

## DESARROLLO DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS PARA MEDICIÓN DE pH EMPLEANDO SENSORES ISFET (ION SENSITIVE FIELD EFFECT TRANSISTOR)

Jiménez Vázquez Donaciano<sup>1</sup>, Valdés Rodríguez Ofelia Andrea<sup>2</sup>, Muñoz Gamboa Caupolicán<sup>1</sup>

Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa<sup>1</sup>,

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Área de Ingeniería Biomédica

Av. Sn Rafael Atlixco 186 Col Vicentina. C.P. 09340 México D.F, Colegio de Veracruz<sup>2</sup> Carrillo Puerto 26,  
Xalapa, Ver. CP 91000

tel +55 58044630 ext 1216, Fax +55 58044631.

[jvd@xanum.uam.mx](mailto:jvd@xanum.uam.mx); [cmg@xanum.uam.mx](mailto:cmg@xanum.uam.mx)

### RESUMEN

En este documento se presentan algunos circuitos básicos que pueden ser empleados como sensores de pH de estado sólido llamados ISFET. El propósito es mostrar la sencillez de los mismos. Los equipos de medición convencionales de pH suelen ser bastante robustos y voluminosos debido a que el sensor mismo es una ampolla de vidrio donde están el sensor de pH y el sensor de referencia. Estos sensores deben guardarse en una solución líquida para permanecer húmedos y listos para la medición. El sensor ISFET es un dispositivo que debe almacenarse seco, aunque el de referencia deberá almacenarse por algún tiempo húmedo, según la recomendación del fabricante. El sensor ISFET contiene los mismos elementos que el sensor convencional que se encuentra dentro de la ampolla de vidrio y ambos tienen resultados similares. Palabras clave: ISFET, Sensor de Referencia, Sensores de pH, Medición de pH.

### ABSTRACT

This paper presents some basic circuits that can be used as pH sensors called solid state ISFET. The purpose is to show the simplicity of them. The conventional pH measurement equipment's are pretty sturdy and bulky because the sensor itself is a glass bulb where the pH sensor and the reference sensor are contained. These sensors should be stored in a liquid solution to remain moist and ready for measurement. The ISFET based sensor is a device that must be stored dry, although the reference must be stored for some time wet as recommended by the manufacturer. The ISFET sensor contains the same elements as found in the conventional glass bulb sensor and both have the similar performance.

**Keywords:** ISFET sensor, reference, pH sensors, Measurement of pH.

### 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los avances en la electrónica se han visto en todas partes, del empleo de los populares BJT en los circuitos electrónicos hasta los últimos IGBT en los circuitos de potencia, El caso de los MOSFET ahora atrae la atención puesto que su utilidad no es únicamente en los circuitos electrónicos, sus variantes son hoy empleados en sensores que aprovechando la ausencia de corriente de la Compuerta (*Gate*), pueden ser activados por una cantidad de voltaje específico en la misma. Los sensores ISFET (Transistor de Efecto de Campo Sensible a Iones) tiene aplicaciones para determinar el pH,

actualmente la medición de pH en los líquidos se realiza con un sensor de vidrio donde se incluyen dos electrodos, uno de ellos es denominado Electrodo de referencia, el segundo electrodo cuenta con una membrana, que para el caso del pH es sensible al ión Hidrógeno, esto hace que un medidor de pH sea robusto y que la circuitería electrónica sea de mediana complejidad. Un ISFET tiene un comportamiento similar a un MOSFET, en la figura 1 se muestran las dos estructuras en donde el MOSFET se muestra en a) y en b) se tiene la estructura del ISFET, obsérvese en este caso un electrodo de referencia.

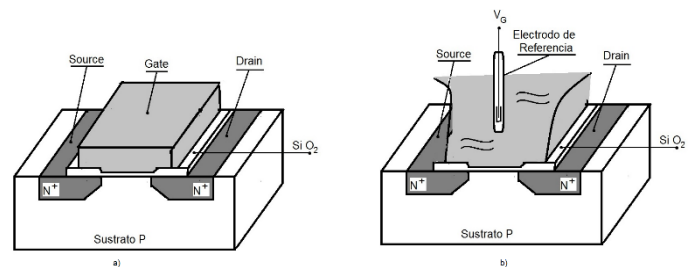


Figura 1.- Estructuras a).MOSFET y b).ISFET

El circuito característico de polarización del MOSFET se basa en la aplicación de un voltaje en la compuerta a) (*Gate*). Las curvas características de los MOSFET muestran la tendencia a incrementar la corriente  $I_D$  por el respectivo aumento del voltaje de  $V_{GS}$  b). Una curva característica es mostrada junto con el circuito de polarización en la figura 2.

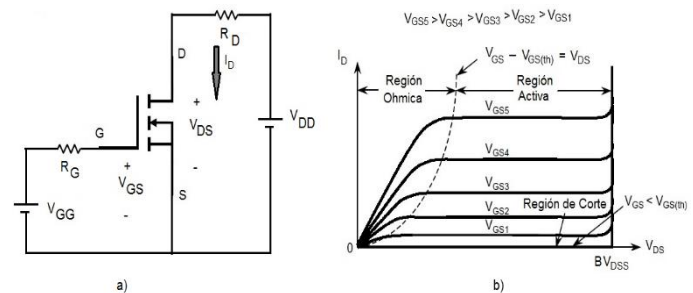


Figura 2.- Circuito de Polarización del MOSFET a) y su curva característica b).

El ISFET es, de hecho, nada más que un MOSFET con la conexión de Compuerta separada del chip en forma de un electrodo de referencia insertada en una solución acuosa que está en contacto con el óxido de puerta, así como se muestra en la figura 1. Por esto mismo, la mayoría de las referencias bibliográficas sobre el mecanismo de operación del ISFET comienzan con el de la descripción teórica de un MOSFET [1][6], de aquí que para un ISFET la ecuación que describe sea:

$$I_D = C_{ox}\mu \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2 \right] \quad (1)$$

Donde  $C_{ox}$  es la capacitancia formada por el óxido de la compuerta por unidad de área,  $W$  el ancho del canal y  $L$  la longitud del mismo. El parámetro  $V_T$  es llamado *Voltaje de Umbral*, este voltaje es propiamente el valor en el cual el MOSFET enciende o inicia la conducción.

A diferencia de este, el ISFET no posee una compuerta metalizada y el Óxido de Silicio ( $SiO_2$ ) que funciona como dieléctrico en el MOSFET, se expone directamente a la solución acuosa, entonces la medición se realiza modulando el canal del ISFET a través de la diferencia de voltaje que se establece entre la compuerta y la solución acuosa a medir su pH, es decir que la proporción de la corriente del *Drain* es una función del pH de la solución.

El dieléctrico  $SiO_2$ , utilizado en la construcción del MOSFET, no es la mejor elección para el empleo en los ISFET ya que parte de su funcionamiento depende de la respuesta del  $SiO_2$  al pH; en este caso se utilizan  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$  y  $Ta_2O_5$  que tienen mejor respuesta química para el pH de las soluciones [2] [3].

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Sensores y características.

En el mercado existen pocas variedades de sensores ISFET para pH, como es bien conocido las características de los transistores varían de tipo a tipo, de número a número y de lote a lote de fabricación, sin embargo todos caen en un solo tipo de curva, estas variaciones son de unos cuantos mA en las corrientes correspondientes. En nuestro caso serían pequeñas variaciones en las corrientes de *Drain* de un tipo a otro tipo, entonces los cambios esperados en las respuestas de cada uno de ellos serían mínimas y se podrían realizar ajustes para las mediciones correctas de pH. [4]

Uno de los sensores ISFET empleados se manufactura en Malasia, el dieléctrico de la compuerta se fabrica con nitruro de silicio ( $Si_3N_4$ ), este se utiliza como una capa sensible a iones de Hidrógeno ( $H^+$ ). El proceso de funcionamiento del ISFET para la medición de pH comienza con el cambio en la diferencia de voltaje por la presencia de los iones de Hidrogeno en la solución acuosa, esta sola presencia provoca que haya un incremento de corriente en el *Drain* del ISFET y que a su vez exista una diferencia de voltaje en el circuito del *Drain*.

Para utilizar sensores ISFET es necesario un electrodo de referencia con el fin de completar el circuito eléctrico.

La figura 3 muestra al ISFET mencionado y al Electrodo de referencia. El ISFET es relativamente pequeño y puede emplearse en cualquier tipo de líquido. El de Referencia está compuesto de un tubo de vidrio de 5mm de diámetro, contiene una membrana porosa al final de mismo que está hecha de cerámica de alúmina, el electrolito interno es de Cloruro de potasio (KCl) y el alambre metálico interno es de Plata/Cloruro de Plata (Ag/AgCl).



Figura 3 ISFET a la izquierda y Electrodo de Referencia a la derecha.

### 2.2. Metodología e Instrumentación Electrónica.

El circuito básico de medición es mostrado en la figura 4, el voltaje de referencia  $V_{REF}$  es un voltaje continuo de DC, al hacerse diversas pruebas y consultando con las características del fabricante, este deberá estar fijo a un voltaje bajo debido a que el ISFET no requiere voltajes mayores para su desempeño, dicho voltaje tiene un valor de 2 Volts y se asegura este valor con un diodo zener.

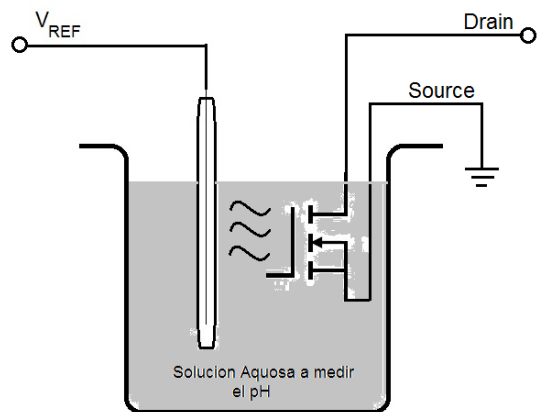


Figura 4.-Circuito básico de medición de pH

De este simple circuito la compuerta del ISFET asociada con el electrodo de referencia determina el cambio de voltaje que cambiará con la solución de pH, determinando una mayor o menor corriente  $I_D$  proporcional al valor de pH de la solución. Para el caso del sensor ISFET, el fabricante menciona que tiene una resolución mayor a 45 mV/pH y es apto para medir valores de 1 hasta 14.

El diagrama a bloques de los diseños de los circuitos electrónicos se muestra en la figura 5, ahí es mostrado el sensor de referencia, el ISFET, los circuitos de acoplamiento de los mismos y los circuitos de amplificación, para dichos circuitos se construyen con Amplificadores Operacionales, en este caso se emplearon los MCP6404 de Microchip™ [5], pero pueden emplearse el simple LM741 de *National Semiconductor*. Para las fuentes de corriente constantes existen circuitos integrados que operan de ese modo, los tipos son REF200U, este tipo se utiliza para que las corrientes del *Drain* sean estables para las mediciones realizadas.

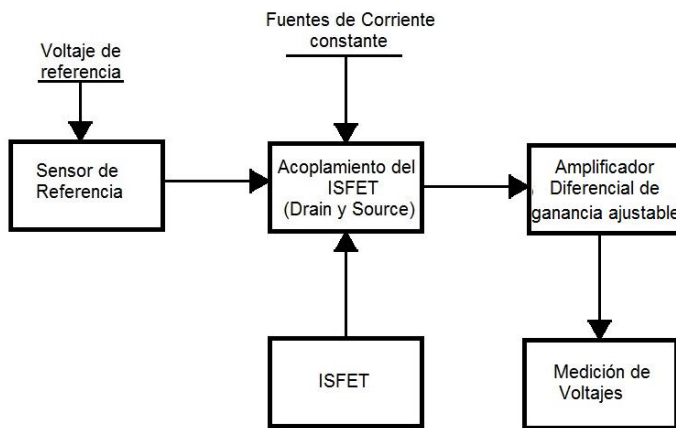


Figura 5 Diagrama a Bloques de los circuitos electrónicos.

Para el amplificador diferencial de ganancia ajustable puede emplearse el mismo tipo de operacional, no se hace necesario cambiar de tipo de circuito.

Las salidas de voltaje proporcionadas por este amplificador pueden medirse con cualquier instrumento, en nuestro caso se empleó un multímetro digital, pero existen múltiples opciones como el empleo de un convertidor A/D y mostrar los datos en una pantalla LCD, también el empleo de un PIC, microprocesador, etc.

Otro de los ISFET utilizados se muestra en la figura 6 junto al mismo sensor de referencia que en el caso anterior. Este ISFET está contenido en una placa de circuito integrado y en la punta del mismo puede verse el semiconductor, en el caso anterior la pequeña ventana del ISFET es mucho más corta y por lo tanto de más fácil manejo. Este nuevo dispositivo es más rígido y está cubierto con una capa de resina dejando al descubierto la membrana que cubre al semiconductor.



Figura 6.- ISFET y Electrodo de Referencia.

La figura 7 muestra la circuitería resultante para los dos casos, como la resolución cambia de ISFET a ISFET, habrá que realizar cambios en el amplificador diferencial.

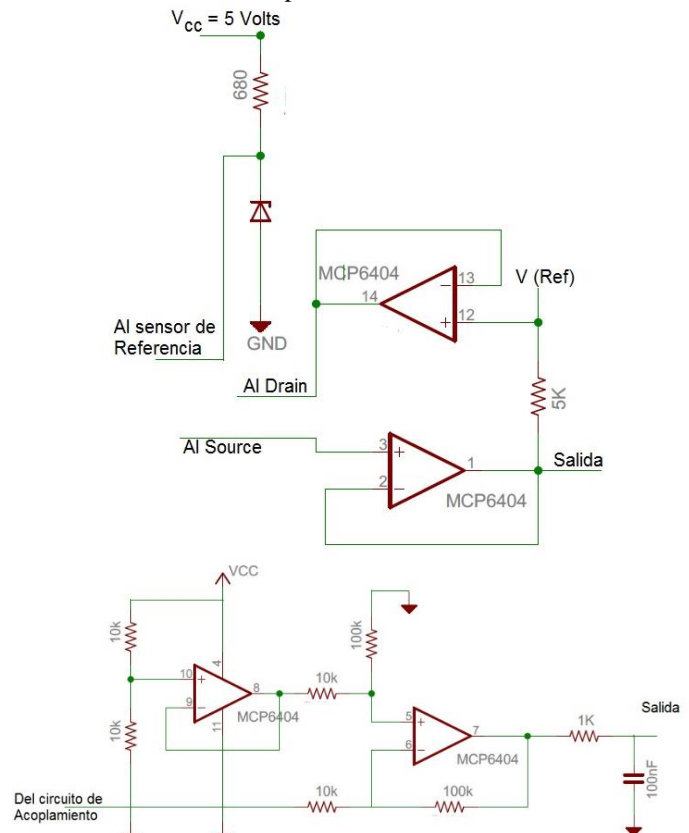


Figura 7 Circuitería resultante.



El primer amplificador provee un voltaje de referencia y que el segundo de ellos resta al voltaje proporcionado por la etapa de acoplamiento anterior, que a su vez proporciona una ganancia de diez, siendo ésta fácil de modificar de ISFET a ISFET.

### 3. RESULTADOS.

En las mediciones de los dos casos se emplearon soluciones Buffer de 4, 7 y 10, aunque funcionan hasta valores de 14 de pH. Empleando el mismo circuito los resultados arrojaron la curva mostrada en la figura 8, para el ISFET de Malasia y el sensor de referencia.

Con los valores resistivos mostrados en el circuito de la figura 7, el ISFET mostro un valor de ganancia de voltaje muy grande, tanto que llegó a saturarse el circuito amplificador. Tomando en cuenta que el voltaje de alimentación de todo el sistema es de 5 Volts, se tuvo que disminuir la ganancia del mismo para mantenerlo dentro del margen resultando los valores mostrados en la gráfica.

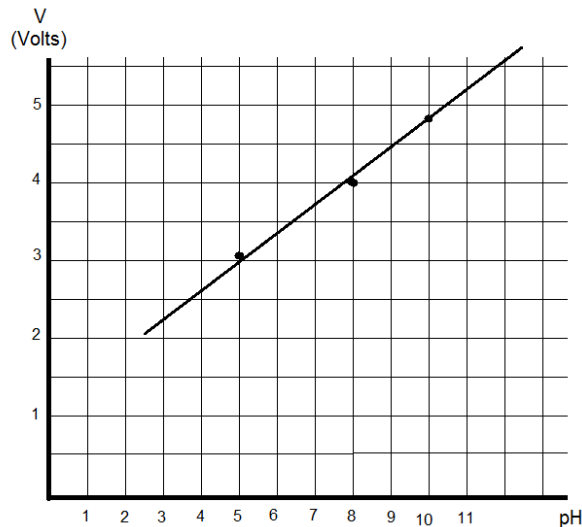


Figura 8 Resultados del primer ISFET.

La figura 9 muestra los resultados obtenidos con el segundo ISFET. Obsérvese ahora los valores de voltaje obtenidos en este ISFET y con el mismo sensor de referencia, por esta situación mencionamos que el amplificador diferencial tendría que ser de ganancia ajustable debido a los tipos de ISFET a emplear.

Es notorio que el comportamiento de los sensores es prácticamente lineal dentro del rango 4-10 de pH. Como es conocido los valores de pH 4 pertenecen a ácido y 10 alcalino, un pH 7 pertenece a un valor neutro, este desarrollo se utilizara para medir los valores de pH del agua potable, las normas de calidad del agua potable exigen valores de 6.5 a 8.5 de pH [7]. Un valor superior o inferior estará fuera de la norma, como este tipo de sensores abarca este rango las pruebas se restringieron a estos valores.

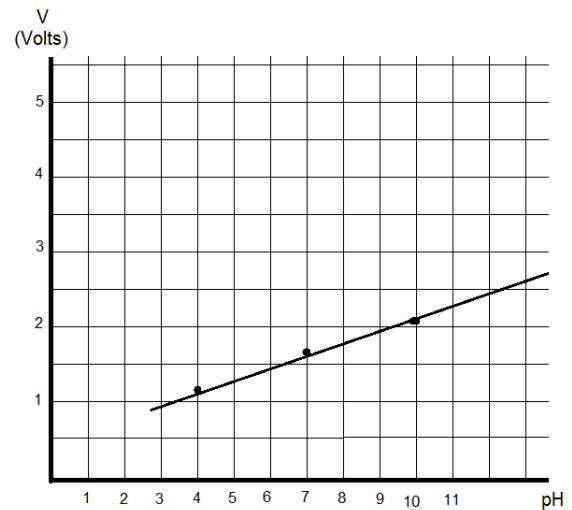


Figura 9 Resultados del segundo ISFET

### 4. CONCLUSIONES.

La tendencia a utilizar hoy en día los semiconductores para la medición de pH ha surgido para tener sistemas portables y confiables. Los desarrollos electrónicos mostrados en este trabajo tienen alta portabilidad del mismo, empleando cualquier tipo de ISFET (aunque no existen muchas alternativas) y realizando solo ajustes mínimos en la ganancia del sistema. Cabe hacer notar que para cada medición, se deberá secar completamente el sensor de referencia y el ISFET. Estas mediciones se realizaron a temperatura ambiente debido a que algunos presentan inestabilidad con respecto a la temperatura, aunque en pruebas realizadas con agua, no se observa esta inestabilidad con ninguno de los dos, también se observó que para obtener estas mediciones se tuvo que esperar un tiempo corto de aproximadamente 30 seg para que las lecturas se estabilizaran.

### 5. REFERENCIAS.

- [1] P. Bergveld, Thirty years of ISFETOLOGY What happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years, Sensors and Actuators B 88 Chemical, pages 1-20
- [2] M.J. Madou and S.R. Morrison, Chemical sensing with solid state devices., Academic Press, 1988.
- [3] Sergio Martinoia a, Giuseppe Massobrio a, Leandro Lorenzelli. Modeling ISFET microsensor and ISFET-based microsystems: a review. Sensors and Actuators. B 105 Chemical, pages 14-27
- [4] Piet Bergveld. Development, Operation, and Application of the Ion-Sensitive Field-Effect Transistor as a Tool for Electrophysiology. IEEE Transactions On Biomedical Engineering, Vol. BME-19, No. 5, September 1972. Pp 342-351
- [5] Microchip Technology. [www.microchip.com](http://www.microchip.com).
- [6] Jacinto Paredes, Salvador Hidalgo, Francisco Berta, Juan Fernandez, Jose Rebollo, and Jose Millan. A Steady-State VDMOS Transistor Model. IEEE Transactions On Electron Devices. Vol. 39, No. 3, March 1992. pp712-719
- [7] Normas Oficiales para la calidad del agua en México. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994,