



Circuito CMOS para el control de temperatura de sensores de gas MOX CMOS temperature control circuit for MOX gas sensors

Álvarez-Simón Luis Carlos

Universidad Autónoma del Estado de México

Correo: alvarez.simon.dr@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1389-3931>

Gómez-Ramírez Emmanuel

Conacyt-Tecnológico Nacional de México

Instituto Tecnológico de La Laguna

Correo: egomez.ram@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7104-9520>

Resumen

En los últimos años, la contaminación del aire y la detección de gases nocivos se han convertido en una vertiente en la investigación. Por ello, hoy en día se han desarrollado diversos sensores capaces de detectar diferentes gases, por ejemplo, los sensores químico-resistivos y los de tipo metal-óxido-semiconductor (sensores MOX), los cuales se destacan entre otras tecnologías. Los sensores de gas MOX permiten detectar múltiples gases con una alta sensibilidad y además son compatibles con tecnologías de integración CMOS. Los sensores MOX combinan un elemento de sensado de gas y un elemento de calentamiento para la selectividad de gases. Actualmente, la modulación de la temperatura de operación es una de las técnicas más usadas para mejorar la selectividad y estabilidad de los sensores de gas MOX. En este trabajo se propone un circuito de control on/off para la modulación de la temperatura de operación de sensores MOX utilizando la resistencia del calentador para monitorear su temperatura. Este circuito permite aplicar diferentes técnicas de modulación de temperatura tales como la técnica de modulación por pulsos, la técnica de modulación por ondas periódicas y el control a diferentes niveles de la temperatura de operación para la generación de matrices virtuales de sensores mediante un solo sensor. El circuito se diseñó en una tecnología CMOS de 180nm y se simuló usando un modelo simple del sensor comercial AS-MLC de AppliedSensor. El circuito propuesto permite alcanzar exactitudes de 0.2 Ω en el valor de la resistencia del calentador, el cual corresponde aproximadamente a un error de 1 $^{\circ}\text{C}$ en la temperatura de operación del sensor.

Descriptor: Control de temperatura, sensores de gas MOX, modulación de temperatura, circuitos CMOS, Circuito de control on-off.

Abstract

In the last years, air pollution and the detection of harmful gases has become one important branch in research. For this reason, several sensors capable of detecting different gases have been developed, for example, chemical-resistive sensors and metal-oxide-semiconductor sensors (MOX sensors). MOX gas sensors allow the detection of multiple gases with high sensitivity and are also compatible with CMOS integration technologies. The MOX sensors combine a gas sensing element and a heating element for the gas selectivity. Currently, the modulation of the operating temperature is one of the most used techniques to improve the selectivity and stability of the MOX gas sensors. In this work, an on/off control circuit for temperature modulation in MOX sensors using resistance from Heater to monitor the temperature is proposed. This circuit allows applying different temperature modulation techniques like pulses modulation technique, periodic wave modulation technique, and control at different levels of the operating temperature for the generation of virtual arrays of sensors by a single sensor. The circuit was designed in a 180nm CMOS technology and simulated using a simple model of a commercial sensor AS-MLC from AppliedSensor. The proposed control circuit allows achieving accuracies of 0.2 Ω in the Heater resistance value, which corresponds to an error of 1 $^{\circ}\text{C}$ in the operating temperature of the sensor approximately.

Keywords: Temperature control, MOX gas sensor, temperature modulation, CMOS circuit, on/off control circuit.

INTRODUCCIÓN

Actualmente tanto la contaminación del aire como la detección de gases tóxicos en las industrias y en lugares públicos, han sido un tema de interés para la comunidad científica y social, incrementando la necesidad de monitorear y regular la emisión de ciertos gases que afectan la salud de la población en general (Dongmin *et al.*, 2010; Jendritzky, 1993). Por ello, la implementación de sistemas de monitoreo ha incrementado en los últimos años. Sin embargo, la detección de gases nocivos se sigue realizando con instrumentos de laboratorio, lo que encarece y dificulta este tipo de detección. Una alternativa para subsanar esto es el desarrollo de sistemas de detección de gas portables de bajo costo. Para ello, hoy en día se han desarrollado diversos sensores capaces de detectar diferentes gases, entre los que destacan los sensores químico-resistivos y los de tipo metal-óxido-semiconductor (MOX) (Gardner *et al.*, 2010; Burgues y Marco, 2018; Bharat *et al.*, 2018). Estos últimos combinan, principalmente, un elemento de sensado de gas y un elemento de calentamiento, ya que la sensibilidad y selectividad de la película de sensado es dependiente de su temperatura de operación. Los sensores MOX operan a temperaturas superiores a los 300 °C (Seiyama *et al.*, 1962). En contraste con los sensores de estado sólido en otras tecnologías, los sensores MOX tienen la capacidad de detectar múltiples gases con una alta sensibilidad, pudiendo sensar niveles tan bajos como partes por billón (ppb), además de una mayor compatibilidad con la tecnología CMOS y por ende un bajo costo, lo que ha motivado a la co-integración con los circuitos de acondicionamiento de señal en un solo circuito integrado (Korotcenkov, 2007).

Los sensores de gas de tipo MOX aún presentan inconvenientes respecto a su selectividad (Ponzoni, 2017). Además de la constante búsqueda de materiales más selectivos, se ha hecho uso de las características estáticas y dinámicas del propio sensor para mejorar su desempeño, utilizando en algunos casos, matrices de sensores no-selectivos junto con técnicas de reconocimiento de patrones para aumentar la selectividad (Bermak *et al.*, 2005). Otra técnica consiste en discriminar los gases a través de la respuesta dinámica del sensor al variar su temperatura de operación, lo que se conoce como técnica de modulación de temperatura (Lee y Reedy, 1999). Cabe mencionar que este se ha convertido en el método más usado para mitigar la baja selectividad en el desarrollo de sistemas de sensado de gases de bajo costo en los últimos años (Ponzoni, 2017; Bermak *et al.*, 2005).

Para el control de la temperatura de la película sensible, se pueden utilizar dos elementos, uno para sensar

la temperatura de la película y otro para calentar (Kang *et al.*, 2017). Sin embargo, es posible usar un solo dispositivo para llevar a cabo ambos procesos, es decir, usando las variaciones de resistencia del propio calentador como sensor de temperatura (Falconi, 2013), lo que conlleva a una reducción del costo de fabricación, siendo este método el que se usa en este trabajo. En la literatura se pueden encontrar diferentes propuestas de circuitos de control de temperatura para sensores de gas MOX, desde esquemas de control simples como el control on/off, hasta algunos más complejos con bloques Proporcional-Integral-Derivativo (PID) (Falconi y Frattini, 2008; Bota *et al.*, 2004; Casanova *et al.*, 2004).

En la Figura 1 se representan de manera general los bloques necesarios para implementar un sistema de sensado de gas basado en sensores de gas MOX con modulación de la temperatura de operación. El sistema tiene dos subsistemas principales: el encargado del control de la temperatura de operación de la película sensible y el que determina la concentración del gas o gases presentes. Este último comprendido por un sensor o conjunto de sensores, un circuito de acondicionamiento y un bloque de reconocimiento de patrones para determinar la concentración de gases. El bloque del circuito de control de temperatura por su parte debe ser capaz de manipular la temperatura de operación de la película sensible, de tal manera que se puedan aplicar las técnicas de modulación de temperatura que se han propuesto en la literatura para este tipo de sensores, con el fin de mejorar su selectividad (Lee y Reedy, 1999).

En este trabajo se propone un circuito de control de tipo on/off, el cual permite utilizar diferentes técnicas de modulación de temperatura y además permite el uso de sensores de gas MOX con diferentes requerimientos en cuanto a la potencia necesaria para alcanzar la temperatura de operación deseada.

El contenido de este trabajo se distribuye de la siguiente manera: en las siguientes secciones se describe el diseño del circuito de control de temperatura propuesto, se muestran los resultados obtenidos y por último las conclusiones del trabajo.

CIRCUITO DE CONTROL PROPUESTO

El circuito de control de temperatura propuesto se muestra en la Figura 2, el cual utiliza dos voltajes de alimentación, denominados V_{DDL} y V_{DDHV} , lo que le da la flexibilidad de controlar *Heaters* con diferentes requerimientos de potencia (Casanova *et al.*, 2004). corresponde al voltaje de alimentación general para los circuitos de acondicionamiento analógico y digital, mientras que

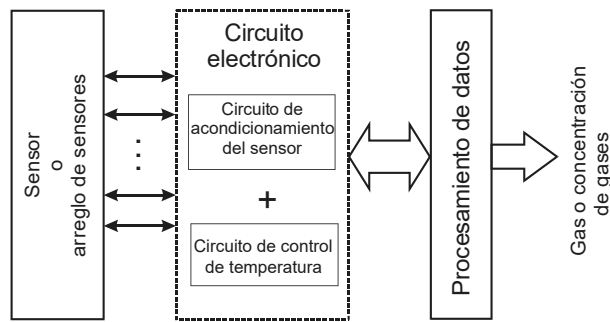


Figura 1. Esquema simplificado de un sistema de sensado de gas basado en sensores MOX

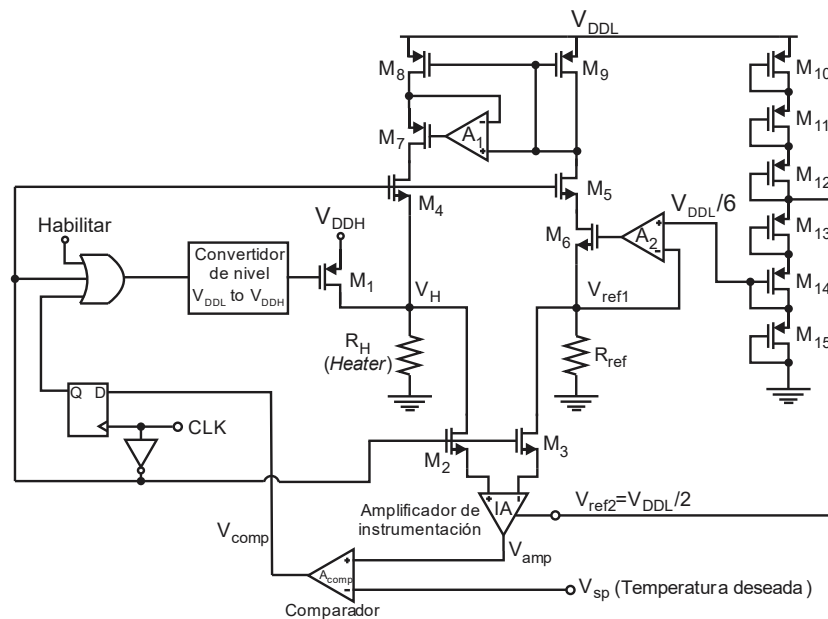


Figura 2. Esquemático del circuito de control de temperatura propuesto

V_{DDH} , es el voltaje de alimentación que le proporciona la potencia necesaria para el calentamiento del *Heater*, el cual puede ser mucho mayor al voltaje V_{DDL} . Este trabajo se ha desarrollado en una tecnología CMOS de UMC de 180nm, por lo que V_{DDL} es de 1.8V. Esta tecnología cuenta con transistores de alto voltaje que pueden trabajar a 3.3V, los cuales fueron utilizados en la rama de V_{DDH} .

El circuito propuesto desarrolla cuatro acciones principales: medida, comparación, almacenamiento digital y acción de control. Todas ellas sincronizadas por medio de la señal de reloj. La medida de la resistencia del *Heater* y la comparación con el voltaje de referencia (temperatura deseada) se realizan cuando $CLK = 0$. Durante este estado, los interruptores M_2 y M_3 se encienden, por lo que conectan al amplificador de instrumentación con el *Heater*. De igual forma, los interruptores M_4 y M_5 conectan al *Heater* con el espejo de corriente, y finalmente M_1 , al ser de tipo PMOS, se apaga, desconectando al *Heater* del voltaje V_{DDH} . Durante la transición

del reloj de 0 a 1, el resultado de la comparación es almacenado en el Flip-Flop tipo D. Finalmente, cuando $CLK = 1$, el amplificador de instrumentación y el espejo de corriente son desconectados (ya que los interruptores de M_2 a M_5 se apagan), la acción de control es ejecutado a través del transistor M_1 , el cual es encendido o apagado dependiendo del valor almacenado en el Flip-Flop (0→enciende, 1→apaga). Lo anterior permite que el *Heater* se alimente con V_{DDH} si su temperatura es menor al valor deseado, especificado por V_{sp} y se desconecte cuando lo haya superado.

Durante el proceso de medida, el circuito genera una corriente de referencia $I_{ref} = V_{ref1}/R_{ref}$. El voltaje V_{ref1} se obtiene mediante un seguidor de voltaje implementado con el amplificador A_2 y el transistor M_6 , el cual toma el voltaje de referencia $V_{DDL}/6$ de una cadena de transistores de igual dimensiones conectados en diodo (M_{10} a M_{15}), con una caída de voltaje de $V_{DDH}/6$ en cada transistor. La corriente de referencia generada I_{ref} se transfiere

a la rama del *Heater* a través del espejo de corriente (M_7 a M_9), generando el voltaje $V_H = V_{ref1}(R_H/R_{ref})$. Cabe mencionar que en el espejo de corriente se ha incluido el amplificador A1, con el fin de mantener el voltaje $V_{ds} = V_{gs}$ en los transistores M8 y M9 para mejorar la copia de corriente. La diferencia de potencial ($V_H - V_{ref1}$) es ampliada por el amplificador de instrumentación IA, implementado en modo corriente y cuyo esquemático se muestra en la Figura 3, produciendo entonces un voltaje de salida dado por

$$V_{amp} = V_{ref1} \left[\frac{R_H}{R_{ref}} - 1 \right] G + V_{ref2} \quad (1)$$

donde G es la ganancia del amplificador y V_{ref2} es un voltaje de referencia (obtenido de la cadena de transistores conectados en diodo M_{10} a M_{15} de la Figura 2) que permite fijar el nivel de voltaje de salida V_{amp} para cuando ambas entradas del amplificador de instrumentación son iguales ($V_H - V_{ref1}$), de esta manera un voltaje de alimentación dual no es necesario. Para que la salida V_{amp} se encuentre a la mitad del voltaje de alimentación (cuando $R_H = R_{H0}$), y a partir de ahí varíe en todo el rango de V_{DDL} para variaciones de ΔR_H , el valor de la resistencia R_{ref} queda determinado por:

$$R_{ref} = R_{H0} + \frac{\Delta R_H}{2} \quad (2)$$

Donde R_{H0} es el valor de la resistencia del *Heater* a la temperatura ambiente T_A y ΔR_H es la variación de la resistencia del *Heater* debido a las variaciones de su temperatura de operación. El valor de R_H respecto a su temperatura T_H puede expresarse de manera simple como

$$R_H = R_{H0} [1 + \alpha(T_H - T_A)] \quad (3)$$

donde α es el coeficiente de temperatura de R_H a la temperatura ambiente T_A (Lee y Reedy, 1999). (Figura 3).

El voltaje de salida del amplificador se compara con V_{sp} , el cual representa el valor de temperatura del *Heater* deseado y por ende la temperatura de operación del sensor, despejando de la Ecuación (3):

$$T_H = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{R_H}{R_{H0}} - 1 \right] + T_A \quad (4)$$

La salida del comparador es almacenada en el Flip-Flop tipo D, cuyo valor se usa en la fase de control para activar o desactivar al transistor M_1 con el fin de mantener la temperatura de operación del sensor alrededor de la temperatura deseada.

La salida de la compuerta OR, no puede ser conectada directamente a la compuerta del transistor M_1 , ya que este no se desactivará si la diferencia entre los dos voltajes de alimentación es superior al voltaje de encendido ($|V_{DDL} - V_{DDH}| \geq |V_{tp}|$). Para evitar que ocurra el caso anterior y aumentar la flexibilidad del esquema propuesto se agrega el acoplador de niveles lógicos mostrado en la Figura 4 (Ishihara *et al.*, 2004). El acoplador ayuda además a manejar la carga capacitiva de la compuerta de M_1 .

SIMULACIONES Y RESULTADOS

Para mostrar la funcionalidad y desempeño del circuito propuesto se han tomado las características del sensor de gas comercial de monóxido de carbono AS-MLC de la empresa AppliedSensor. Sin embargo, para poder simular el circuito en conjunto con el sensor, es necesario un modelo eléctrico del *Heater*. En la Figura 5 se muestra la representación del *Heater* en el dominio eléctrico, donde R_H es el valor de su resistencia (dada por la Ecuación 3),

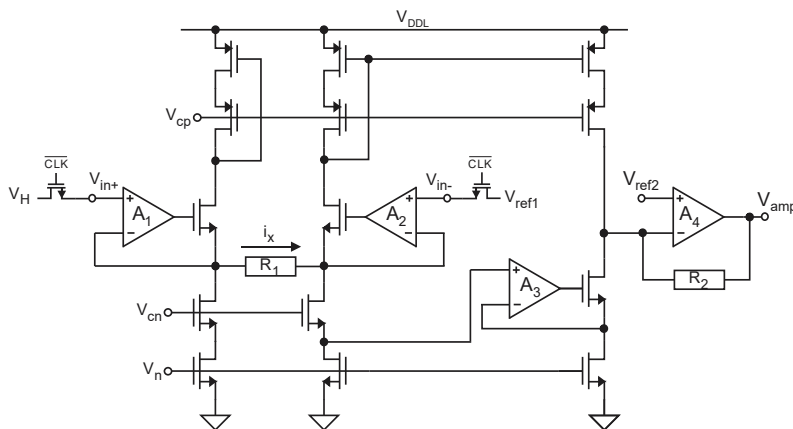


Figura 3. Esquemático del amplificador de instrumentación

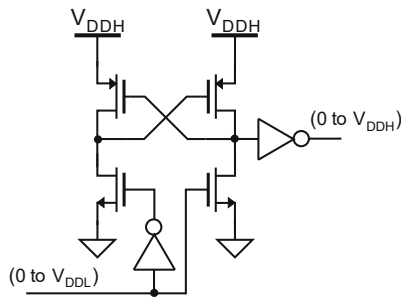


Figura 4. Esquemático del convertidor de nivel

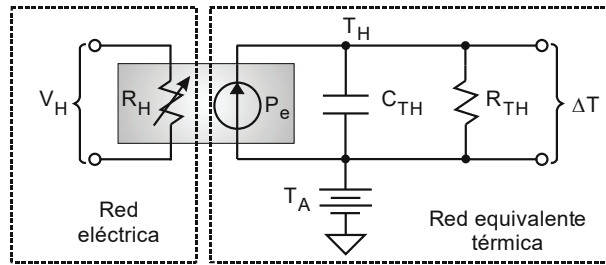


Figura 5. Modelo eléctrico del calentador (Heater)

P_e es la potencia eléctrica suministrada, R_{TH} y C_{TH} representan la resistencia y capacitancia térmica respectivamente, y la fuente T_A la temperatura ambiente. De acuerdo con el modelo eléctrico de la Figura 5, la razón del incremento en la temperatura del calentador queda descrita por la ecuación de equilibrio (Mo *et al.*, 2002):

$$\frac{dT_H}{dt} = \frac{P_e}{C_{TH}} - \frac{T_H - T_A}{\tau_T} \quad (5)$$

donde

$$P_e = \text{calor por efecto Joule proporcionada por el voltaje aplicado y}$$

$$\tau_T = R_{TH} C_{TH} = \text{constante de tiempo térmica}$$

La potencia instantánea aplicada al *Heater*, P_e , es una función del voltaje aplicado V_H y de la resistencia del *Heater* R_H , como se muestra enseguida:

$$P_e = \frac{(V_H)^2}{R_H} \quad (6)$$

Considerando las ecuaciones (3), (5) y (6) se implementó el modelo eléctrico del *Heater* mediante fuentes controladas, tal como se muestra en la Figura 6, los cuales fueron descritos en Verilog-AMS para su interconexión y simulación con el circuito propuesto.

El modelo eléctrico fue aplicado al sensor comercial de gas CO AS-MLC de la empresa *AppliedSensor*, cuyo

Heater tiene un coeficiente de temperatura de $\alpha = 1700 \text{ ppm}/^\circ\text{K}$ a $T_A = 20^\circ\text{C}$. La resistencia del sensor a temperatura ambiente, R_{H0} y la constante de tiempo, τ_T , fueron medidas experimentalmente. Para determinar la constante de tiempo se aplicó una entrada escalón de 2.3V al *Heater* mientras se monitoreaba su valor resistivo con una SourceMeter Keithley 2400, obteniendo un valor de 22ms, tiempo en el que alcanza 63.2% de su valor final. El valor de se midió con el mismo instrumento, pero aplicando un voltaje de solo 10mV para evitar su auto calentamiento y obtener el valor correcto de su resistencia a temperatura ambiente, obteniendo un valor de 102Ω. Por lo anterior R_{TH} y C_{TH} del modelo se establecieron en 6.3kΩ y 3.47μF, respectivamente.

El circuito propuesto fue simulado aplicando diferentes señales de entrada, V_{spr} , con las formas más representativas de las técnicas de modulación de la temperatura de operación de sensores de gas MOX (Lee y Reedy, 1999). La señal de reloj se estableció a una frecuencia de 10kHz. En la Figura 7 se observa la respuesta del circuito propuesto bajo una entrada escalón en la señal de referencia, V_{spr} , de tal manera que el *Heater* cambia de la temperatura ambiente a una temperatura de operación particular. En la Figura 7a se muestra la resistencia del *Heater* desde su valor a temperatura ambiente $R_H=102\Omega$, hasta el valor final $R_H=135\Omega$; lo que corresponde a un cambio en la temperatura de operación del sensor de 20 °C a aproximadamente 210 °C (Figura 7b). En la misma figura se muestra también un acercamiento de la parte en donde la resistencia se ha establecido alrededor del valor deseado. El rizo obtenido es inferior a 0.2Ω, lo que corresponde a un error

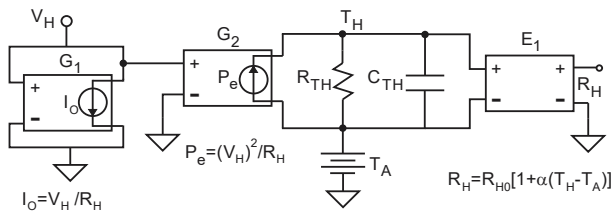


Figura 6. Implementación del modelo eléctrico del calentador con fuentes controladas

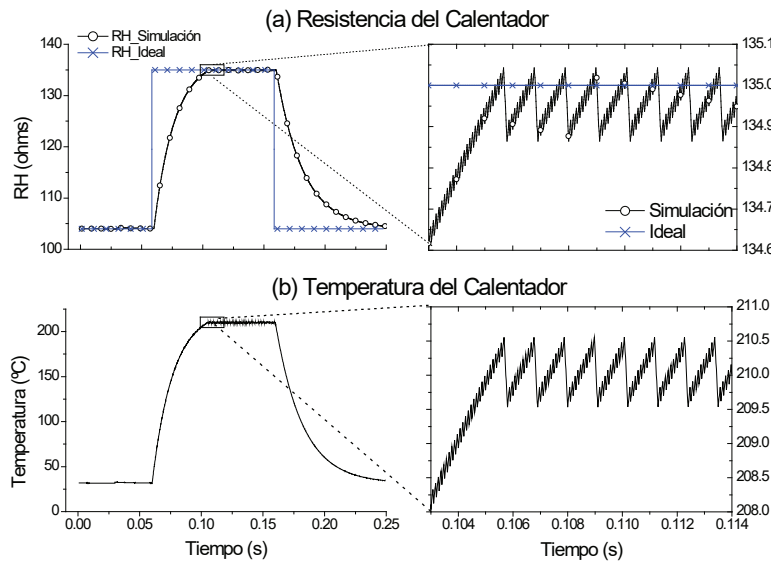


Figura 7. Respuesta del circuito de control con entrada de un pulso

aproximado de 1 °C en la temperatura de operación del sensor.

Un arreglo virtual de sensores de gas puede ser generado usando un solo sensor; esto es posible porque los sensores de gas MOX son sensibles a diferentes gases utilizando distintas temperaturas de operación. Por lo anterior, el circuito fue simulado para controlar la temperatura de operación a diferentes niveles. En la Figura 8 se muestra la salida del circuito de control bajo una entrada que simula los diferentes niveles de temperatura de operación. Se puede observar que la temperatura se establece en los valores deseados después de cierto tiempo debido a la constante de tiempo térmica del propio sensor, en este caso de 22ms.

Finalmente, se realizaron simulaciones con una señal de entrada sinusoidal de 2Hz para verificar el uso del circuito en las técnicas de modulación de temperatura siguiendo una forma de onda periódica. En la Figura 9 se muestra el resultado de la simulación, se puede observar, que una vez que el calentador alcanza el valor deseado, este sigue la forma de onda. Los mejores resultados para discriminar gases o incrementar la selectividad de los sensores MOX se han encontrado con frecuencias de modulación de temperatura por debajo de 1Hz (Sun *et al.*, 2004), por lo que el circuito de

control de temperatura propuesto puede ser usado para esas aplicaciones.

Cabe mencionar que en todas y cada una de las simulaciones, el error en el control de la resistencia se mantuvo por debajo de 0.2 Ω, lo que significa que el error en la temperatura de operación fue de aproximadamente 1 °C. Para el sensor usado, la potencia promedio en la fase de medida fue de 1.7 mW mientras que en el periodo de calentamiento fue de 43.6 mW.

En la Tabla 1 se proporciona un concentrado de las principales características del circuito de control de temperatura y una comparación con los trabajos más representativos de las técnicas de control de temperatura para sensores de gas de tipo MOX. Con el esquema propuesto se consigue la simplicidad y eficiencia de una técnica de control on/off y la flexibilidad en cuanto a voltajes de alimentación de un sistema que usa técnicas de control clásico.

Para demostrar la funcionalidad de la arquitectura del circuito propuesto, el circuito de control fue fabricado con la tecnología UMC 180nm CMOS. El *layout* y la fotografía del sistema se muestran en la Figura 10. El área del circuito integrado fue de 0.06 mm².

El circuito fabricado fue probado con señales escalón introducidas en V_{sp} (ver Figura 2) y como señal de

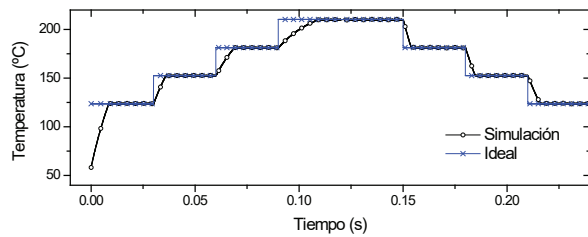


Figura 8. Respuesta del circuito de control bajo diferentes niveles de referencia de entrada

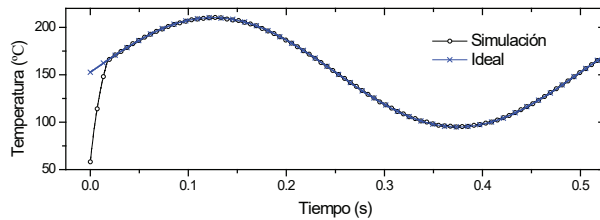


Figura 9. Respuesta del circuito de control a una entrada con forma de onda periódica

Tabla 1. Comparación de los circuitos de control de temperatura

Parámetro	Circuito propuesto	[14] On/off	[15] Control PID
Tecnología	180nm	-	800nm
VDD	1.8V y 3.3V	5V	5V y 15V
Resolución (simulado)	±1°C	±1°C	1°C
Resistencia del Heater	102-150Ω	50-100Ω	50-100Ω 310-800Ω
Consumo de potencia	~1.7mW	~2.18mW	-
Manejo de heaters con diferente potencia	Si	No	Si
Complejidad	Baja	Baja	Alta

salida fue monitoreado V_{amp} , cuyo valor representa la temperatura de operación deseada de acuerdo con la relación definida en la ecuación (1). La Figura 11 muestra la respuesta del sistema cuando V_{sp} cambia de 0.5V a 0.95V y la Figura 12 cuando la entrada cambia de 0.95 a 0.5V en ambos casos el tiempo de establecimiento fue de aproximadamente 45ms. De acuerdo con las relaciones definidas en las ecuaciones (1) y (4) el cambio producido corresponde a una variación de temperatura de 61 °C a 164 °C.

La funcionalidad del circuito de control se muestra en la Figura 13. El rango de tiempo mostrado corresponde al estado estacionario, cuando la resistencia del Heater ha llegado al valor deseado, después de la parte transitoria mostrada en las Figuras 11 y 12. La frecuencia del reloj se estableció a 3kHz con un ancho de pulso de 60%. Tal como se puede observar, cuando el voltaje de salida del amplificador de instrumentación V_{amp} es

menor que el voltaje de referencia V_{sp} , el circuito de control aplica al Heater, el voltaje máximo V_{DDH} (en VH) para calentar el sensor. Una vez que la temperatura del sensor sobrepasa el valor deseado ($V_{amo} > V_{sp}$) el circuito de control desconecta al Heater de V_{DDH} manteniendo de esta manera la temperatura del sensor alrededor del valor deseado. El sistema estableció la temperatura de operación del sensor en el valor deseado con un error de ± 5.4 °C. Este error es más alto que el obtenido en las simulaciones debido a que la frecuencia de reloj usado en la parte experimental fue de solo 3 kHz, mientras que en las simulaciones se usó un reloj de 10 kHz. Se empleó una frecuencia de reloj más bajo con el propósito de poder observar con mayor claridad el funcionamiento del sistema (mostrado en la Figura 13). Cabe destacar entonces que el error se reduce al aumentar la frecuencia del reloj, así como reduciendo el nivel de ruido de los voltajes de referencia.

a) Layout b) Fotografía del circuito integrado

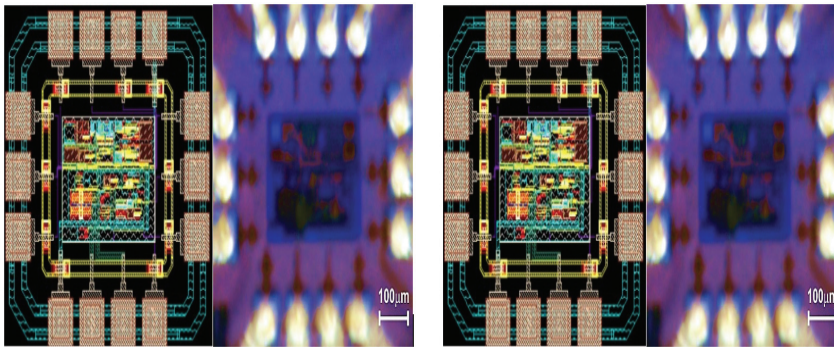


Figura 10. Implementación del circuito integrado

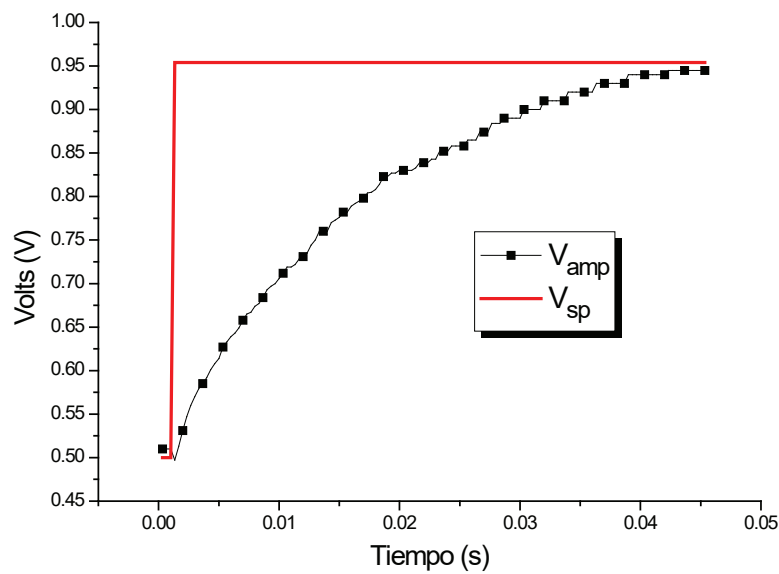


Figura 11. Respuesta experimental del circuito de control a un cambio del voltaje de entrada de 0.5 a 0.95V (correspondiente a un cambio de 61° a 164°C)

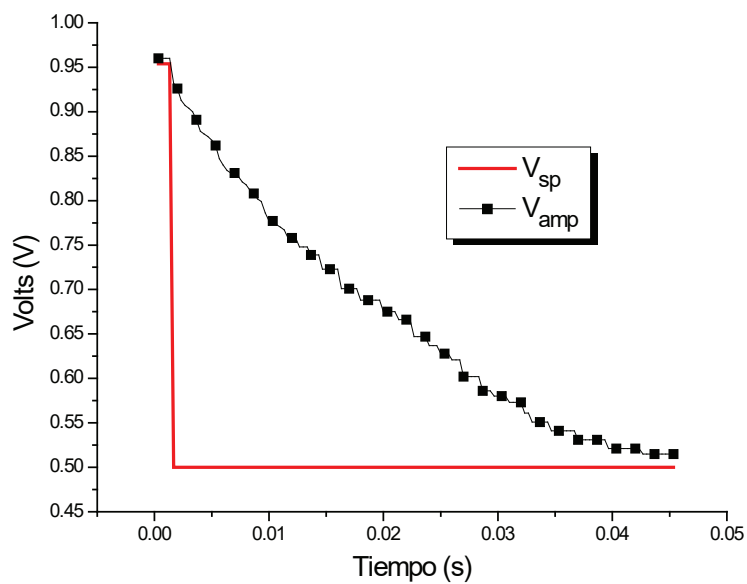


Figura 12. Respuesta experimental del circuito de control a un cambio del voltaje de entrada de 0.95V a 0.5V (correspondiente a un cambio de 164 a 61°C)

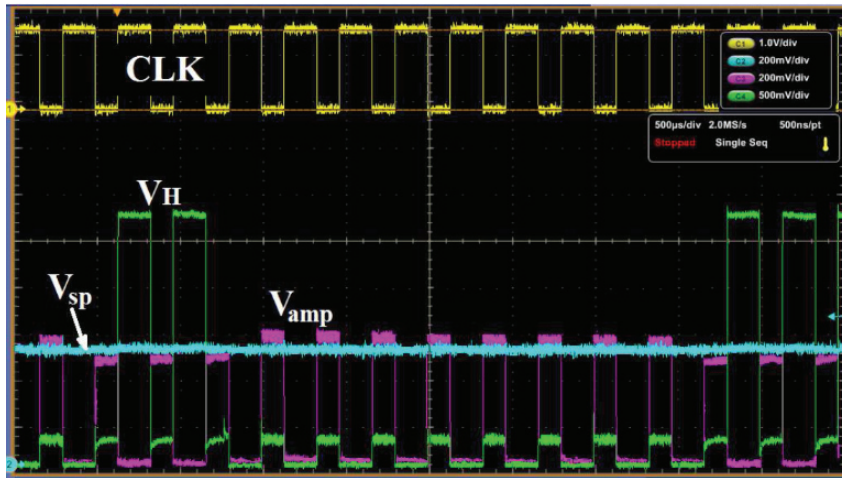


Figura 13. Respuesta experimental que muestra el modo de operación del circuito de control de temperatura: voltaje de set-point (V_{sp}), Voltaje de salida del amplificador de instrumentación (V_{amp}), Voltaje aplicado al *Heater* (V_H) y señal de reloj (CLK)

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un circuito de control on/off que utiliza la resistencia del propio calentador como sensor de temperatura. En contraste con otros esquemas propuestos en la literatura, el circuito propuesto adopta la simplicidad de un esquema de control on/off y adiciona la capacidad de manejar sensores de gas MOX con diferentes requerimientos de potencia al tener la flexibilidad para manejar dos niveles de voltaje; uno para los circuitos de acondicionamiento de señal, y otro exclusivo para la alimentación del *Heater*. Lo anterior abre la posibilidad de poder migrar a otras tecnologías de fabricación, con el único requerimiento de que la tecnología cuente con transistores de alto voltaje para manejar la potencia requerida por el *Heater*.

Por otra parte, se demostró que el circuito de control permite aplicar las técnicas de modulación de la temperatura de operación de los sensores MOX que han sido reportados en la literatura para la mejora de su selectividad: modulación por pulsos, generación de matrices virtuales de sensores mediante un solo sensor y modulación de la temperatura siguiendo una determinada forma de onda periódica, entre otras. El control en la resistencia del calentador permitió obtener un error inferior a 0.2Ω , que corresponde a un error en la temperatura de operación de aproximadamente 1°C .

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACyT por el apoyo recibido a través de la beca doctorado 212441 y el proyecto de investigación CB-SEP-2008-01-99901188.

REFERENCIAS

- Bermak, A., Belhouari, S., Shi, M., Martínez, D. (2005). Pattern recognition techniques for odor discrimination in gas sensor array. En *Encyclopedia of Sensors*, E.C.D. Craig A. Grimes y M.V. Pishko, Eds. American Scientific Publishers.
- Bharat, S., Ashutosh, S., Jung-Sik, K. (2018). Recent advances on H2 sensor technologies based on MOX and FET devices: A review. *Sensors and Actuators B*, 262, pp. 758-770. Recuperado de <https://www.x-mol.com/paperRedirect/558360>
- Bota, S., Dieguez, A., Merino, J., Casanova, R., Samitier, J., Cané, C. (2004). A monolithic interface circuit for gas sensor arrays: Control and measurement. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 40(2), 175-184.
- Burgues, J. y Marco, S. (2018). Low power operation of temperature-modulated metal oxide semiconductor gas sensors. *Sensors*, 18, 339. <https://doi.org/10.3390/s18020339>
- Casanova, R., Merino, J.L., Dieguez, Á., Bota, S.A., Samitier, J. (2004). A mixed-mode temperatura control circuit for gas sensors. En *ISCAS (4)'04*, pp. 896-909.
- Dongmin, G., Zhang, D., Li, N., Zhang, L., Yang, J. (2010). A novel breath analysis system based on electronic olfaction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57(11). <https://doi.org/10.1109/TBME.2010.2055864>
- Falconi, C. Systematic design of micro-resistors for temperature control by quasi-simultaneous heating and temperature sensing. *Sensors and Actuators B*, 179, pp. 336-346, 2013.
- Falconi, C. y Fratini, M. (2008). CMOS microsystems temperature control. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 129, 59-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2007.07.071>
- Gardner, J.W., Prasanta, K.G., Florin, U., James, A. (2010). Covington. CMOS Interfacing for Integrated Gas Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 10(12).

- Ishihara, F., Sheikh, F., Nikolic, B. (2004). Level conversion for dual supply systems. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. *IEEE Transactions On*, 12(2), 185-195. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2003.821548>
- Jendritzky G. (1993). *The atmospheric environment-an introduction. Experientia* 49. Basel/Switzerland: Birkhauser Verlag.
- Kang, J. et al. (2017). Temperature control of heater using Pt thin film temperature sensor embedded in micro gas sensor, *Micro and Nano Systems Letters*, Vol. 5, pp. 26. <https://doi.org/10.1186/s40486-017-0060-z>
- Korotcenkov, G. (2007). Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice? *Materials Science and Engineering: B*, 139(1), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.01.044>
- Lee, A.P. y Reedy, B.J. (1999). Temperature modulation in semiconductor gas sensing. *Sensors and Actuators B*, 60, 35-42. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00241-5](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00241-5)
- Mo, Y., Okawa, Y., Inoue K., Natukawa K. (2012). Low-voltage and low-power optimization of micro-heater and its on-chip drive circuitry for gas sensor array. *Sensors and Actuators A: Physical*, 100, 94-101. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(02\)00145-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00145-0)
- Ponzoni, A. et al. (2017). Metal oxide gas sensors, a survey of selectivity issues addressed at the SENSOR Lab, Brescia (Italy). *Sensors* (Basel, Switzerland), 17(4), 714. <https://dx.doi.org/10.3390/s17040714>
- Seiyama, T., Kato, A., Fujiishi, K., Nagatani, M. (1962). A new detector for gaseous components using semiconductive thin films. *Analytical Chemistry*, 34(11), 1502-1503.
- Sun, Y., Huang, X., Meng, F., Liu, J. (2004). Study of influencing factors of dynamic measurements based on SnO₂ gas sensor. *Sensors*, 4(6), 95-104. <https://doi.org/10.3390/s40670095>