

Desarrollo de un frecuencímetro de conteo recíproco con un FPGA para sensores basados en resonador de cuarzo

José Lorenzo Muñoz Mata

Universidad Tecnológica de Puebla, División de Mecatrónica, Antiguo camino a la resurrección 1002-A,
Zona Industrial Oriente, Teléfono: 52 01 (222) 309 8833
jose.munoz@utpuebla.edu.mx

Severino Muñoz Aguirre

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Av. San Claudio
y 18 sur, Ciudad Universitaria

Juan Jesús Jiménez Arellano

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Av. San Claudio
y 18 sur, Ciudad Universitaria

Georgina Beltrán Pérez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Av. San Claudio
y 18 sur, Ciudad Universitaria

Juan Castillo Mixcóatl

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Av. San Claudio
y 18 sur, Ciudad Universitaria

Takamichi Nakamoto

Tokyo Institute of Technology, Precision & Intelligence Laboratory, Suzukakedai Campus, Nagatsuta,
Yokohama, Japan

Resumen

Los sensores basados en resonadores de cuarzo son ampliamente utilizados en dispositivos de detección de olores conocidos como narices electrónicas (NE). Para medir la respuesta de este tipo de sensores es esencial el uso de un frecuencímetro. Existen diferentes métodos para implementar un frecuencímetro, tal como el método de conteo directo de frecuencia, el cual está restringido en la generación de datos, ya que si se desea un incremento en el número de muestras por segundo, implicaría una pérdida en la resolución del instrumento debido a su principio de operación. Por otro lado, el método de conteo recíproco de frecuencia es un método que ofrece una alternativa en la medición de respuesta de sensores de gas. Por lo tanto en este trabajo se presenta el desarrollo de un frecuencímetro aplicando el método de conteo recíproco de frecuencia para sensores de gas utilizando un FPGA. Se obtuvieron resultados utilizando como patrón de entrada un generador de funciones. Este frecuencímetro tiene la ventaja de tener una mayor tasa de muestreo y resolución que un frecuencímetro comercial. Finalmente se realizaron experimentos utilizando sensores de gas QCM a temperatura ambiente aplicando muestras de etanol para obtener datos reales y comprobar la efectividad del sistema obteniendo resultados satisfactorios, dado que los datos arrojados coinciden con el comportamiento típico de este tipo de sensores.

Palabra(s) Clave(s): frecuencímetro, FPGA, nariz electrónica, sensores de gas QCM.

1. Introducción

Los sensores de gas de microbalanza de cristal de cuarzo (QCM) son utilizados para el desarrollo de una nariz electrónica (NE) debido a su alta correlación con la nariz humana [1]. Estos dispositivos pueden medir diferentes variables, pero en el caso de la nariz electrónica estos son configurados como dispositivos sensores de cambio de masa [2]. Estos son de gran importancia en el campo científico debido a la necesidad de trabajar en la detección, discriminación y reconocimiento de patrones de olores [3].

Además, al aplicar diferentes tipos de películas sensibles en la superficie se podrá obtener diferentes características de cada sensor logrando obtener evaluaciones más acertadas de gases o vapores [4].

El principio de funcionamiento del sensor se lleva a cabo por la adsorción de moléculas en la película sensible [5]. Al incrementarse la masa, provoca un decremento en la frecuencia de resonancia por el efecto de la carga de masa [6], esta variación es proporcional a la cantidad de masa que interactúa con la capa o película sensible y se conoce como la respuesta del sensor [7].

En la Ecuación de Sauerbrey (1) se describe el cambio de la frecuencia de resonancia en la película sensible en función del cambio de masa por unidad de área en la superficie del electrodo del QCM [8].

$$\Delta f = -2.3 \times 10^{-6} \cdot F^2 \frac{\Delta m}{A} \quad (1)$$

donde Δf es la variación de la frecuencia (Hz), -2.3×10^{-6} es una constante determinada por la densidad (ρ_q) y el módulo de cizalla o shear (μ_q) del cuarzo ($m/(Hz \cdot g)$), Δm es la masa adsorbida (g), A es el área del electrodo (cm^2) y F es la frecuencia de resonancia del cristal (Hz) [9].

Por lo tanto es esencial el uso de un frecuencímetro para medir la respuesta de este tipo de sensores. Existen frecuencímetros comerciales que solo manejan uno o a lo más dos entradas, para el caso particular de la nariz electrónica es necesario un número mayor de entradas [10]. Además, los precios de estos dispositivos son muy elevados y en algunos casos con rangos de GHz lo cual no es necesario para esta aplicación. En cambio, en algunos dispositivos al aumentar la frecuencia de la señal de entrada, estos pueden perder resolución. Por otro lado, los FPGA ofrecen prestaciones muy atractivas para el desarrollo de este tipo de dispositivos, tanto en velocidad como

en características de operación. Por lo tanto, es posible agregar más canales de entrada para medir en paralelo y mantener una buena resolución del instrumento.

En este trabajo se muestra el desarrollo de un frecuencímetro de conteo recíproco para sensores de gas basados en resonador de cuarzo. Para el cual se utilizó un FPGA para su implementación. La transmisión de datos se realizó utilizando una tarjeta (USB-DAQ), utilizando un Microcontrolador PIC18F4550 [11], la cual funge como interfaz de comunicación entre el FPGA y la computadora a través del módulo de comunicación USB (Universal Serial Bus). Se realizaron pruebas utilizando como patrón un generador de funciones. Además se realizó una comparación del sistema desarrollado con un frecuencímetro comercial para comprobar el buen funcionamiento del sistema. Finalmente se realizaron mediciones utilizando sensores de gas reales aplicando estímulos de etanol.

2. Desarrollo

Debido al principio de funcionamiento del sensor QCM, el uso de un frecuencímetro es esencial para su instrumentación y obtención de la respuesta. Dadas las prestaciones que ofrecen los FPGA' s en el desarrollo de diferentes circuitos, se utilizó una tarjeta de desarrollo EDA-004 que contiene un FPGA (Cyclone III-Altera) [12]. Para comprobar el desempeño del sistema se utilizó un generador de funciones (AFG3102, Tektronix). Para la adquisición de datos se utilizó un microcontrolador vía USB. Para el desarrollo de software se utilizó LabVIEW (ver Fig.1).

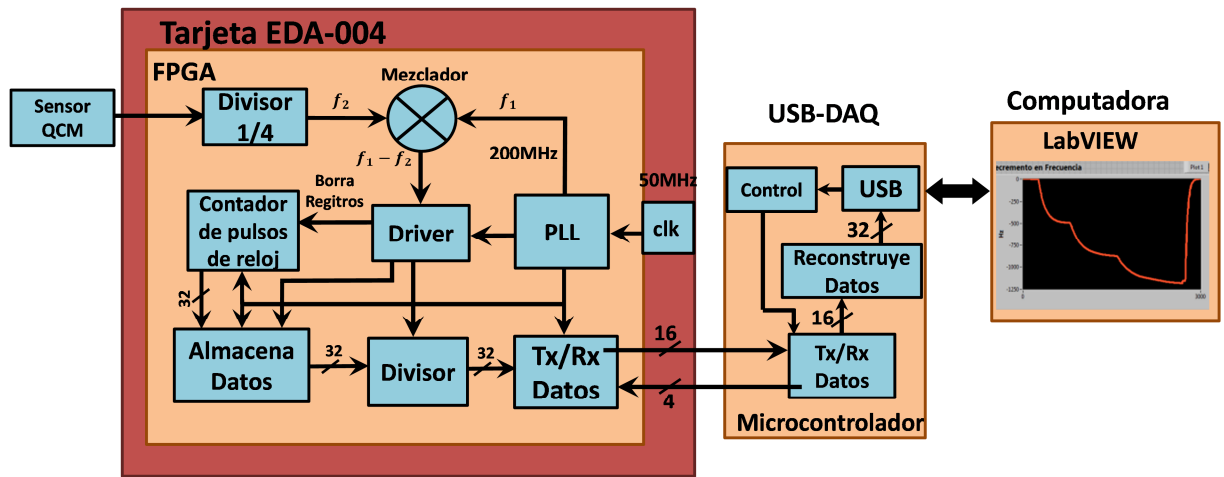


Fig. 1. Diagrama a bloques del sistema implementado.

El método de conteo de frecuencia directa es el más frecuentemente utilizado, donde el número de pulsos de la señal de entrada dentro de una ventana de tiempo determinada es contado [10]. Sin embargo, la velocidad en la generación de datos está relacionada directamente a la resolución del sistema, debido a su principio de operación, por lo que al aumentar la velocidad en la generación de datos provocaría una pérdida en resolución.

Por otro lado, existe el método de conteo recíproco de frecuencia. Este método cuenta periodos de un reloj maestro en función de los flancos ascendentes de la señal de entrada, la cual funciona como señal de inicio y paro del contador. La Ecuación (2) describe el principio de funcionamiento.

$$Frecuencia = \frac{1}{pulsos_{mclk} \times T_{mclk}} \quad (2)$$

Por ejemplo, el contador inicia con el flanco ascendente de la señal de entrada y se detiene al siguiente flanco ascendente. Ahora el contador contiene información del periodo de la señal de entrada en múltiplos del reloj maestro (ver Fig. 2). Por lo tanto este método fue el utilizado para la implementación del frecuencímetro.

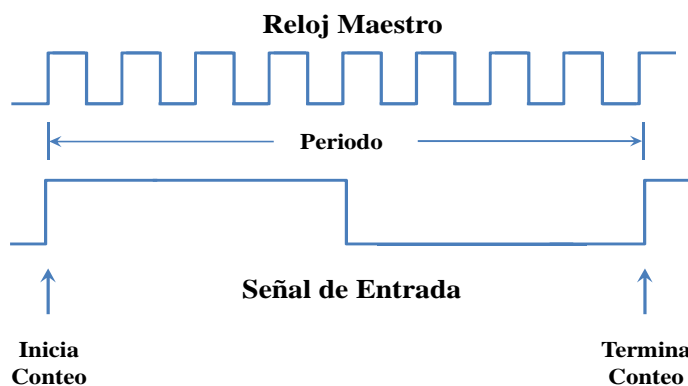


Fig. 2. Principio de funcionamiento de un frecuencímetro por el método de conteo recíproco de frecuencia.

Para esta técnica se debe dividir la frecuencia del sensor, ya que como se utilizan sensores de 12 MHz, dicha frecuencia es muy alta como para obtener buena resolución del frecuencímetro. Por lo tanto, es necesario reducir la frecuencia de entrada del sensor utilizando un circuito para dividir la frecuencia entre cuatro para obtener una frecuencia de 3 MHz. Se utiliza una señal de referencia local generada con un PLL también de 3 MHz para obtener una diferencia del orden de KHz. Estas señales son introducidas a un mezclador de frecuencia para obtener la diferencia de dichas señales (Ec. 3) y obtener una buena resolución [13].

$$f_o = f_1 - f_2 \quad (3)$$

Driver.

Se desarrolló un circuito utilizando una máquina de estados para dirigir el sistema. Una vez que se presente el flanco de subida de la señal mezclada se generó la señal para borrar los registros del conteo de pulsos de reloj maestro. En el siguiente estado, es decir, en el siguiente ciclo de reloj se genera la señal para la almacenar los datos. Posteriormente al siguiente estado se envía la señal al bloque de división para obtener el conteo recíproco.

Contador de pulsos del reloj maestro.

Se diseñó un bloque para realizar el conteo de pulsos del reloj maestro utilizando un contador síncrono ascendente, la frecuencia del reloj maestro en este caso es de 200 MHz. Los registros son borrados cada flanco ascendente de la señal mezclada.

Almacenamiento de datos.

Para el almacenamiento de datos se desarrolló un circuito de almacenamiento de datos utilizando un circuito de captura (Latch). Cada vez que se genera el flanco de subida de la señal de entrada se recibe la bandera de almacenamiento. De manera que se almacenan los datos recibidos por el contador de pulsos del reloj maestro. Estos datos son almacenados en registros de 32 bits. El software utilizado para implementar el firmware dentro del FPGA fue Quartus II.

Para el envío de datos se utilizó una estrategia de transferencia hacia la USB-DAQ. Los datos son enviados en paquetes de 16 bits a la computadora.

Desarrollo de Software.

Se implementó una interfaz basada en el software de instrumentación virtual LabVIEW, el cual permite visualizar los datos obtenidos de la respuesta del sensor, así como la diferencia del corrimiento de frecuencia (Δf) del mismo. Además es posible el almacenamiento de los datos para posteriormente poder realizar el análisis de los mismos (ver Fig. 3).

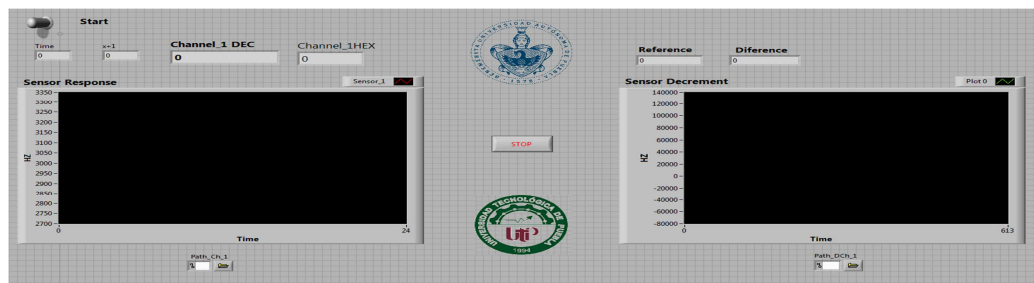


Fig. 3. Interfaz desarrollada con LabVIEW.

3. Resultados

Una vez terminado el firmware correspondiente al FPGA se realizaron las pruebas correspondientes para comprobar el funcionamiento del sistema. Por lo tanto, se utilizó un generador de funciones, un osciloscopio, la tarjeta de desarrollo EDA-004 que contiene el FPGA, la tarjeta de adquisición de datos USB-DAQ y una computadora para la visualización de la información (ver Fig. 4).

En este caso se utilizó como patrón de entrada el generador de funciones, con el cual se ajustó la frecuencia de entrada emulando la frecuencia del sensor, para observar que el sistema funciona adecuadamente.

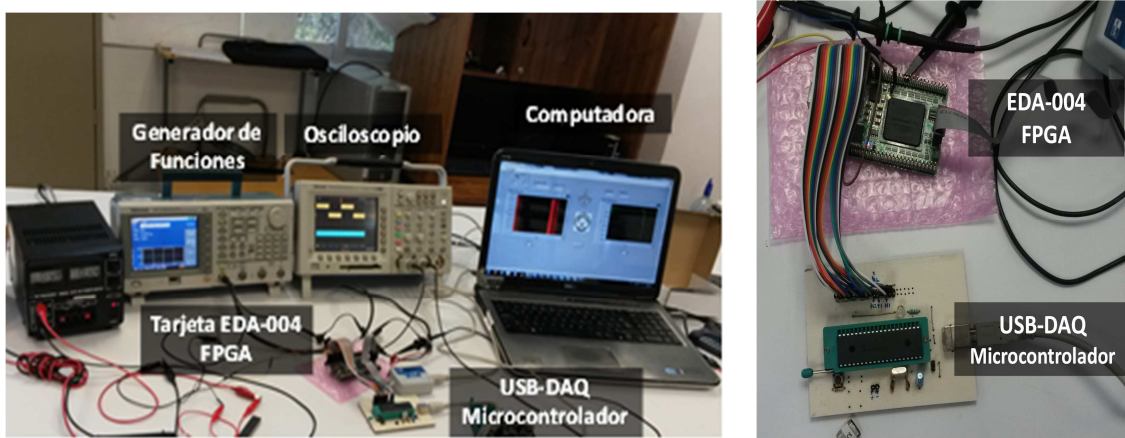


Fig. 4. Arreglo Experimental con generador de funciones.

Posteriormente se implementó un arreglo experimental, para el cual se utilizó un sensor QCM de 12 MHz, con una película sensible compuesta de etil celulosa. En este caso se utilizó el sensor a temperatura ambiente aplicando un vapor de etanol directamente al sustrato, es decir los estímulos aplicados no fueron controlados. El sensor QCM fue conectado con un circuito oscilador para excitar la frecuencia de resonancia del sensor conectado al frecuencímetro (ver Fig. 5).

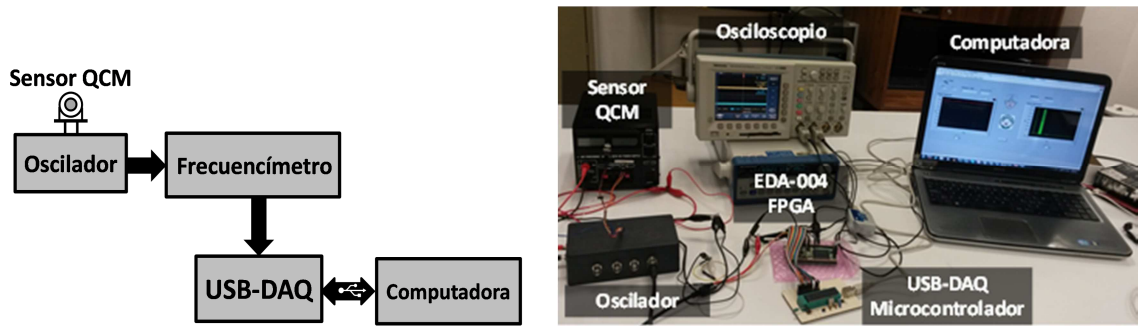


Fig. 5. Arreglo experimental utilizando sensor de gas QCM.

4. Discusión

Al integrar todo el sistema, se realizaron pruebas usando como patrón de entrada el generador de funciones, aplicando frecuencias de entrada de alrededor de 12 MHz. En este caso se aplicaron decrementos a razón de Hz y de KHz en un tiempo aproximadamente de 400 segundos por cada medición (ver Fig.6).

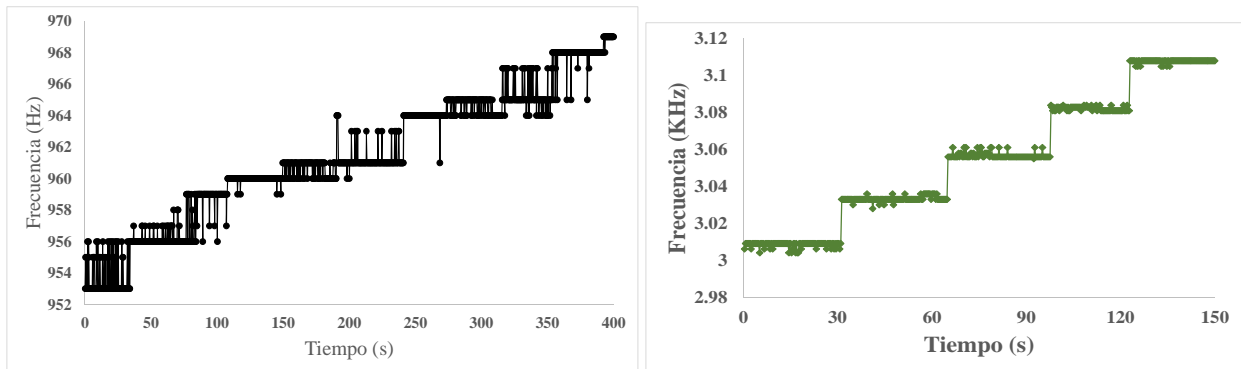


Fig. 6. Datos obtenidos utilizando generador de funciones. a) Decrementos a razón de Hz. b) Decrementos a razón de KHz.

En la Figura 6a se muestran los datos obtenidos del frecuencímetro, donde se puede apreciar que los datos enviados por el generador de funciones concuerdan con los obtenidos a través del sistema almacenados en la computadora. Como se puede observar, existe una fluctuación en los datos obtenidos, debido a las características de estabilidad del generador de funciones utilizado, por lo que se puede decir que el sistema funciona de manera correcta. En la Figura 6b se observa una estabilidad mayor

en los datos obtenidos ya que en este caso se realizan decrementos de la señal de entrada en el rango de KHz, donde se puede observar que el sistema funciona satisfactoriamente.

Hasta este punto el sistema no muestra ningún inconveniente en la dinámica de funcionamiento aunque a ciertas frecuencias se muestra una inestabilidad en el sistema debido al principio de funcionamiento del conteo recíproco de frecuencia, para lo cual es necesario realizar algunos ajustes para su optimización. Adicionalmente se realizó una prueba comparando nuestro frecuencímetro desarrollado con un frecuencímetro comercial (ver Fig. 7).

Se puede observar la alta correlación que existe entre los datos obtenidos con el frecuencímetro comercial y nuestro frecuencímetro. Por lo tanto se pudo comprobar que el instrumento diseñado funciona satisfactoriamente.

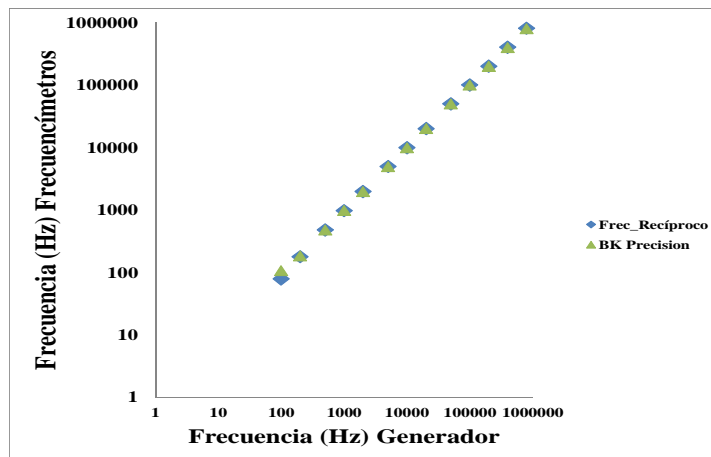


Fig. 7. Comparación entre un frecuencímetro comercial BK Precision y el frecuencímetro implementado.

Posteriormente se realizaron mediciones utilizando un sensor de gas en condiciones de temperatura ambiente, para lo cual se utilizó un sensor QCM de 12 MHz (ver Fig. 8).

Cabe destacar que al haber realizado esta prueba a temperatura ambiente las concentraciones de los estímulos o muestras aplicados no fueron controlados, de manera que solo se expuso a concentraciones de gas indeterminadas y estas pueden variar debido a las condiciones expuestas. Sin embargo, se puede observar en la Figura 8 una línea base del sensor aproximadamente de 4.05 KHz. Se aplicó el primer estímulo durante al menos un minuto, donde se puede observar corrimiento en la frecuencia del sensor (Δf) de aproximadamente 70 Hz, una vez retirado el gas se observa la recuperación del sensor a su frecuencia de resonancia base. Se aplicó un segundo estímulo durante aproximadamente un minuto, en este caso se observa un corrimiento en la frecuencia de 60 Hz.

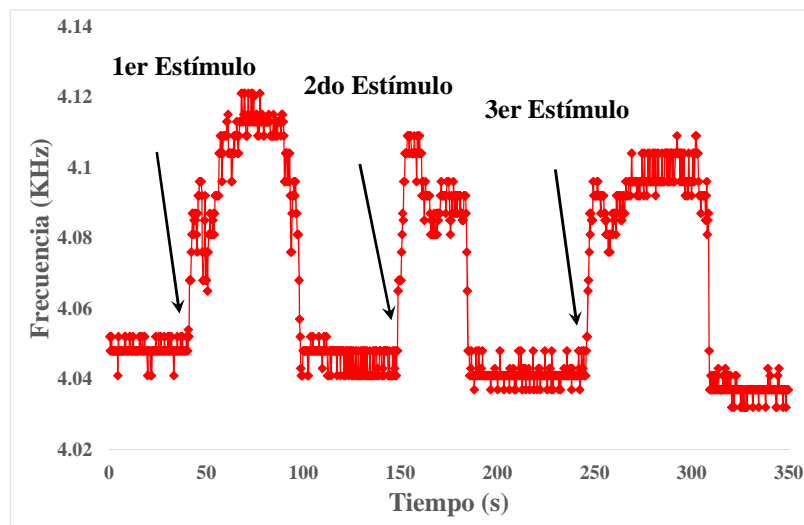


Fig. 8. Respuesta del sensor obtenida a temperatura ambiente.

Finalmente se aplicó un tercer estímulo donde se puede apreciar un corrimiento de frecuencia de aproximadamente 60 Hz y una vez retirado el estímulo el sensor se recupera a su frecuencia base. Sin embargo, cabe señalar que no se tiene control en el flujo de concentración de gas. Los datos obtenidos muestran un comportamiento típico de este tipo de sensores, por lo que se puede observar que el sistema funciona

correctamente, aunque aún se necesitan realizar un número mayor de experimentos para verificar el completo funcionamiento del sistema implementado.

5. Conclusiones

Se ha realizado el diseño de un frecuencímetro de conteo recíproco con buena resolución, utilizando un FPGA para sensores de gas QCM, así como la integración del sistema para obtener datos a través de una computadora.

Se realizaron pruebas para comprobar el funcionamiento del sistema utilizando como patrón de entrada un generador de funciones. Además se realizó una comparación con un frecuencímetro comercial y se encontró que nuestro frecuencímetro tiene mejor resolución y una mayor tasa de muestreo para un rango de 1 MHz.

Finalmente se realizaron mediciones utilizando sensores reales a temperatura ambiente obteniendo un resultado satisfactorio, ya que los resultados obtenidos concuerdan con el comportamiento típico de este tipo de sensores.

Actualmente se está trabajando en la optimización del firmware del frecuencímetro para optimizar el funcionamiento del sistema, para finalmente lograr escalar el sistema a un número mayor de canales de entrada y realizar un proceso adecuado enfocado a la caracterización de sensores QCM.

6. Referencias

- [1] H. Troy Nagle & R. Gutiérrez-Osuna, S. S. Schiffman, "The How and Why of Electronic Noses". IEEE Spectrum. Vol. 35 No. 22. September 1998.
- [2] J. W. Gardner, P. N. Bartlett, "A brief history of electronic noses". Sensors and Actuators B. Vol. 18. No. 211. 1994.

- [3] J. W. Gardner, P. N. Bartlett, *Electronic Noses*. 1999. New York: Oxford University Press.
- [4] S. Muñoz, T. Nakamoto et al, "Odor Approximation of fruit flavors using a QCM odor sensing system". *Sensor and Actuators B*. No. 105. 2005. 144-149 pp.
- [5] W. H. King. Jr., "Piezoelectric Sorption Detector". Analytical Research Division, Esso Research and Engineering Co., Linden N.J. Vol.36. No. 9 Aug 1964.
- [6] *Piezoelectric Transducers and Applications*. Berlin: Springer. 2004.
- [7] S. Muñoz-Aguirre, T. Nakamoto, et al. "Study of deposition of gas sensing films of quartz crystal microbalance using an ultrasonic atomizer". *Sensors and Actuators B*. No. 105. 2005. 144-149 pp.
- [8] SRS Application Notes, QCM- "Quartz Crystal Microbalance Theory and Calibration". Stanford Research Systems. [http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ ApplicationNotes/QCMTheoryapp.pdf](http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/QCMTheoryapp.pdf).
- [9] G. Sauerbrey, Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung *Z. Phys.* 1959. 155-206 pp.
- [10] J. L. Muñoz M, S. Muñoz, et al., "Development and implementation of a system to measure the response of quartz crystal resonator based gas sensor using an a field programmable gate array". *Meas. Sci. Technol.* Vol. 35 No. 5. Marzo 2012.
- [11] 28/40/44 Pin High Performance, Enhanced Flash USB Microcontrollers DS39617A. Microchip. USA. 2003.
- [12] Cyclone III USB-FPGA Board EDA-004, Ver 2.0. Humandata LTD. Japon. 2012
- [13] F. Yoshino, T. Nakamoto, "Odor Recognition Using Embedded Learning Vector Quantization Circuit. *Sensors and Materials*". Vol. 26. No. 3. 2014. 137-147 pp.

7. Autores

Dr. José Lorenzo Muñoz Mata obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización por la BUAP México (2008), el de Doctorado en Ciencias por la BUAP Puebla México (2013). Actualmente es profesor investigador en la División de Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Puebla (UTP), México.

Dr. Severino Muñoz Aguirre obtuvo su título de Maestría en Ciencias en el CINVESTAV México (1995), el de Doctorado en Ciencias por el Instituto de Tecnología de Tokio, Japón (1999). Actualmente es profesor investigador en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la BUAP. Su trabajo se ha centrado en el desarrollo de sistemas electrónicos para la detección de gas/olor, reconocimiento de patrones y discriminación. Su más reciente investigación involucra sensores optoelectrónicos y sistemas multisensoriales.

M. en C. Juan Jesús Jiménez Arellano obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) México (2008). Actualmente realiza sus estudios de doctorado en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la BUAP sobre el tema de las narices electrónicas y su capacidad de sensibilidad.

Dra. Georgina Beltrán Pérez obtuvo su título de Maestría en Ciencias en el CICESE Ensenada Baja California México (1998), el de Doctorado en Ciencias por el INAOE Puebla México (2002). Actualmente es profesora investigadora en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la BUAP. Su más reciente investigación incluye sensores de fibra óptica, rejillas de fibra de periodo largo y láser de fibra óptica.

Dr. Juan Castillo Mixcóatl obtuvo su título de Maestría en Ciencias en el CICESE Ensenada Baja California México (1998), el de Doctorado en Ciencias por el INAOE Puebla México (2003). Actualmente es profesor investigador en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la BUAP.

Dr. Takamichi Nakamoto obtuvo su título de maestría y doctorado en el Instituto Tecnológico de Tokyo, Japón, en 1984 y 1991, respectivamente. Actualmente se desempeña como Profesor en el Precision and Intelligence Laboratory, en el Instituto Tecnológico de Tokyo, en el tema de desarrollo de Narices Electrónicas y Olfactory Display.