

IMPACTO DE LA RESOLUCIÓN DE LA CUANTIFICACIÓN DE ERRORES DE MEDICIÓN EN SENSORES DE MONÓXIDO DE CARBONO CON ADC DE 10 Y 16 BITS

IMPACT OF THE RESOLUTION OF THE QUANTIFICATION OF MEASUREMENT ERRORS IN CARBON MONOXIDE SENSORS WITH ADC OF 10 AND 16 BITS

Victor M. Mora-Romo^{1,*}, Mónica C. Villalobos-López²

(1) Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Posgrado,
Av. López Mateos 1802 Ote, Aguascalientes – México

(2) Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Química,
Av. López Mateos 1802 Ote, Aguascalientes – México
(*e-mail: victor.moraromo@gmail.com)

Recibido: 15/05/2022 - Evaluado: 12/06/2022 - Aceptado: 26/06/2022

RESUMEN

La presente investigación realiza un análisis comparativo del impacto de la resolución de cuantificación en la medición precisa del monóxido de carbono (CO), utilizando sensores MQ7 con convertidores analógico-digitales (ADC) de 10 y 16 bits. Donde se lleva a cabo una evaluación exhaustiva del rango de amplitud de las mediciones obtenidas. Además, se procede a calcular la relación señal a ruido (SNR, por sus siglas en inglés) con el fin de evaluar la calidad de la señal capturada en comparación con el ruido introducido durante el proceso de cuantificación. Dicho cálculo se lleva a cabo para ambas resoluciones de ADC y se expresa en decibeles (dB). Por último, se realiza una evaluación minuciosa de la distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés), la cual representa la cantidad de distorsión presente en la señal como consecuencia del proceso de cuantificación. Se calcula el THD para ambas configuraciones de medición y se expresa como un porcentaje. Estos resultados son esenciales para determinar la resolución óptima de cuantificación en aplicaciones de detección de CO, contribuyendo así al desarrollo de sensores más precisos y confiables en la detección.

ABSTRACT

This research presents a comparative analysis of the impact of quantization resolution on the accurate measurement of carbon monoxide (CO) using MQ7 sensors with 10-bit and 16-bit analog-to-digital converters (ADCs). A comprehensive evaluation of the measurement range is conducted, and the signal-to-noise ratio (SNR) is calculated to assess the quality of the captured signal in relation to quantization noise. The SNR calculation is performed for both ADC resolutions and expressed in decibels (dB). Furthermore, a detailed assessment of total harmonic distortion (THD), representing the amount of distortion in the signal due to quantization, is carried out. THD is calculated for both measurement configurations and expressed as a percentage. These findings are crucial for determining the optimal quantization resolution in CO detection applications, thereby contributing to the development of more accurate and reliable sensors in this field.

Palabras clave: convertidores analógico-digitales (ADC), relación señal-ruido (SNR), ruido de cuantificación, distorsión armónica total (THD)

Keywords: analog-to-digital converters (ADCs), signal-to-noise ratio (SNR), quantization noise, total harmonic distortion (THD)

INTRODUCCIÓN

El monitoreo de contaminantes atmosféricos hoy en día es fundamental para informar a la población sobre la calidad del aire y así tomar las medidas necesarias que ayuden a minimizar los efectos nocivos para la salud. El uso de sensores para la detección de monóxido de carbono (CO) es de suma importancia debido a sus características y capacidades específicas y su medición precisa es de vital importancia en diversos ámbitos, como la seguridad industrial, la protección del medio ambiente y la salud pública. El sensor MQ7 se basa en el principio de detección de gases por medio de un material semiconductor, que experimenta cambios en su conductividad eléctrica en presencia de CO (Li *et al.*, 2018; Smith & Johnson, 2018) y es una herramienta práctica para la detección temprana y precisa de este gas (Dasgupta *et al.*, 2020). Este sensor ofrece ventajas significativas en términos de tamaño compacto, bajo consumo de energía y respuesta rápida (Li *et al.*, 2018). Sin embargo, la resolución de cuantificación de los convertidores analógico-digitales (ADC) utilizados en estos sensores puede tener un impacto significativo en la exactitud de las mediciones (Martinez & Davis, 2019). El Convertidor Analógico-Digital (ADC) es un componente esencial que transforma señales analógicas en digitales; la importancia de la resolución del ADC para el sensor MQ7 radica en su capacidad para capturar y representar con precisión la concentración de monóxido de carbono (CO) en el ambiente. La resolución del ADC desempeña un papel crucial en la precisión de las mediciones del sensor MQ7. Un ADC con una mayor resolución proporciona una representación más detallada de la señal analógica generada por el sensor, lo que permite una mayor capacidad para discernir niveles discretos de concentración de CO.

Estudios anteriores, como Sai *et al.* (2019), Jha (2020), Abraham y Li (2014) y Wonohardjo y Kusuma (2019), han demostrado la relevancia de la implementación de tecnologías de bajo costo, como microcontroladores y sistemas embebidos, tal es el caso del Arduino modelo uno por la facilidad de entradas y salidas analógicas y digitales, en las mediciones de calidad del aire. Sin embargo, es importante señalar que estos estudios se han enfocado en ADCs de 10 bits, sin tener en cuenta la resolución superior que ofrece un ADC de 16 bits.

La identificación de la resolución óptima que permita obtener mediciones confiables y minimizar los errores de cuantificación propicia la visualización donde los sensores con convertidores analógicos digitales de resolución limitada cuantifican la cantidad inadecuada de partículas por millón erróneas (Pal *et al.*, 2017). Además, las técnicas de evaluación del rango de amplitud permiten una mejor comprensión del alcance de detección de los sensores MQ7 y evaluar cómo la resolución de cuantificación afecta la capacidad de detección de CO (Brown & Wilson, 2021). Uno de los puntos de consideración en esta evaluación es la calidad de la señal capturada en comparación con el ruido introducido durante el proceso de cuantificación, lo que determina la resolución que ofrece una mejor relación de señal a ruido (Rodríguez & López, 2022). Por otra parte, la distorsión armónica total (THD) contribuye como medida de la calidad de la señal. La THD representa la cantidad de distorsión presente en la señal debido al proceso de cuantificación y ayuda a comprender cómo la resolución de cuantificación afecta la fidelidad de la señal de CO (Lee & Kim, 2023).

Esta investigación propone una resolución de cuantificación basada en la precisión de las mediciones de sensores MQ7 con el uso de ADC de mayor resolución a distintos bits. Esto fue aplicado para mejorar significativamente la precisión y la fiabilidad de las mediciones de CO.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se utilizó una Raspberry Pi 4 fabricada por la fundación Raspberry Pi, como plataforma principal para la adquisición de datos y el procesamiento. La Raspberry Pi 4 proporciona una potente capacidad de procesamiento y conectividad, lo que la convierte en una opción ideal para la implementación de sistemas de adquisición de datos. Se hizo uso del entorno gráfico proporcionado por Raspberry Pi para la visualización de datos en tiempo real. Este entorno gráfico permite la representación gráfica de los datos capturados por el sensor MQ7. Así mismo, se empleó el lenguaje de programación Python para desarrollar el código necesario para la

comunicación entre la Raspberry Pi, los ADC (MCP3008 y ADS1115 de fabricación por parte de Microchip Technology Inc. y Texas Instruments) y el sensor MQ7 fabricado por Winsen Electronics Technology Co., Ltd.

El programa Python ofrece una amplia gama de bibliotecas y herramientas que facilitan la adquisición y procesamiento de datos. Dentro de los ADC se utilizaron el convertidor analógico-digital MCP3008 para obtener mediciones precisas del sensor MQ7. El MCP3008 es un ADC de 10 bits que permite convertir las señales analógicas del sensor en valores digitales que pueden ser procesados por la Raspberry Pi. Además del MCP3008, se empleó el ADC ADS1115, un convertidor analógico-digital de alta precisión de 16 bits, el cual ofrece una mayor resolución y precisión en la conversión de las señales analógicas. Esto, lo que permite obtener mediciones más precisas del sensor MQ7. Por otra parte, un ADC de 8 bits representaría la concentración de CO en solo 256 niveles discretos, un ADC de 10 bits en 1024 niveles discretos y un ADC de 16 bits hasta 65536 niveles discretos. Utilizar una menor cantidad de bits resultaría en mediciones con una respuesta más limitada a pequeñas variaciones en la concentración del gas CO.

La señal muestreada varía en función de la concentración del gas en el ambiente, y puede abarcar un amplio rango de concentraciones, desde niveles de aproximadamente 20 ppm hasta 2000 ppm, según los valores proporcionados por el fabricante. El rango de la señal en este estudio presenta valores mínimos de 0.12 ppm y máximos de 1.5 ppm. Para evaluar la capacidad de medición de CO, las mediciones fueron realizadas en un ambiente exterior, lo que implica la exposición del sensor a las condiciones atmosféricas y la presencia de fuentes de emisión al aire libre. En la Figura 1 se muestra la conexión electrónica de los ADC para esta investigación.

Todos los datos adquiridos durante el proceso de medición fueron almacenados y gestionados en una plataforma en la nube dedicada al análisis y visualización de datos en tiempo real. En particular, se utilizó ThingSpeak, una plataforma en la nube desarrollada específicamente para aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) y análisis de datos. ThingSpeak permitió recibir y almacenar de manera segura los datos adquiridos por la Raspberry Pi, brindando una solución eficiente para el almacenamiento y gestión de grandes volúmenes de datos. Además, a través de la interfaz intuitiva de ThingSpeak, se generaron gráficos y estadísticas relevantes para un análisis visual y comprensión de los datos registrados, en la Figura 2 se muestra la interconexión de estos elementos (el empleo de los logotipos está permitido según la política de uso para fines informativos y descriptivos).

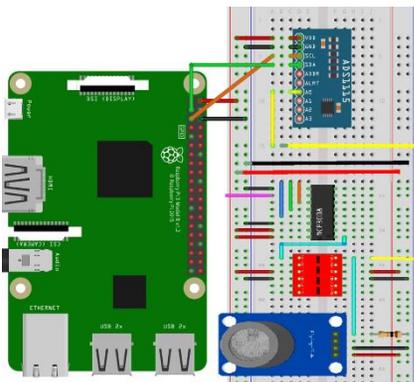


Fig. 1: Conexión física del Raspberry Pi 4, el sensor de gas MQ7 con los ADC.



Fig. 2: Tratamiento y visualización de los datos por medio de Thingspeak y Matplotlib en Python.

En este análisis, se exploraron los patrones, tendencias y relaciones presentes en los datos de CO registrados, brindando una visión más precisa y detallada. Con la ayuda de las funciones y herramientas proporcionadas por NumPy y Matplotlib, se calcularon métricas clave, como el rango de amplitud, el error de cuantificación, la relación señal a ruido y la distorsión armónica total, para ambas resoluciones del ADC. Estas métricas permiten evaluar la precisión y confiabilidad de las mediciones de CO obtenidas mediante diferentes resoluciones. Además, se registraron parámetros como la temperatura ambiente, la humedad relativa y la concentración de CO de referencia

para calibrar y validar las mediciones del sensor. Se tuvo en cuenta el tiempo de exposición del sensor, y se realizaron múltiples repeticiones para mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos revelan información importante sobre el desempeño de los diferentes componentes y su impacto en la calidad de las mediciones. En primer lugar, se evaluó el rango de amplitud de las mediciones obtenidas utilizando los dos tipos de ADC. Se encontró que el ADC de 16 bits proporcionó un rango de amplitud más amplio en comparación con el ADC de 10 bits. Esto indica que el ADC de 16 bits es capaz de capturar una mayor variabilidad en los niveles de CO, lo que puede ser beneficioso en aplicaciones que requieren mediciones más precisas. Dichos resultados se muestran la Figura 3.

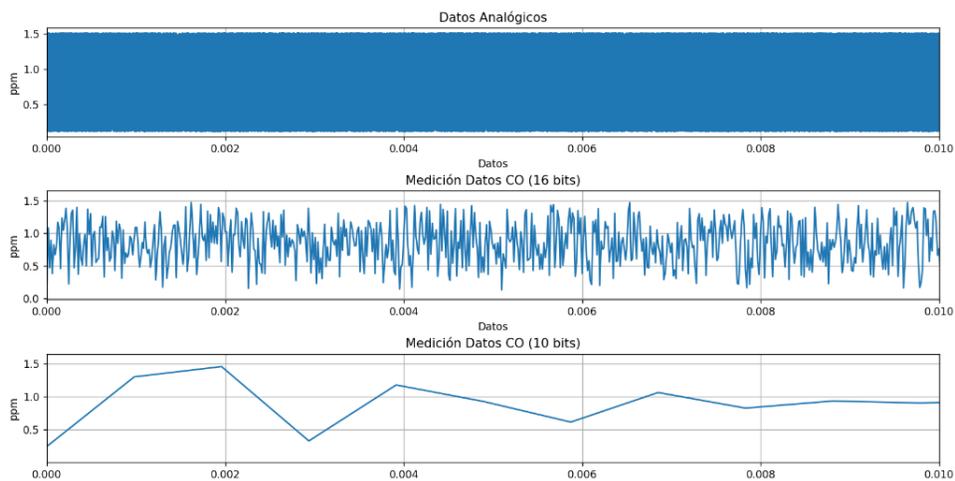


Fig. 3: Recolección de los datos originales con el ADC de 10 y 16 bits.

Igualmente, se calculó el error de cuantificación comparando las mediciones obtenidas con la señal original. Tanto el ADC de 16 bits como el ADC de 10 bits mostraron errores de cuantificación, pero se observó que el ADC de 16 bits presentaba un error promedio ligeramente menor en comparación con el ADC de 10 bits. Esto sugiere que el ADC de 16 bits proporciona mediciones más precisas a la señal original, lo que se traduce en una mayor precisión en la medición de CO (Figura 4).

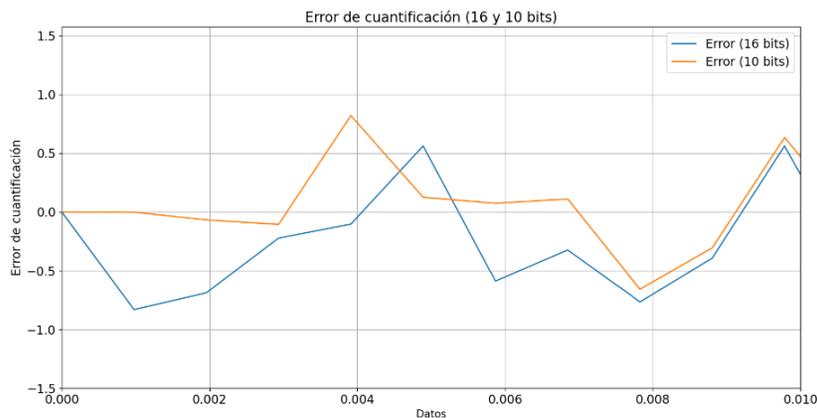


Fig. 4: Gráfica de error de cuantificación para el ADC de 10 y 16 bits.

La relación señal a ruido (SNR) es una medida que indica cuánta potencia de señal está presente en comparación con la potencia de ruido en la señal digitalizada. Un SNR más alto indica una mejor calidad de la señal digitalizada, ya que la señal es más contundente en comparación con el ruido. Por lo tanto, se puede comparar que el SNR entre el ADC de 16 bits y el ADC de 10 bits para determinar cuál ofrece una mejor relación señal a ruido. Se encontró que el ADC de 16 bits exhibió un SNR ligeramente mayor en comparación con el ADC de 10 bits. Esto indica que el ADC de 16 bits permite una mejor relación entre la señal de CO y el ruido, lo que resulta en mediciones más claras y menos influenciadas por interferencias externas (Figura 5).

La Figura 6 muestra la evaluación de la distorsión armónica total (THD) para cuantificar la cantidad de distorsión presente en la señal debido al proceso de cuantificación. Un THD más bajo indica una menor cantidad de distorsión armónica y, por lo tanto, una mejor calidad de la señal digitalizada. Los resultados mostraron que el THD era menor en el caso del ADC de 16 bits en comparación con el ADC de 10 bits. Esto implica que el ADC de 16 bits introduce menos distorsión en la señal de CO, lo que contribuye a mediciones más precisas y fiables.

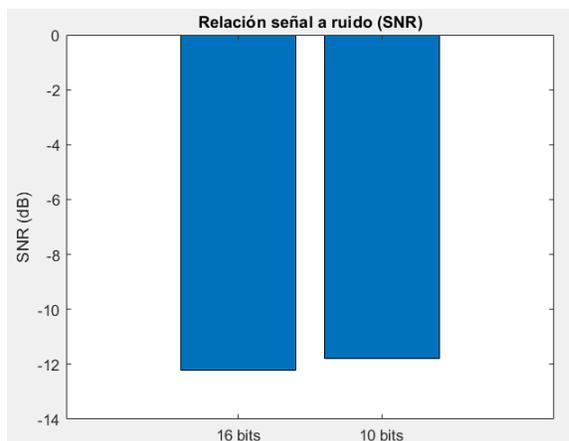


Fig. 5: Gráfica de la relación de la señal de ruido para los ADC de 10 y 16 bits.

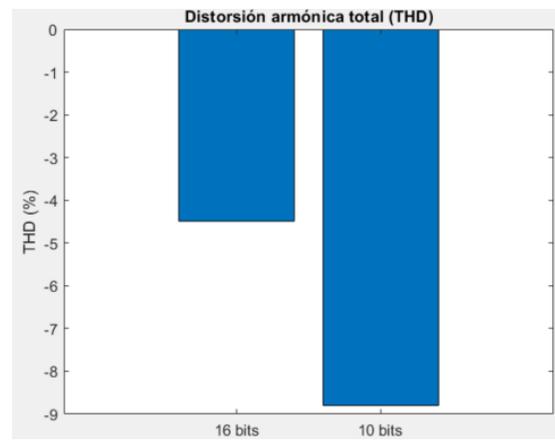


Fig. 6: Gráfica de la distorsión armónica para el ADC de 10 y 16 bits.

Por último, la Tabla 1 contiene los datos del desempeño de los ADCs en cada corrida, permitiendo realizar comparaciones y extraer conclusiones sobre su rendimiento en términos de rango de amplitud, error de cuantificación, SNR y THD. Donde se destaca la importancia de considerar la resolución de cuantificación al seleccionar los componentes para mediciones de CO. El ADC de 16 bits demostró un desempeño superior en términos de rango de amplitud, error de cuantificación, SNR y THD. Estos hallazgos pueden ser utilizados como referencia para optimizar la precisión y confiabilidad de las mediciones de CO en diversas aplicaciones.

Tabla 1: Corrimiento de los resultados de los valores obtenidos de la comparación del ADC de 10 y 16 bits.

Rango_amplitud_16bits	Rango_amplitud_10bits	Media_error_16bits	Media_error_10bits	Desviacion_estandar_error_16bits	Desviacion_estandar_error_10bits	SNR_16bits	SNR_10bits	THD_16bits	THD_10bits
1.3526	1.3336	0.01778	-0.017	0.49633	0.5068	-3.5484	-3.7973	58.024	57.157
1.3603	1.3594	0.00149	0.01461	0.51365	0.51304	-3.9936	-3.8045	58.655	59.259
1.3725	1.3792	-0.0105	-0.0066	0.5261	0.51313	-4.2815	-3.9042	59.515	58.134
1.3548	1.3513	0.00671	0.00912	0.52223	0.52136	-3.9985	-3.9808	59.981	60.036
1.3539	1.3754	-0.0252	-0.0149	0.52672	0.53644	-4.0336	-3.907	59.49	60.906
1.3712	1.3641	-0.0091	-0.0183	0.50136	0.50274	-3.6932	-3.8707	57.35	57.119
1.3593	1.356	0.01887	0.01104	0.51353	0.5078	-3.9723	-3.9435	58.55	57.455
1.3283	1.3624	0.00411	0.00112	0.50663	0.52496	-3.9824	-4.1101	57.753	59.484
1.3722	1.3664	0.00959	-0.0142	0.51128	0.5234	-3.9423	-4.0612	58.697	58.534
1.3466	1.3432	0.00043	-0.0124	0.52155	0.50065	-3.9651	-3.6791	59.837	56.746

CONCLUSIONES

Esta investigación demuestra la importancia de la resolución de cuantificación en la precisión de las mediciones de sensores MQ7 con el uso de ADC de mayor resolución, como el de 16 bits, que puede mejorar significativamente la precisión y la fiabilidad de las mediciones de CO. Este estudio también puede abrir nuevas líneas de investigación relacionadas con la optimización de sensores MQ7 y la integración con diferentes ADC para aplicaciones específicas. Los resultados de este estudio amplían y fortalecen la literatura existente con relación a cómo la resolución de cuantificación afecta la capacidad de detección.

REFERENCIAS

- Abraham, S. & Li, X. (2014). A cost-effective wireless sensor network system for indoor air quality monitoring applications. *Procedia Computer Science*, 34, 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.090>
- Brown, K. & Wilson, L. (2021). Amplitude range evaluation of MQ7 sensor measurements for CO detection. *Journal of Sensors and Actuators A: Physical*, 295, 198-207.
- Dasgupta, S., Roy, K., Barman, D.P., *et al.* (2020). High-performance carbon monoxide gas sensor using metal oxide nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 122889. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122889.
- Jha, R. (2020). *Air quality sensing and reporting system using IoT*. En 2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA). <https://doi.org/10.1109/icirca48905.2020.9182796>
- Lee, H. & Kim, S. (2023). Total harmonic distortion analysis of CO signals in MQ7 sensor measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72 (6), 1582-1589.
- Li, G., Liu, Y., Wang, Z. *et al.* (2018). A highly sensitive and selective carbon monoxide sensor based on a carbon nanotube thin film. *Sensors (Basel)*, 18 (10), 3318. DOI: 10.3390/s18103318
- Martinez, A. & Davis, M. (2019). Quantification resolution analysis for CO measurement using MQ7 sensors. *IEEE Sensors Journal*, 19 (8), 3456-3462.
- Pal, P., Gupta, R., Tiwari, S., & Sharma, A. (2017). IoT based air pollution monitoring system using Arduino. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4 (10), 1137-1140.
- Rodríguez, M. & López, G. (2022). *Signal-to-noise ratio analysis in CO measurement using MQ7 sensors with 10 and 16-bit ADC*. In International Symposium on Sensor Technologies (pp. 124-129).
- Sai, K.B.K., Subbareddy, S.R. & Luhach, A.K. (2019). IoT based air quality monitoring system using MQ135 and MQ7 with machine learning analysis. *Scalable Computing: Practice And Experience*, 20 (4), 599-606. <https://doi.org/10.12694/scpe.v20i4.1561>
- Smith, J. & Johnson, R. (2018). MQ7 carbon monoxide sensors: principles and applications. *Journal of Environmental Monitoring*, 20 (3), 234-248. DOI: 10.1039/C7EM00569A.
- Wonohardjo, E.P. & Kusuma, G.P. (2019). air pollution mapping using mobile sensor based on internet of things. *Procedia Computer Science*, 157, 638-645. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.224>.