12. Mediciones de señales ADC en el sensor tomado como referencia a diferentes concentraciones de CH ₄	45
Tabla 13. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 2 a diferentes concentraciones de CH ₄ sin adicionar óxido de grafeno	45
Tabla 14. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 2 a diferentes concentraciones de CH ₄ adicionando 1 μ L óxido de grafeno	46
Tabla 15. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 3 a diferentes concentraciones de CH ₄ sin adicionar óxido de grafeno	46
Tabla 17. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 3 a diferentes concentraciones de CO adicionando 2 μ L óxido de grafeno	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sensor electroquímico de Monóxido de Carbono	20
Figura 2. Sensor Catalítico de metano	22
Figura 3. Sensor piezoeléctrico	23
Figura 4. Óxido de Grafeno	24
Figura 5. Montaje experimental de sensores de CO y CH ₄	27
Figura 6. Comportamiento del sensor MQ7 tomado como referencia	29
Figura 7. Lecturas de señales ADC sensor de metano	33

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Señales ADC sensores de monóxido de carbono	42
Anexo B. Señales ADC sensores de metano	45

GLOSARIO

CH₄.	Metano
CO.	Monóxido de carbono
EPA.	Environmental Protection Agency
%LEL.	Percent Lower Explosive Limit
MRGC.	Material de referencia gaseoso certificado

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA SENSIBILIDAD DE SENSORES DE METANO Y MONÓXIDO DE CARBONO AL ADICIONAR UN MATERIAL A BASE DE ÓXIDO DE GRAFENO*

AUTOR: DANIEL RICARDO LÓPEZ GUTIÉRREZ**

PALABRAS CLAVES: SENSORES, ELECTROQUÍMICO, CATALITICO, DILUCIÓN

DESCRIPCIÓN:

La combustión de gas, la acumulación de gases (monóxido de carbono, y el metano) y la exposición en lugares con poca ventilación, se consideran un riesgo mortal para la salud. Es importante verificar los niveles de gases presentes en la atmósfera de trabajo para evitar accidentes, y por ello se han estado estableciendo regulaciones para controlar los límites de exposición, por medio del monitoreo continuo, en donde las mediciones efectuadas tengan una alta confiabilidad metrológica. En la presente práctica empresarial se evaluó el comportamiento de dos sensores de metano (MC101) y monóxido de carbono (MQ7), que han sido utilizados comúnmente en las inspecciones de gas domiciliario y se evaluó el efecto que tienen al adicionar un material a base de óxido de grafeno preparado previamente en el LEAM. Para el caso del sensor de monóxido de carbono las concentraciones evaluadas resultaron mayor a la de referencia, mientras que en el caso de metano se evidenció un incremento de la sensibilidad del sensor. Para el sensor MC101 a concentraciones por debajo de 2,5 %volumen, los valores obtenidos de concentración fueron iguales o cercanos a la concentración generada de referencia. Sin embargo, después de generar una concentración igual o superior a 2,2 %volumen la concentración no varió significativamente en el sensor de metano.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Director: Enrique Mejía Ospino, Codirectora: Elizabeth Ayala Blanco

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT THE SENSITIVITY OF METHANE AND CARBON MONOXIDE SENSORS WHEN ADDING A MATERIAL A GRAPHENE OXIDE BASE*

AUTHOR: DANIEL RICARDO LÓPEZ GUTIÉRREZ**

KEY WORDS: SENSORS, ELECROCHEMICAL, CATALYTIC, DILUTION

DESCRIPTION:

Gas combustion, gas accumulation (monoxide carbon and methane), and exposure in poorly ventilated locations are considered a fatal health risk. It is important to verify the levels of gases present in the working atmosphere to avoid accidents, and therefore regulations have been established to control exposure limits, through continuous monitoring, where the measurements made have high metrological reliability. In the present business practice, the behavior of two sensors of methane (MC101) and monoxide carbon (MQ7), which have been commonly used in home gas inspections, was evaluated and the effect they had when adding a material base on Graphene oxide previously prepared in LEAM. In the case of the monoxide carbon sensor, the concentrations evaluated were higher than the reference material, while in the case of methane, an increase in the sensitivity of the sensor was evident. For the MC101 sensor at concentration below 2.5 %volume the concentration values obtained were equal or nearby to the generated reference concentration. However, after generating a concentration equal or greater than 2,2 %volume, the concentration did not vary significantly in the methane sensor.

*Degree work

**Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Director: Enrique Mejía Ospino, Codirectora: Elizabeth Ayala Blanco

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica representa uno de los principales problemas ambientales deteriorando la calidad del aire, causando efectos negativos sobre la salud pública, el medio ambiente, la seguridad industrial, entre otros. Las concentraciones de algunos contaminantes en la atmósfera por encima de los valores establecidos en las normas ambientales en largos periodos de exposición, generan la necesidad de impulsar la gestión de calidad del aire y seguridad industrial. Por lo tanto, es importante garantizar el cumplimiento de los límites de emisión de contaminantes como el CO y el CH₄, y una de las alternativas son el control en su medición. Debido a la criticidad de sus impactos, es necesario garantizar la cadena de trazabilidad metrológica y confiabilidad en las mediciones de estos gases. En Colombia, una de las principales causas de contaminación en el aire es el uso de combustibles fósiles, representando un 41% del total de emisiones de material particulado, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono ocasionados por fuentes móviles. A nivel nacional se han establecido diferentes regulaciones con el objetivo de reglamentar los lineamientos para garantizar que la calidad del aire sea adecuada¹.

El monóxido de carbono (CO) es un gas que presenta una toxicidad elevada y es incoloro e indoloro, y por lo tanto no es detectable por el organismo humano. El CO tiene graves efectos sobre la función celular, ya que al ingresar al organismo el CO se une con una mayor preferencia a la hemoglobina que el oxígeno, disminuyendo la cantidad de oxígeno disponible para las células. La EPA (Environmental

¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 2254 (1, noviembre, 17). Por la cual se adopta la norma de calidad del ambiente y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El Ministerio, 2017.p. 2-7.

Protection Agency) estableció como límite primario de exposición 35 ppm durante una hora, a la cual según evidencia clínica el CO inicia a provocar efectos adversos en la salud humana². La producción de CO tiene origen en la combustión incompleta de sustancias compuestas por carbono, como las encontradas en la madera, el carbón mineral, el gas natural y los derivados del petróleo. Estas emisiones comúnmente se deben al funcionamiento no óptimo de equipos industriales como calderas y chimeneas, así como también de aparatos domésticos que queman combustible, como las estufas y los calentadores de agua. El CH₄ es también un gas indoloro e incoloro, usado principalmente como precursor para realizar síntesis de sustancias orgánicas y como gas combustible. En grandes cantidades desplaza el aire, generando una disminución en las cantidades de oxígeno disponible en la atmósfera provocando asfixias. Este compuesto puede ser inflamable si se mezcla con el aire en determinadas concentraciones y donde haya presencia de una fuente de ignición³.

Actualmente en Colombia existe una demanda creciente de servicios de calibración de detectores de gas en calidad de aire urbano, emisiones atmosféricas de fuentes fijas y atmósferas peligrosas. Por ejemplo, la Resolución 90902 de 2013⁴ requiere que la concentración de CO se verifique por debajo de 50 ppm en un radio de 1m alrededor del artefacto de gas. Por su parte, la Resolución 909 de 2008⁵, establece

² ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. [Sitio web]. Estados Unidos: EPA. [Consulta 1 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/co/data/CO-REA-AmendedJuly2010.pdf>.

³ WATANABE, T., and MORITA, M., y M. Morita. Asphyxia due to oxygen deficiency by gaseous substances. *Forensic Science International*. 1998, nro. 1, pp. 47-59. DOI: 10.1016/S0379-0738(98)00112-1.

⁴ COLOMBIA. SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO. Resolución 90902 (24, octubre, 2013). Por medio de la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Internas de Gas Combustible. Bogotá: El ministerio. p. 2-25.

⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución Número 909. (5, Junio, 2008. Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El Ministerio.p. 1-35.

que la concentración promedio de CO en el aire urbano sea menor a 40 ppm en un periodo de 8 horas. Y para el caso del CH₄ se genera una atmósfera explosiva entre el 5 %LEL y 10 %LEL, y en el caso de los detectores las alarmas inician en concentraciones alrededor de 0,5 %vol. Todas estas mediciones requieren contar con trazabilidad metrológica en diferentes intervalos de concentración. Sin embargo, actualmente los detectores cuentan con diferentes clases de sensores, los cuales presentan vida útil corta y altos valores de incertidumbre en su medición. Por lo tanto, en la presente práctica se planteó evaluar un material a base de óxido de grafeno preparado previamente en el LEAM, con el objetivo de incrementar la sensibilidad de los sensores de tipo catalítico para el caso del CH₄ y sensores de tipo electroquímico para el caso del CO utilizados actualmente en las inspecciones de gas domiciliario.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la sensibilidad en sensores de CO y CH₄ al adicionar un material de óxido de grafeno.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar el comportamiento de sensores electroquímicos y catalíticos utilizados en la industria para la detección de CO y CH₄.
- Realizar mediciones con los sensores seleccionados en diferentes valores de concentración, especialmente en los límites establecidos por la regulación colombiana.
- Evaluar el efecto generado por la adición de óxido de grafeno en los sensores electroquímicos y catalíticos.

2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

2.1 DETECCIÓN DE GASES

Debido a un incremento acelerado del desarrollo industrial, se hace más frecuente el uso y manejo de sustancias químicas tóxicas e inflamables en la industria, generando gran preocupación por la seguridad industrial y salud ocupacional. Por esta razón se han desarrollado diferentes instrumentos para detectar gases y vapores que alertan a las personas cuando las concentraciones de estos gases sobrepasan los valores aceptables. Para determinar esta presencia de gases o vapores, se usan analizadores fijos para el caso de espacios interiores de instalaciones industriales y equipos portátiles de lectura directa para trabajos en campo o espacios confinados.

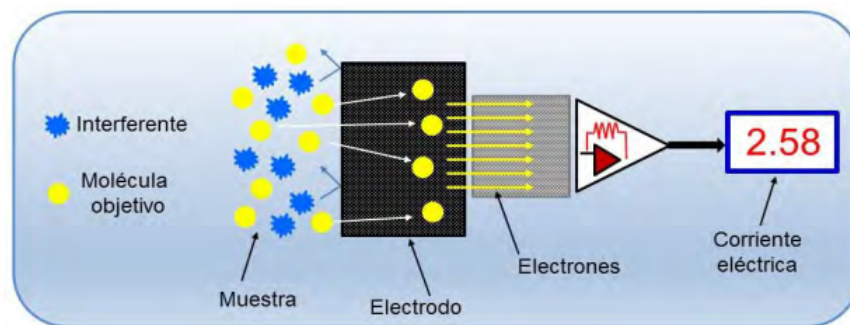
En el caso particular de los equipos portátiles la medición de la concentración de gas se realiza a través de sensores que traducen una señal, estos sensores son una herramienta adecuada para sistemas de control, debido a que pueden generar lecturas en tiempo real. Además, cuentan con transductores acoplados a una fase químicamente selectiva permitiendo transformar la información química en una señal. Para aumentar la selectividad del sensor se pueden utilizar diferentes elementos biológicos y químicos, los cuales generan una interacción entre el elemento sensor-analito y transforman esa señal hasta un dispositivo de medida y procesamiento de la información capturada ⁶.

⁶ SAHOUR SAYED., and AHMED ABD EL-MONEIM. High Performance Carbon Monoxide Gas Sensor based on Graphene, *Int. J. Eng. Res.* 2015. Vol 4. nro 06.pp. ISSN 2278-0181.518-523

2.2 TIPO DE SENSORES

2.2.1 Sensor electroquímico. En este tipo de sensores el elemento transductor basa su respuesta en la medida de una propiedad eléctrica generada en un sistema electroquímico, como potencial, corriente y su relación. De acuerdo a la técnica electroquímica se pueden clasificar en conductimétricos, amperométricos y potenciométricos. Este tipo de sensores se caracterizan principalmente por la robustez, operación sencilla, amplio rango de linealidad, tiempos de respuesta corta y fabricación económica.

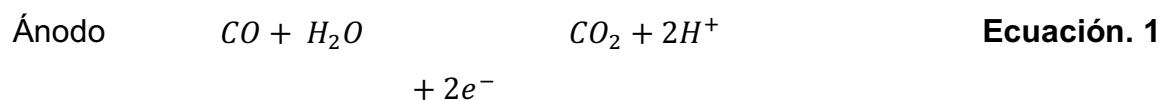
Figura 1. Sensor electroquímico



Fuente: María Porcel Valenzuela-Desarrollo de sensores electroquímicos⁷.

⁷ VALENZUELA, María Porcel. Desarrollo de sensores electroquímicos de afinidad preparados por electrodeposición para la detección de neurotransmisores. Trabajo de grado Doctora en Ciencia de materiales. España: Universidad de Alicante, 2016. 29.p.

Para el caso específico del CO su funcionamiento se basa en que las moléculas de CO pasan a través de una membrana permeable, a un electrodo de trabajo formando iones H^+ . Luego estos iones migran en un campo magnético al electrodo y generan un flujo de corriente en un circuito electrónico por medio de una reacción química que se genera por la presencia del oxígeno (Ecuaciones 1 y 2). Generalmente este tipo de sensores tiene una vida útil de dos años y la señal del sensor se estabiliza por medio del electrodo de referencia^{8 9}.

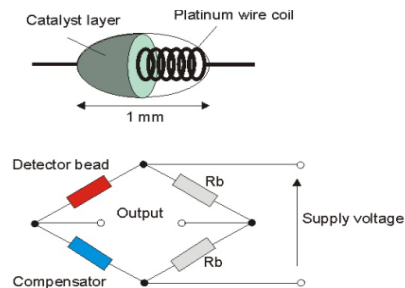


2.2.2 Sensor catalítico. Un sensor catalítico se encuentra formado por dos elementos: el primero es un detector, el cual contiene un material catalizador y es muy sensible a los gases combustibles. El segundo es un elemento denominado compensador, el cual no reacciona a estos gases, por consiguiente, los gases se queman en el elemento detector, provocado un aumento de temperatura del mismo y un aumento en el valor de la resistencia (Ver Ecuación 3).

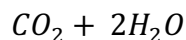
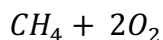
⁸ZHONGPING, *et al.* Synthesis and Characterization of *n*-Alkylamine-Stabilized Palladium Nanoparticles for Electrochemical Oxidation of Methane, *J. Phys. Chem. C*. 2010, vol. 114, nro 2, pp. 723-733. DOI:10.1021/jp907745v.

⁹ MANAN, Dosi, *et al.* Ultrasensitive Electrochemical Methane Sensors Based on Solid Polymer Electrolyte-Infused Laser-Induced Graphene, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. vol. 11, nro 6, pp. 6166-6173. DOI: 10.1021/acsami.8b22310.

Figura 2. Sensor Catalítico



Fuente: Beata Krupanek y Ryszard Bogacz- Dynamic Error Correction of Methane Sensor¹⁰



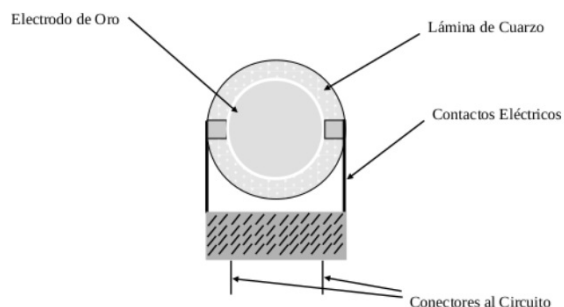
Ecuación. 3

2.2.3 Sensores piezoeléctricos. El funcionamiento de esta clase de sensores se basa en la gravimetría, mediante la medición de cambios de masa generada por la interacción de la especie química que se desea detectar. Este sensor tiene un material piezoeléctrico cubierto por un polímero que es selectivo para ciertas moléculas, y es sometido a una oscilación. Cuando el gas de interés está presente, se evidencia un cambio en la frecuencia base detectora del instrumento y esa frecuencia de resonancia depende del espesor del cristal piezoeléctrico¹¹.

¹⁰ KRUPANEK, Beata., and BOGACZ, Ryszard. Dynamic Error Correction of Methane Sensor, *Int. J. Electron. Telecommun.*, 2014, vol. 60, nro 4, pp. 287-289. DOI 10.2478/eletel-2014-0037

¹¹SHARAPOV, Valeriy. *Piezoceramic Sensors*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

Figura 3. Sensor piezoeléctrico



Fuente: De Sousa, Cristina; Manganiello, Lisbeth- Estado del Arte: Aplicaciones de los sensores piezoeléctricos¹²

2.3 Óxido de grafeno. El interés de la comunidad científica e industrial se ha incrementado por el empleo de materiales basados en nanotecnología, grafenos y óxidos metálicos, los cuales presentan propiedades con potencial aplicación como semiconductores, conductores eléctricos, sensores de detección de gas, entre otros^{13 14}.

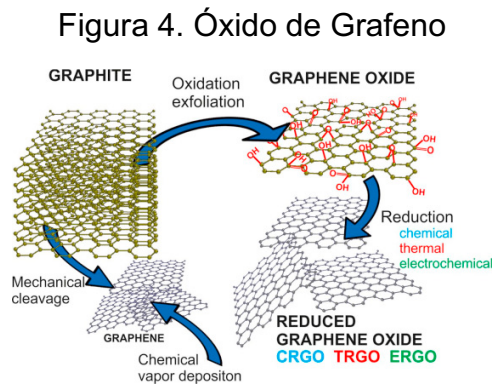
El grafeno es una de las formas alotrópicas del carbono con bidimensión, en donde cada átomo de carbono se encuentra unido a otros tres átomos de carbono mediante enlaces con hibridación sp^2 , los cuales forman una lámina plana con una estructura similar a la de un panel de abeja. Su estructura le confiere una elevada conductividad y una gran resistencia mecánica, y se puede encontrar de forma

¹² Sousa, C., and Manganiello, L. Review: Piezoelectric sensors applications in the detection of Contaminants in food, *Revista Ingeniería UC*, 2018. vol 25, nro 3, p. 16.

¹³ PANDA,D, *et al.* Selective detection of carbon monoxide (CO) gas by reduced graphene oxide (rGO) at room temperature, *RSC Adv.* 2016. vol. 6, nro 53, pp. 47337-47348, DOI: 10.1039/C6RA06058G.

¹⁴ SMITH, Anderson, *et al.*, Graphene-based CO₂ sensing and its cross-sensitivity with humidity, *RSC Adv.*, 2017. vol. 7, nro36, pp. 22329-22339, 2017, DOI: 10.1039/C7RA02821K.

estable suspendido en un líquido el cual se deposita sobre un sustrato no cristalino y como membranas^{15 16}.



Fuente: S. J. Rowley-Neale, E. P. Randviir, A. S. Abo Dena, y C. E. Banks, «An overview of recent applications of reduced graphene oxide¹⁷.

El grafeno es un material que presenta gran variabilidad de aplicaciones, incluyendo dispositivos electrónicos, baterías, pantallas flexibles y sensores^{18,19}. Debido a sus propiedades de área superficial y conducción, los materiales desarrollados a base

¹⁵ RAMOS, Gloria. Efecto de la química superficial del óxido de grafeno en el desarrollo de aplicaciones. Trabajo de grado Doctora en Ingeniería Química. España: Universidad de Alicante, 2017. p. 375.

¹⁶ DONGJIN, Sun, *et al.*, Graphene-enhanced metal oxide gas sensors at room temperature: a review, *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2018. vol. 9, pp. 2832-2844. DOI: 10.3762/bjnano.9.264.

¹⁷ ROWLEY, *et al.*, An overview of recent applications of reduced graphene oxide as a basis of electroanalytical sensing platforms, *Appl. Mater. Today*, 2018- vol. 10, pp. 218-226. DOI: 10.1016/j.apmt.2017.11.010.

¹⁸ BONACCORSO, Francesco, *et al.* Production and processing of graphene and 2d crystals, *Mater. Today*, 2012. vol. 15, nro 12, pp. 564-589, DOI: 10.1016/S1369-7021(13)70014-2.

¹⁹ DWARDS, Rebecca., and COLEMAN, Karl. Graphene synthesis: relationship to applications, *Nanoscale*, 2013. vol. 5, nro 1, pp. 38-51, DOI: 10.1039/C2NR32629A.

de grafeno se presentan como alternativa para la detección de especies químicas. Por lo tanto, dado que la detección de gases es una de las aplicaciones del óxido de grafeno por sus propiedades electrónicas; en donde a mayor área superficial, mayor conducción de las especies de gas, y por ello una mayor capacidad de detección. Algunos de los beneficios que presentan este tipo de materiales son el bajo consumo de energía, fácil integración y peso ligero. Por ello, este tipo de materiales se han considerado como potenciales sensores de gas de alta eficiencia²⁰.

Reinaldo Martínez²¹ desarrollo un prototipo de sensor a base de óxido de grafeno con partículas de paladio para la detección de gas hidrógeno, mezclado en aire sintético y a temperatura ambiente. Dentro de los resultados obtenidos se evidenció una alta sensibilidad, reproducibilidad, recuperación y rápida respuesta, en rango de concentraciones de 0,01 % volumen a 5 % volumen. W.S. Hummers y colaboradores²² desarrollaron un intermedio en la síntesis de grafeno de bajo costo con oxidación de permanganato y ultrasonidos, en donde los grupos funcionales de hidroxilo, epoxi y carboxilo fueron incorporados expandiendo la brecha entre las capas de grafito. Esto permitió mejorar la interacción con las moléculas de gas e incrementar la sensibilidad de detección.

²⁰ ROBINSON, Jeremy., *et al.* Reduced Graphene Oxide Molecular Sensors, *Nano Lett.*, 2008. vol. 8, nro 10, pp. 3137-3140, DOI: 10.1021/nl8013007.

²¹ MARTÍNEZ, Reinaldo. Funcionalización de óxido de grafeno con nanopartículas de paladio y su aplicación en la detección de hidrógeno. Repositorio, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, 2015.

²² HUMMERS, William., *et al.* Preparation of Graphitic Oxide, *J. Am. Chem. Soc.*, 1958. vol. 80, nro 6, pp. 1339-1339. DOI: 10.1021/ja01539a017.

3 SECCIÓN EXPERIMENTAL

3.2 REVISIÓN Y ENTRENAMIENTO

Se realizó una revisión del estado del arte sobre la preparación de mezclas de gases, normas y regulaciones para CH₄ y CO, detectores y clases de detectores. Asimismo, para la preparación de las diferentes mezclas de gases se realizó el respectivo entrenamiento para la manipulación del equipo TGD 2000 de la Corporación CDT de Gas y el manejo de los sensores.

3.2 PREPARACIÓN DE MEZCLAS A NIVEL DE TRAZAS DE CH₄ Y CO EN VALORES CRITERIO.

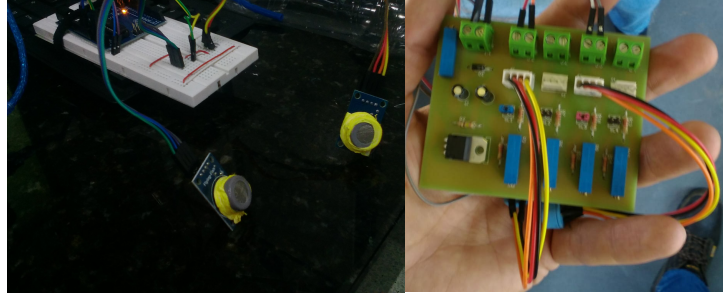
Para evaluar las diferentes alarmas y niveles críticos de concentración de estos gases, se prepararon diferentes mezclas por medio de un equipo desarrollado por la Corporación CDT de Gas, este equipo emplea un método dinámico de preparación que utiliza un material de referencia gaseoso certificado (MRGC) como analito y un gas matriz de dilución que puede ser aire o nitrógeno.

3.3 MEDICIÓN DE CORRIENTE CON SENSORES ELECTROQUÍMICOS Y CATALÍTICOS

Una vez preparadas las concentraciones de gas de interés se realizó la medición de cada una de ellas con cinco repeticiones, en un sensor electroquímico para el

caso de monóxido de carbono y uno catalítico para el caso de metano. Se evaluaron 11 concentraciones diferentes incluyendo el cero y concentraciones que generen alarmas, valores mínimos, intermedios y máximos de detección (Ver figura 5).

Figura 5. Montaje experimental de sensores de CO y CH₄



3.4 ADICIÓN DEL MATERIAL A BASE DE ÓXIDO DE GRAFENO PREPARADO PREVIAMENTE EN EL LEAM.

A los sensores evaluados en la etapa anterior se adicione dos volúmenes diferentes de óxido de grafeno preparado por el LEAM, y se evaluó la modificación de las concentraciones de los valores que general las alarmas, valores mínimos, intermedios y máximos de detección.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Dado que los sensores de gases funcionan al reaccionar con un compuesto de interés (CO y CH₄) generando una señal eléctrica proporcional a la concentración de este gas, se tomaron tres sensores de CO y CH₄ de la misma referencia y se realizaron mediciones de corriente a diferentes concentraciones. Los resultados obtenidos con los diferentes sensores evaluados se muestran a continuación:

En la tabla N°1 se presenta los valores promedios y la desviación obtenida de señal ADC en el primer sensor de referencia MQ7 tomado como blanco, cada una de las mediciones se repitieron 5 veces (Ver anexo 1. Tabla 7).

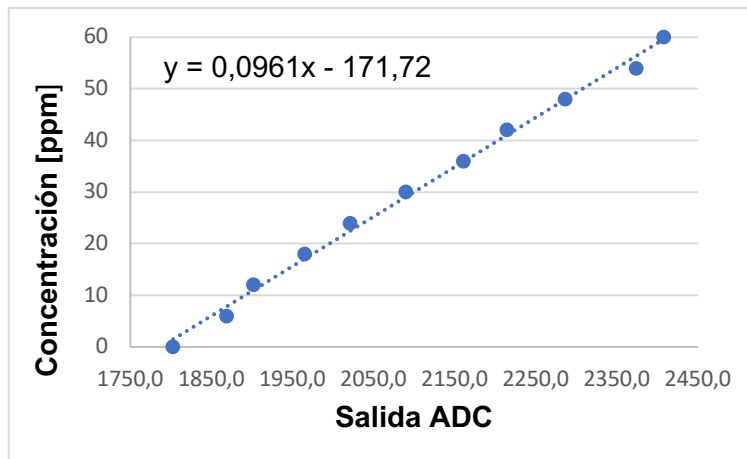
Tabla 1. Señales eléctricas obtenidas en el sensor 1 tomado como referencia a diferentes concentraciones de CO

Concentración generada [ppm]	Promedio señal ADC	Desviación señal ADC
0	1802,8	7,6
6	1868,6	12,5
12	1902,2	6,8
18	1965,0	9,5
24	2021,6	3,8
30	2089,6	4,2
36	2161,2	6,6
42	2215,0	8,2
48	2286,4	3,8
54	2373,8	5,9
60	2408,2	6,8

En este tipo de sensores las señales eléctricas se dan como respuesta a los cambios de concentración de las sustancias o iones evaluados; se pudo evidenciar que a medida que se incrementa la concentración del gas, también se presenta un incremento de la señal eléctrica.

Para obtener el modelo matemático de la concentración que se ajuste al comportamiento de los sensores MQ7, se realizó una grafica de concentración vs salida ADC del sensor de referencia (Figura 6).

Figura 6. Comportamiento del sensor MQ7 tomado como referencia



Para poder determinar la concentración del equipo bajo prueba, se determinó la ecuación de la recta en la gráfica Concentración vs salida ADC del sensor MQ7 tomado como referencia:

$$\text{Concentración [ppm]} = 0,0961 * \text{salida ADC} - 171,72 \quad \text{Ecuación 1}$$

Posteriormente en el segundo sensor se pudo determinar las concentraciones iniciales sin la adición de óxido de grafeno, confirmando los valores obtenidos similares al blanco y concentraciones finales después de adicionar 1 μ L de óxido de grafeno (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Valores de concentración inicial y final a del sensor 2 de CO sin adicionar y adicionando 1 μL óxido de grafeno

Concentración generada [ppm]	Concentración promedio inicial [ppm]	Desviación estándar de la concentración promedio inicial [ppm]	Concentración promedio final [ppm]	Desviación estándar de la concentración promedio final [ppm]
0	2,3	0,7	42,9	0,7
6	8,8	1,2	56,0	0,5
12	12,2	0,8	60,7	1,3
18	18,3	0,8	67,1	0,5
24	23,9	0,3	74,5	0,8
30	29,4	3,8	81,5	1,0
36	39,9	0,6	89,4	0,2
42	43,0	0,7	91,1	0,4
48	47,6	0,4	95,7	0,6
54	56,8	0,5	99,7	0,4
60	60,0	0,3	102,5	1,7

Los valores de concentración obtenidas al hacer la medición sin adicionar óxido de grafeno son similares a las concentraciones generadas, pero en el caso de bajas concentraciones como 0 ppm y 6 ppm se observa un valor alto de concentración. Sin embargo, valores más altos de concentración que el generado se observa también en los puntos correspondientes a 36 ppm y 54 ppm, y esta tendencia puede deberse a la falta de estabilización de la señal del sensor y los porcentajes de error en la medición característicos de estos sensores que pueden llegar a ser mayores al 5 %.

Debido a la estructura compacta del sensor MQ7, se dificulto la incorporación del óxido de grafeno dentro del elemento donde se genera la reacción química al interaccionar con el gas, los valores de concentración se incrementaron considerablemente en comparación con las concentraciones de gas generadas. En la tabla 3 se presentan los valores obtenidos al incorporar mayor concentración de óxido de grafeno, para evaluar el efecto de la sensibilidad y eficiencia en la medición

del sensor MQ7. Sin haber adicionado óxido de grafeno se pudo observar altas concentraciones en el intervalo de 36 ppm hasta 54 ppm de CO, en comparación con el valor de referencia.

Tabla 3. Valores de concentración inicial y final a del sensor 3 de CO sin adicionar y adicionando 2 μ L óxido de grafeno

Concentración generada [ppm]	Concentración promedio inicial [ppm]	Desviación estándar de la concentración promedio inicial [ppm]	Concentración promedio final [ppm]	Desviación estándar de la concentración promedio final [ppm]
0	2,4	0,7	43,1	0,8
6	9,4	1,2	56,4	0,6
12	12,7	0,5	61,1	1,0
18	19,2	0,8	68,0	0,6
24	25,1	0,7	75,9	1,1
30	31,5	3,7	83,8	1,0
36	43,7	0,4	93,3	0,3
42	45,1	0,6	93,3	0,3
48	49,0	0,6	87,2	18,9
54	57,5	0,5	100,1	0,5
60	60,3	0,3	104,9	0,4

Por lo tanto, las altas concentraciones obtenidas después de adicionar óxido de grafeno pueden deberse a que cuando se trató de incorporar en el sensor, este material quedo adherido en la malla del sensor y no se distribuyó de manera homogénea saturando el sensor.

A pesar de que los tres sensores corresponden a la misma referencia, la diferencia obtenida en los valores de concentración sin adicionar óxido de grafeno, se pueden atribuir a un posible ruido electrónico o a que no se realizaron las purgas suficientes para retirar el gas que se encontraba dentro de la cámara donde se realizaba la medición. Sin embargo, los resultados mantienen su tendencia lineal y se encuentran dentro de los porcentajes de error de fabricación.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los sensores catalíticos de CH₄:

En la tabla N°4 se reportan los valores promedios y la desviación estándar obtenida en el primer sensor de referencia MC101, con cinco repeticiones (Ver Anexo 2. Tabla 12). El sensor tiene un comportamiento similar a la de los detectores de CO al entrar en contacto con el gas de interés que en este caso es metano. A medida que se incrementa la concentración del gas, el equipo evidencia ese incremento a través del aumento de la señal ADC (Ver figura 7).

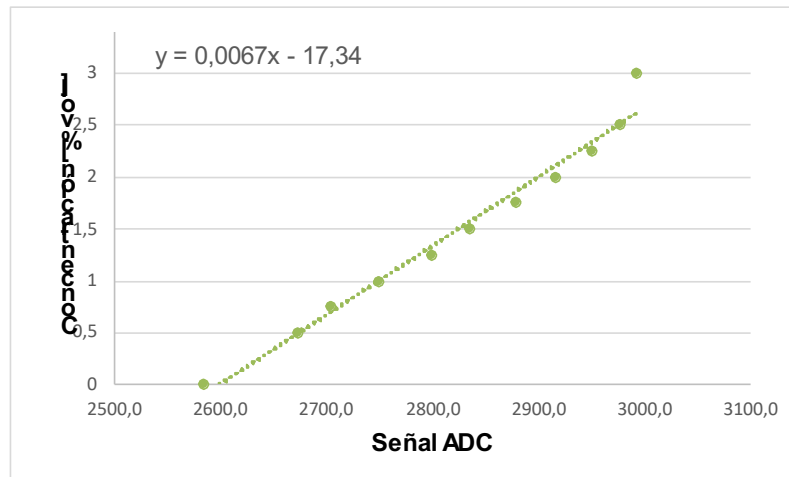
Tabla 4. Señales eléctricas obtenidas en el sensor 1 tomado como referencia a diferentes concentraciones de CH₄

Concentración [% vol]	Promedio señal ADC	Desviación señal ADC
0,0	2583,0	1,6
0,5	2672,0	2,4
0,7	2703,6	2,5
1,0	2748,6	4,9
1,2	2799,4	0,5
1,5	2834,4	1,1
1,7	2877,6	2,2
2,0	2915,8	3,1
2,2	2949,2	1,6
2,5	2976,6	1,7
3,0	2992,6	4,3

De la misma manera que el sensor de CO se determinó la concentración del equipo bajo prueba, se determinó la ecuación de la recta en la gráfica Concentración vs salida ADC del sensor MC101 tomado como referencia:

$$\text{Concentración } [\% \text{ vol}] = 0,00067 * \text{salida ADC} - 17,34 \quad \text{Ecuación 2}$$

Figura 7. Lecturas de señales ADC sensor de metano



En el segundo sensor se obtuvo la concentración inicial sin la adición de óxido de grafeno y concentración final después de adicionar 1 μL y 2 μL de óxido de grafeno.

En los resultados sin adicionar óxido de grafeno se pudo evidenciar que la concentración dada por el equipo era mayor que la concentración de gas suministrada excepto en el punto cero y en el máximo de medición correspondiente al 3 %vol. Sin embargo, al adicionar 1 μL de óxido de grafeno la concentración obtenida con el sensor se acerca más al valor de referencia. En el caso de las concentraciones 2,5 %vol y 3 %vol, no se evidencia ningún cambio en la señal ADC obtenida y por lo tanto en la concentración y esto puede atribuirse que en los extremos de medición se refleja una pérdida de sensibilidad de la señal por posible saturación de sensor.

En la gráfica de la Figura 7 se pudo observar que los puntos que estaban más alejados de la tendencia lineal correspondían a las señales ADC de las concentraciones correspondientes a 0 %vol y 3 %vol, y por lo ello, las concentraciones obtenidas como respuesta del equipo presentaban mayor variabilidad.

Tabla 5. Valores de concentración inicial y final a del sensor 2 de CH₄ sin adicionar y adicionando 1 μ L óxido de grafeno

Concentración generada [% vol]	Concentración promedio inicial [% vol]	Desviación estándar de la concentración promedio inicial [% vol]	Concentración promedio final [% vol]	Desviación estándar de la concentración promedio final [% vol]
0,0	-0,1	0,01	-0,5	0,01
0,5	0,6	0,02	0,3	0,01
0,7	0,9	0,02	0,7	0,01
1,0	1,3	0,02	1,0	0,01
1,2	1,6	0,02	1,3	0,02
1,5	1,9	0,02	1,5	0,02
1,7	2,2	0,01	1,7	0,01
2,0	2,4	0,02	1,9	0,02
2,2	2,5	0,01	2,1	0,01
2,5	2,7	0,01	2,1	0,01
3,0	2,8	0,02	2,2	0,02

El tercer sensor tiene un comportamiento similar con respecto a la concentración inicial, dado que la respuesta del sensor es mayor en comparación con la concentración del gas que se le está proporcionando (Ver tabla 6). Excepto en el caso del 0 % vol que a diferencia del sensor 2 ya no está arrojando un valor negativo y en el caso del 3 %vol el valor es menor. Sin embargo, al adicionar 2 μ L de óxido de grafeno, se evidencia que en los intervalos de 0,5 %vol a 2,2 %vol las concentraciones del sensor son similares al valor de la concentración del gas suministrado. Y que en el caso de altas concentraciones como 2,5 %vol y 3% vol no

se presenta incremento de la señal ADC y por ende de la concentración, que puede deberse a una saturación, interferencia de la señal o autocalentamiento del sensor en estos puntos.

Tabla 6. Valores de concentración inicial y final a del sensor 3 de CH₄ sin adicionar y adicionando 2 µL óxido de grafeno

Concentración generada [% vol]	Concentración promedio inicial [% vol]	Desviación estándar de la concentración promedio inicial [% vol]	Concentración promedio final [% vol]	Desviación estándar de la concentración promedio final [% vol]
0,0	0,0	0,01	-0,5	0,007
0,5	0,6	0,02	0,4	0,018
0,7	0,9	0,03	0,7	0,016
1,0	1,3	0,01	1,0	0,012
1,2	1,7	0,02	1,3	0,014
1,5	1,9	0,02	1,6	0,030
1,7	2,2	0,02	1,7	0,015
2,0	2,4	0,03	2,0	0,015
2,2	2,6	0,03	2,1	0,022
2,5	2,7	0,02	2,2	0,014
3,0	2,8	0,02	2,3	0,020

5 CONCLUSIONES

- Las concentraciones obtenidas de monóxido de carbono con el sensor MQ7 fueron mayores en comparación con el material de referencia en cada caso evaluado. La adición de óxido de grafeno no favorece la sensibilidad del sensor, debido a que se presenta una saturación.
- Para concentraciones entre 0 %vol y 2,2 % vol la adición de óxido de grafeno en los sensores catalíticos de metano, se ve favorecido por la adsorción del gas en el detector mejorando la señal ADC. Una alta relación entre el área superficial y el volumen de grafeno, incrementa la sensibilidad debido a la interacción del gas de interés y la capa activa del sensor.
- A concentraciones de metano superiores al 2,5 %vol el sensor MC101 llega a un punto de saturación con la adición del óxido de grafeno, ya que se mantiene estable la tensión eléctrica y por lo tanto no hay variación de la concentración. En un ambiente saturado de gas, no se podrá medir concentraciones por encima de ese valor.

6 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la adición de grafeno en la preparación del material, dado que en el caso de los sensores de monóxido de carbono el ingreso de la película de grafeno puede quedar adherida de manera muy superficial y saturar el sensor.
- Se recomienda realizar pruebas con diferentes tipos de sensores de CO y CH₄ de diferentes tipos y marcas comerciales, para evaluar la estabilidad de la señal y el efecto de la adición del óxido de grafeno hasta los límites máximos de medición. Es importante evaluar todo el rango de medición e identificar los intervalos donde haya una posible saturación del sensor.

BIBLIOGRAFÍAS

BONACCORSO, Francesco, *et al.* Production and processing of graphene and 2d crystals, *Mater. Today*, 2012. vol. 15, nro 12, pp. 564-589, DOI: 10.1016/S1369-7021(13)70014-2.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 2254 (1, noviembre, 17). Por la cual se adopta la norma de calidad del ambiente y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El ministerio, 2017.p. 2-7.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución Número 909. (5, Junio, 2008. Por la cual se establecen las normas y est ándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El Ministerio.p. 1-35.

COLOMBIA. SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO. Resolución 90902 (24, octubre, 2013). Por medio de la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Internas de Gas Combustible. Bogotá: El ministerio. P. 2-25.

DONGJIN, Sun, *et al.*, Graphene-enhanced metal oxide gas sensors at room temperature: a review, *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2018. vol. 9, pp. 2832-2844. DOI:10.3762/bjnano.9.264.

EDWARDS, Rebecca., and COLEMAN, Karl. Graphene synthesis: relationship to applications, *Nanoscale*, 2013. vol. 5, nro 1, pp. 38-51, DOI: 10.1039/C2NR32629A.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. [Sitio web]. Estados Unidos: EPA. [Consulta 1 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/co/data/CO-REA-AmendedJuly2010.pdf>.

HUMMERS, William., *et al.* Preparation of Graphitic Oxide, *J. Am. Chem. Soc.*, 1958. vol. 80, nro 6, pp. 1339-1339. DOI: 10.1021/ja01539a017.

KRUPANEK, Beata., and BOGACZ, Ryszard. Dynamic Error Correction of Methane Sensor, *Int. J. Electron. Telecommun.*. 2014, vol. 60, nro 4, pp. 287-289. DOI 10.2478/eletel-2014-0037

MANAN, Dosi, *et al.* Ultrasensitive Electrochemical Methane Sensors Based on Solid Polymer Electrolyte-Infused Laser-Induced Graphene, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. vol. 11, nro 6, pp. 6166-6173. DOI: 10.1021/acsami.8b22310.

MARTÍNEZ, Reinaldo. Funcionalización de óxido de grafeno con nanopartículas de paladio y su aplicación en la detección de hidrógeno. Repositorio, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, 2015.

PANDA,D, *et al.* Selective detection of carbon monoxide (CO) gas by reduced graphene oxide (rGO) at room temperature, *RSC Adv.* 2016. vol. 6, nro 53, pp. 47337-47348, DOI: 10.1039/C6RA06058G.

RAMOS, Gloria. Efecto de la química superficial del óxido de grafeno en el desarrollo de aplicaciones. Trabajo de grado Doctora en Ingeniería Química. España: Universidad de Alicante,2017. p. 375.

ROBINSON, Jeremy.*et al.*, Reduced Graphene Oxide Molecular Sensors, *Nano Lett.*, 2008. vol. 8, nro 10, pp. 3137-3140, DOI: 10.1021/nl8013007.

ROWLEY,Neale. *et al.*, An overview of recent applications of reduced graphene oxide as a basis of electroanalytical sensing platforms, *Appl. Mater. Today*, 2018- vol. 10, pp. 218-226.DOI: 10.1016/j.apmt.2017.11.010.

SAHOUR , Sayed., and AHMED ABD El-Moneim. High Performance Carbon Monoxide Gas Sensor based on Graphene, *Int. J. Eng. Res.* 2015. Vol 4. nro 06.pp. ISSN 2278-0181.518-523

SHARAPOV, Valeriy. *Piezoceramic Sensors*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

SMITH, Anderson, *et al.*, Graphene-based CO₂ sensing and its cross-sensitivity with humidity, *RSC Adv.*, 2017. vol. 7, nro36, pp. 22329-22339, 2017, DOI: 10.1039/C7RA02821K.

VALENZUELA, Maria Porcel. Desarrollo de sensores electroquímicos de afinidad preparados por electrodeposición para la detección de neurotransmisores. Trabajo de grado Doctora en Ciencia de materiales. España: Universidad de Alicante, 2016. 29.p.

ZHONGPING, *et al.* Synthesis and Characterization of *n* -Alkylamine-Stabilized Palladium Nanoparticles for Electrochemical Oxidation of Methane, *J. Phys. Chem. C*. 2010, vol. 114, nro 2, pp. 723-733. DOI:10.1021/jp907745v.

Anexo A. Señales ADC sensores de monóxido de carbono

Tabla 7. Mediciones de señales ADC en el sensor tomado como referencia a diferentes concentraciones de CO

Concentración [ppm]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0	1812	1808	1798	1793	1803
6	1867	1857	1857	1876	1886
12	1895	1906	1896	1903	1911
18	1959	1980	1969	1959	1958
24	2019	2022	2027	2023	2017
30	2084	2089	2090	2097	2088
36	2168	2159	2151	2163	2165
42	2220	2225	2204	2210	2216
48	2290	2286	2288	2288	2280
54	2365	2376	2381	2372	2375
60	2399	2405	2417	2412	2408

Tabla 8 . Mediciones de señales eléctricas en el sensor 2 a diferentes concentraciones de CO sin adicionar óxido de grafeno

Concentración [ppm]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0	1815	1805	1815	1820	1799
6	1864	1893	1877	1867	1893
12	1913	1906	1905	1928	1916
18	1971	1970	1992	1973	1981
24	2032	2042	2037	2034	2035
30	2115	2109	2112	2014	2113
36	2191	2203	2207	2208	2199
42	2224	2245	2230	2236	2239
48	2279	2282	2290	2279	2283
54	2377	2381	2370	2379	2385
60	2407	2412	2413	2415	2411

Tabla 9. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 2 a diferentes concentraciones de CO adicionando 1 μ L óxido de grafeno

Concentración [ppm]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0	2242	2229	2232	2240	2221
6	2372	2374	2369	2373	2360
12	2417	2417	2395	24134	2431
18	2494	2478	2486	2489	2481
24	2557	2578	2558	2555	2564
30	2632	2626	2647	2646	2623
36	2720	2714	2717	2719	2715
42	2733	2737	2729	2734	2740
48	2772	2790	2787	2782	2782
54	2819	2830	2824	2826	2821
60	2870	2842	2079	2840	2836

Tabla 10. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 3 a diferentes concentraciones de CO sin adicionar óxido de grafeno

Concentración [ppm]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0	1808	1817	1801	1810	1821
6	1898	1883	1900	1869	1872
12	1912	1925	1924	1913	1921
18	1990	1979	1980	2001	1984
24	2047	2036	2050	2050	2057
30	2138	2136	2037	2133	2130
36	2243	2247	2235	2245	2237
42	2258	2260	2252	2247	2264
48	2301	2289	2307	2296	2293
54	2375	2384	2387	2387	2391
60	2412	2416	2412	2412	2420

Tabla 11. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 3 a diferentes concentraciones de CO adicionando 2 μ L óxido de grafeno

Concentración [ppm]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0	2231	2223	2247	2236	2241
6	2376	2374	2376	2363	2380
12	2405	2418	2438	2424	2426
18	2497	2485	2502	2489	2501
24	2573	2568	2564	2597	2580
30	2648	2659	2670	2646	2671
36	2753	2754	2762	2757	2761
42	2757	2763	2757	2752	2759
48	2786	2794	2301	2797	2794
54	2822	2835	2824	2829	2832
60	2879	2881	2871	2884	2878

Anexo B. Señales ADC sensores de metano

Tabla 12. Mediciones de señales ADC en el sensor tomado como referencia a diferentes concentraciones de CH₄

Concentración [% vol]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0,0	2581	2583	2582	2585	2584
0,5	2676	2670	2672	2672	2670
0,7	2700	2706	2703	2703	2706
1,0	2740	2751	2750	2752	2750
1,2	2800	2799	2799	2800	2799
1,5	2836	2835	2834	2833	2834
1,7	2880	2876	2876	2876	2880
2,0	2915	2913	2913	2918	2920
2,2	2951	2950	2948	2947	2950
2,5	2974	2978	2976	2978	2977
3,0	2581	2583	2582	2585	2584

Tabla 13. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 2 a diferentes concentraciones de CH₄ sin adicionar óxido de grafeno

Concentración [% vol]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0,0	2580	2579	2582	2580	2581
0,5	2685	2683	2683	2679	2685
0,7	2719	2719	2722	2727	2725
1,0	2780	2781	2785	2785	2781
1,2	2827	2833	2834	2829	2830
1,5	2873	2870	2870	2870	2875
1,7	2910	2909	2914	2912	2912
2,0	2949	2953	2949	2946	2947
2,2	2968	2965	2970	2966	2967
2,5	2992	2990	2991	2987	2990
3,0	3010	3007	3009	3005	3003

Tabla 14. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 2 a diferentes concentraciones de CH₄ adicionando 1 μL óxido de grafeno

Concentración [% vol]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0,0	2520	2522	2519	2520	2521
0,5	2640	2637	2637	2637	2639
0,7	2688	2689	2688	2689	2693
1,0	2742	2738	2740	2740	2739
1,2	2779	2782	2784	2786	2780
1,5	2817	2818	2816	2811	2812
1,7	2842	2842	2842	2839	2844
2,0	2881	2875	2879	2877	2880
2,2	2895	2897	2894	2895	2893
2,5	2907	2906	2903	2907	2908
3,0	2919	2920	2925	2917	2924

Tabla 15. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 3 a diferentes concentraciones de CH₄ sin adicionar óxido de grafeno

Concentración [% vol]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0,0	2581	2582	2580	2580	2581
0,5	2688	2682	2687	2686	2682
0,7	2724	2729	2726	2735	2732
1,0	2784	2782	2785	2787	2783
1,2	2832	2838	2834	2837	2839
1,5	2879	2878	2876	2871	2879
1,7	2911	2911	2917	2917	2914
2,0	2951	2952	2944	2950	2941
2,2	2969	2973	2969	2977	2978
2,5	2992	2990	2995	2999	2994
3,0	3009	3012	3010	3004	3006

Tabla 16. Mediciones de señales eléctricas en el sensor 3 a diferentes concentraciones de CO adicionando 2 μ L óxido de grafeno

Concentración [% vol]	Señal ADC 1	Señal ADC 2	Señal ADC 3	Señal ADC 4	Señal ADC 5
0,0	2519	2520	2520	2522	2520
0,5	2639	2643	2639	2638	2644
0,7	2691	2690	2690	2695	2694
1,0	2747	2745	2744	2742	2745
1,2	2783	2785	2788	2787	2784
1,5	2822	2820	2828	2816	2819
1,7	2846	2845	2844	2841	2847
2,0	2887	2883	2882	2884	2881
2,2	2900	2902	2904	2897	2896
2,5	2909	2911	2906	2911	2910
3,0	2927	2923	2924	2922	2929