

## Instrumento Virtual de Bajo Coste para la Caracterización y Uso Simultáneo de hasta Diez Sensores Químicos del Tipo ISFET: Hardware

Enrique E. Valdés Zaldivar<sup>1</sup>, Cecilia Jiménez Jorquera<sup>2</sup>, Ernesto Alpizar Arteaga<sup>1</sup>, Juan C. Viera<sup>3</sup>, Carlos Domínguez Horna<sup>2</sup>, Juan C. Antón<sup>3</sup>

Centro de Investigaciones en Microelectrónica<sup>1</sup> (CIME-ISPJAE), Ciudad Habana, Cuba  
 Instituto Microelectrónica Barcelona<sup>2</sup> (IMB-CNM, CSIC), Campus UAB, 08193 Bellaterra, España.  
 Área de Tecnología Electrónica<sup>3</sup> (Universidad de Oviedo), Campus Viesques, 33204 Gijón, España.  
 enrique.valdes@electronica.cujae.edu.cu, cecilia.jimenez@imb-cnm.csic.es, viera@uniovi.es

### Abstract

En este trabajo se propone el hardware de una herramienta muy útil para el análisis de soluciones químicas, la cual permitirá caracterizar y utilizar simultáneamente hasta diez ISFETs sensibles a diversos tipos de iones. Se presenta un sistema basado en la instrumentación virtual formado por los siguientes módulos: Módulo de generación del Vgs, Módulo de generación del Vds, Conmutadores para selección del ISFET a polarizar, Circuito acondicionador de señal para sensor de temperatura y Fuente de alimentación. El uso de una tarjeta de adquisición de datos de bajo coste, permite implementar el instrumento virtual con un ahorro que oscila entre 75 % y el 90 % del presupuesto destinado a la factura de la tarjeta de adquisición de datos. Además, dado el hecho de que la tarjeta es externa al PC ya que se comunica mediante el puerto USB, se puede plantear que la portabilidad del instrumento virtual se incrementa. Lo anterior permite el uso del sistema de una forma fácil en cualquier PC con interfaz USB y configurado con el software necesario.

**Keywords:** ISFET Instrumentation, Virtual Instrumentation, Multisensor System

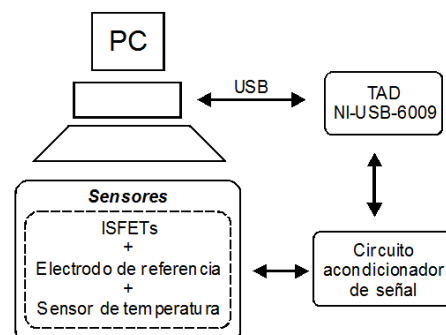
### Introducción

El transistor de efecto de campo sensible a iones (ion sensitive field effect transistor, ISFET), es un transductor electroquímico de estado sólido desarrollado en base a la tecnología microelectrónica de fabricación de circuitos integrados [1, 2]. Este sensor permite medir la concentración de un determinado tipo de ión presente en la solución en la cual se encuentra sumergido. Actualmente resulta atractivo disponer de un sistema de bajo coste que permita utilizar simultáneamente varios ISFETs sensibles a diferentes tipos de iones, constituyendo una primera aproximación al hardware de sistema multisensor.

La medida simultánea de varios sensores obliga a flexibilizar al máximo la instrumentación para que cada sensor pueda operar bajo los parámetros óptimos con el fin de aumentar la relación S/R y mejorar la resolución. La utilización de instrumentación discreta obliga a utilizar tantos instrumentos de medida como sensores [3, 4]. Por lo tanto, resulta de gran interés obtener un sistema basado en la instrumentación virtual que suministre de forma

rápida una señal fiable proveniente de múltiples sensores.

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema basado en la instrumentación virtual utilizando la tarjeta de adquisición de datos multifunción y de bajo coste NI-USB-6009 de National Instruments. El sistema brinda la posibilidad de caracterizar o utilizar simultáneamente hasta diez sensores químicos del tipo ISFET. La figura 1 muestra el diagrama en bloques del instrumento virtual diseñado.



**Figura 1.** Diagrama en bloques del sistema multisensor con ISFETs.

Como se puede apreciar, el sistema está formado por un PC (microcomputadora personal), la tarjeta de adquisición de datos (TAD) de bajo coste NI-USB-6009, un circuito acondicionador de señal (CAS) y el módulo de los sensores.

### Tarjeta de Adquisición de Datos: NIUSB6009

El diseño de una instrumentación con enfoque de sistema donde un PC constituye el elemento principal y donde se utiliza una tarjeta de adquisición de datos para garantizar la interfaz con el medio, nos permite plantear que nos encontramos ante un instrumento virtual. Por medio del software se garantizan las prestaciones previstas para el sistema.

La NIUSB6009 [5] es la tarjeta de adquisición de datos utilizada en este trabajo. Esta tarjeta, fabricada y comercializada por la empresa National Instruments, presenta dos salidas analógicas, doce entradas/salidas digitales, un contador de 32 bits y entradas analógicas. Las entradas analógicas se pueden configurar como cuatro entradas diferenciales u ocho entradas referenciadas a tierra. Además esta tarjeta dispone de una referencia de voltaje de 2.5 Volts. La gran mayoría de estos recursos son utilizados en la aplicación presentada en esta contribución. Esta TAD es externa al PC ya que se comunica con este mediante la interfaz USB.

### Interfaz TAD - CAS - Sensores

La figura 2 muestra el diagrama en bloques del circuito acondicionador de señal, su conexión con el módulo de sensores, así como los recursos utilizados de la tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6009.

De la figura 2 se puede notar como de la tarjeta de adquisición de datos (TAD) se utilizan dos salidas analógicas, once salidas digitales, tres entradas analógicas configuradas en modo diferencial, dos entradas analógicas configuradas en modo single ended referido a tierra y la referencia de voltaje de 2.5 Volts.

El módulo de sensores está formado por los diez ISFETs, un electrodo de referencia, la sonda térmica para medir la temperatura de la solución y el recipiente que contiene la solución cuya concentración de iones se desea conocer.

El circuito acondicionador de señal está formado por los siguientes bloques:

1. Módulo de generación del  $V_{GS}$ .
2. Módulo de generación del  $V_{DS}$ .
3. CAS para sensor de temperatura.
4. Conmutadores para selección de ISFET.
5. Fuente de alimentación.

De forma resumida, el circuito acondicionador de señal permite aplicar niveles de DC en el electrodo de referencia y en el terminal de drenador del ISFET seleccionado por las salidas digitales. Forman parte de los módulos de generación, dos convertidores I-V con entradas flotantes que facilitan la medición de la corriente de fuga por la puerta y la corriente de drenador para el ISFET seleccionado. El bloque de conmutadores analógicos, controlado por las salidas digitales de la TAD, permite seleccionar el terminal de drenador del ISFET al cual se le entregará un nivel de DC que impone la salida analógica uno y que constituye el potencial de drenador. Se ha incluido un sensor de temperatura, con el objetivo de poder realizar correcciones térmicas a la señal de respuesta de cada ISFET. También forma parte del módulo acondicionador de señal, una fuente de alimentación que proporciona la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento adecuado de todos los circuitos electrónicos.

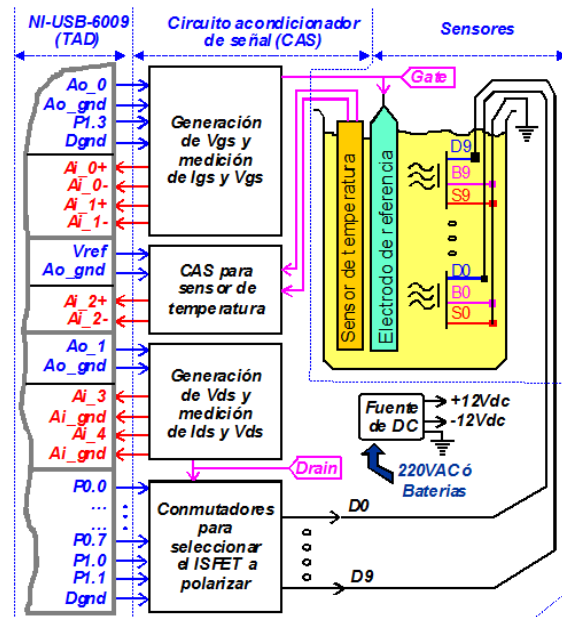


Figura 2. Diagrama en bloques del circuito acondicionador de señal.

### Módulo para la generación del $V_{GS}$

La figura 3 muestra el esquema eléctrico del módulo que permite la generación del potencial de puerta ( $V_{GS}$ ), así como la medición de la corriente de fuga por la puerta ( $I_{GS}$ ) y del  $V_{GS}$ .

Utilizando la salida analógica cero de la TAD, una salida digital (P1.3), dos amplificadores operacionales del tipo TL2064, dos relays del tipo HFE721C0510 y el amplificador de instrumentación INA118 se logra generar un voltaje de DC de -5 Volts a +5 Volts. De este modo se logra convertir el rango

unipolar positivo de la salida analógica cero en un rango bipolar.

El INA118 se utiliza con ganancia unitaria. Cuando se genera un cero lógico en la salida digital **P1.3**, el terminal **+Vin** del amplificador de instrumentación queda conectado a la salida analógica cero y el terminal **-Vin** queda conectado a tierra. En este caso, **Vout** puede variar de 0 a +5 Volts. De manera similar, cuando se genera un uno lógico en la salida digital **P1.3**, el terminal **+Vin** del INA118 queda conectado a tierra y el terminal **-Vin** queda conectado a la salida analógica cero. En este caso, **Vout** puede variar de -5 Volts a 0 Volts.

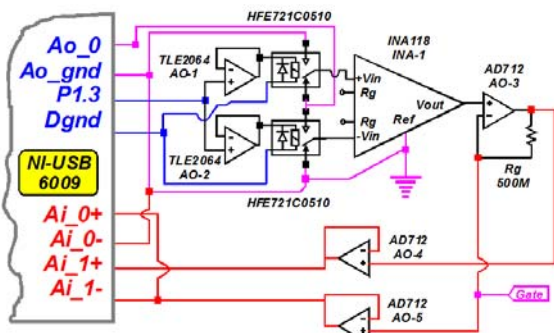


Figura 3. Esquema eléctrico del módulo para la generación del potencial de puerta ( $V_{GS}$ ).

El amplificador operacional AO-3 constituye un convertidor I-V con entradas flotantes [6], el cual garantiza que el potencial de DC en el nodo "Gate" coincida con el voltaje en el nodo **Vout** del INA118. Este voltaje se aplica al electrodo de referencia sumergido en la solución y constituye el potencial de puerta del ISFET seleccionado por el módulo de conmutadores. La otra función de AO-3 consiste en generar una caída de tensión en el resistor  $R_g$  proporcional a la corriente de fuga por la puerta ( $I_{GS}$ ).

El potencial de puerta  $V_{GS}$  es medido por la entrada analógica cero configurada en modo diferencial. La entrada analógica uno configurada también en modo diferencial garantiza medir un voltaje proporcional a la corriente de fuga por la puerta ( $I_{GS}$ ).

Valores de  $I_{GS}$  superior a los 5 nA determinan la existencia de una corriente de fuga por la puerta del ISFET. Debido a esto, se utilizan tres amplificadores operacionales (AO-3, AO-4 y AO-5) del tipo AD712 cuya corriente de bias en las entradas está en el orden de las decenas de pA. De este modo se garantiza un aporte despreciable a la  $I_{GS}$ , de las corrientes de bias asociadas a las entradas de estos amplificadores operacionales.

## Módulo para la generación del $V_{DS}$

La figura 4 muestra el esquema eléctrico del módulo que permite la generación del potencial de drenador ( $V_{DS}$ ), así como la medición de la corriente de drenador ( $I_{DS}$ ) y del  $V_{DS}$ .

El amplificador operacional AO-6 constituye un convertidor I-V con entradas flotantes, el cual garantiza que el potencial de DC entregado por la salida analógica uno coincida con el voltaje en el nodo "Drain". Este voltaje se entrega al módulo de conmutadores y constituye el potencial de drenador para el ISFET seleccionado por este módulo. La otra función de AO-6 consiste en generar una caída de tensión en el resistor  $R_d$  proporcional a la corriente de drenador ( $I_{DS}$ ).

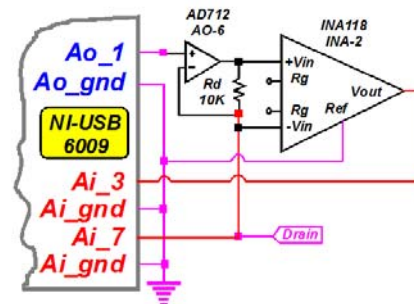


Figura 4. Esquema eléctrico del módulo para la generación del potencial de drenador ( $V_{DS}$ ).

El amplificador de instrumentación INA118 (INA-2), convierte la caída de voltaje diferencial en el resistor  $R_d$  en un voltaje referido a tierra, el cual es entregado a la entrada analógica tres de la TAD, configurada en modo single ended referido a tierra. De este modo se garantiza medir un voltaje proporcional a la corriente de drenador.

Utilizando la entrada analógica siete configurada en modo single ended referido a tierra se mide el potencial de drenador ( $V_{DS}$ ).

## Conmutadores para selección de ISFET

La figura 5 muestra el esquema eléctrico del bloque de conmutadores analógicos que determina a cual ISFET se le entregara el potencial de drenador suministrado por el módulo para la generación del  $V_{DS}$ .

Este módulo está formado por diez amplificadores operacionales del tipo TLE2064 y diez relays del tipo HFE721A0510. Los amplificadores operacionales funcionan como seguidores de voltaje, garantizando el accionamiento de cada relay por una salida digital de la TAD. En total se utilizan diez salidas digitales, las ocho líneas del puerto cero y las dos primeras líneas del puerto uno.

Este bloque desde el punto de vista funcional se asemeja a un demultiplexor analógico de una entrada y diez salidas. La entrada es el potencial de drenador y las diez salidas son los terminales de drenador asociados a cada uno de los diez ISFETs a caracterizar o a utilizar.

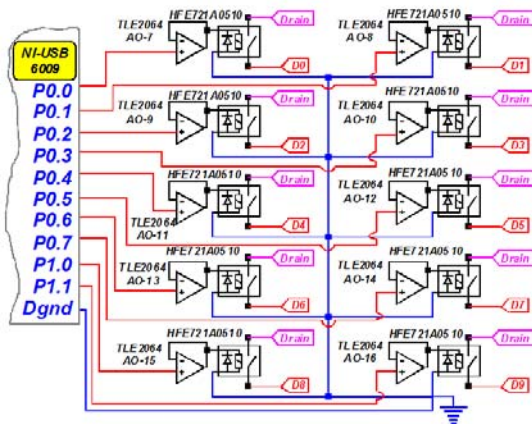


Figura 5. Esquema eléctrico del módulo de conmutadores analógicos.

En un instante dado solo se polariza a un ISFET. Al terminar con el mismo, se transfiere el potencial de drenador al siguiente sensor y así sucesivamente hasta volver a comenzar el ciclo de caracterización ó uso de cada uno de los diez ISFETs.

Se debe destacar, que el número máximo de sensores ISFETs que permite polarizar el instrumento virtual propuesto esta limitado por la cantidad de salidas digitales disponibles en la tarjeta de adquisición de datos. Si se desea incrementar el número de ISFETs a polarizar por el instrumento, se puede utilizar un decodificador binario con el objetivo de expandir las salidas digitales. Por ejemplo, si en este módulo de conmutadores se adiciona el decodificador binario (de 4 a 16) 74xx154, el instrumento pudiera manejar hasta 16 ISFETs usando solo cuatro salidas digitales de la tarjeta de adquisición de datos. En este caso quedarían 6 salidas digitales reservadas para otros usos. Si fuera de interés que el instrumento virtual trabaje con más de 16 ISFETs, se pudiera utilizar un dispositivo lógico programable configurado con la funcionalidad de un decodificador binario de 5 a 32 ó de 6 a 64.

### CAS para sensor de temperatura

Como sensor de temperatura se propone utilizar una resistencia de platino de valor igual a 100  $\Omega$  a 0  $^{\circ}\text{C}$  (PT100). LA figura 6 muestra el esquema eléctrico del circuito acondicionador de señal utilizado, en donde se utiliza una estructura tipo puente de Wheastone.

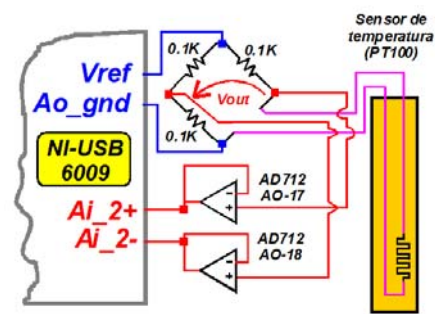


Figura 6. Esquema eléctrico del circuito acondicionador de señal asociado al sensor de temperatura.

El puente de Wheastone es polarizado con la referencia de voltaje de 2.5 Volts disponible en la TAD. El Puente está formado por tres resistores idénticos de resistencia igual a 100  $\Omega$ , más el resistor de platino sensible a la temperatura. La ecuación 1 especifica el comportamiento con la temperatura de la resistencia del sensor de temperatura (PT100). La ecuación 2 representa el comportamiento matemático del voltaje de salida ( $V_{OUT}$ ) en la estructura tipo puente.

$$R_{Temp} = R_0 * (1 + (0.0039083 * Temp)) \quad [1]$$

$$V_{OUT} = ((2.5 * R_{TEMP}) / (100 + R_{TEMP})) - 1.25 \quad [2]$$

Con este acondicionador de señal se logra una sensibilidad de 2.437 mV por cada grado centígrado de variación en la temperatura de la solución. Para 0  $^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{out}$  es de cero mV y para 99  $^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{out}$  es de 202.62 mV.

Se utilizan dos amplificadores operacionales del tipo AD712 como seguidores de voltaje para aislar el estructura puente de los terminales correspondientes a la entrada analógica dos de la TAD. Esta entrada analógica dos, utilizada para medir  $V_{out}$  se configura en modo diferencial en el rango de  $\pm 1$  Volts, donde se pueden medir variaciones de voltaje de 0.122 mV.

### Fuente de alimentación

Como fuente de alimentación se utiliza un módulo comercial que se alimenta con 100 -240 VAC y entrega dos voltajes de DC de alta estabilidad: +12Volts / 3.3A y -12 Volts / 3.3 A.

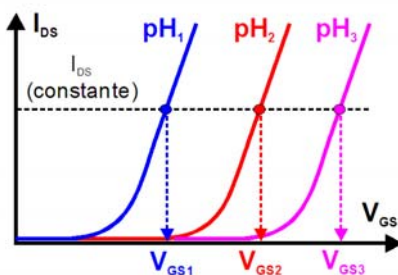
### Prestaciones del instrumento virtual

Actualmente se trabaja en el montaje y puesta a punto del hardware presentado en este trabajo. Por medio del software (LabVIEW de National Instruments) se garantizan las prestaciones del sistema, entre las que se destacan las siguientes:

1. Medición de parámetros eléctricos de cada ISFET tales como el voltaje umbral y la transconductancia.
2. Realización de calibrados químicos.
3. Caracterización y corrección de las derivas temporales.
4. Caracterización y corrección de las derivas térmicas.
5. Medición continua de la corriente de fuga por la puerta.
6. Medición de concentración de iones en solución tales como  $H^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $K^+$  y  $Ca^{2+}$ .

Con el instrumento virtual presentado los ISFETs se polarizan con  $V_{DS}$  e  $I_{DS}$  constantes, constituyendo el  $V_{GS}$  la respuesta de cada sensor. Para medir el potencial de puerta ( $V_{GS}$ ) se utiliza la entrada analógica cero configurada en modo diferencial la cual permite medir voltajes en el intervalo de -5V a +5V con 14 bits de resolución. Esto hace que la menor variación de voltaje a medir sea de 0.61 mV. Si asumimos una sensibilidad del ISFET de 55mV por unidad de pH, el sistema permitirá medir variaciones de hasta 0.011 unidades de pH.

Pudiera causar confusión el hecho de que el instrumento virtual genera el potencial de puerta ( $V_{GS}$ ) y que este mismo parámetro ( $V_{GS}$ ) sea la respuesta de cada ISFETs al estímulo químico. Lo anterior se puede aclarar si se toma en consideración, de que el software asociado al instrumento virtual varía continuamente el  $V_{GS}$  con el objetivo de mantener la  $I_{DS}$  constante. De este modo, el hecho de polarizar el ISFET con  $I_{DS}$  constante garantiza que la variación del  $V_{GS}$  sea igual a la variación del voltaje umbral del dispositivo sensor. Lo anterior se ilustra gráficamente en la figura 7.



**Figura 7.** Curvas  $I_{DS}$  vs.  $V_{GS}$  para tres valores diferentes de pH en un ISFET polarizado con  $I_{DS}$  y  $V_{DS}$  constantes, siendo el  $V_{GS}$  la respuesta eléctrica al estímulo químico (pH).

## Conclusiones

En este trabajo se propone el hardware de una herramienta muy útil para el análisis de soluciones químicas, la cual permitirá

caracterizar y utilizar simultáneamente hasta diez ISFETs sensibles a diversos tipos de iones.

El uso de una tarjeta de adquisición de datos de bajo coste, permite implementar el instrumento virtual con un ahorro que oscila entre 75 % y el 90 % del presupuesto destinado a la factura de la tarjeta de adquisición de datos. Además, dado el hecho de que la tarjeta es externa al PC ya que se comunica mediante el puerto USB, se puede plantear que la portabilidad del instrumento virtual se incrementa. Lo anterior permite el uso del sistema de una forma fácil en cualquier PC con interfaz USB y configurado con el software necesario.

Si se desea aumentar el número de ISFETs a polarizar por el instrumento virtual, se puede adicionar un decodificador binario al hardware propuesto, de este modo se garantiza la expansión de las salidas digitales de la tarjeta de adquisición de datos.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer la contribución del Programa Erasmus Mundus (Master in Mechatronic and Micro-Mechatronic System, EU4M) en la realización de este trabajo y en particular a los profesores Fritz J. Neff y Constantina Álvarez Peña, por el apoyo brindado.

También se debe destacar la contribución brindada por el proyecto RedSens del programa CYTED y en particular el apoyo de la coordinadora del proyecto, la Dra. Cecilia Jiménez Jorquera.

## References

- [1] P. Bergveld, Development of an Ion-Sensitive Solid-State Device for Neurophysiological measurements, *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, Volume BME-17, Number 1, January, 1970, pp. 70-71.
- [2] P. Bergveld and A. Sibbald, Analytical and Biomedical applications of Ion-Selective Field Effect Transistors, *Elsevier*, 1988.
- [3] P. Bergveld, Electronic circuit design principles for parameter control of ISFET and related devices, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 1979,17, pp. 655-661.
- [4] 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 (2003), pp. 1-20.
- [5] <http://www.ni.com>, "User guide and specifications: NI USB 6008 / 6009", National instruments, Agosto, 2010 .
- [6] E. Valdés and C. Dominguez, "Diseño de Convertidores I-V con Entradas Flotantes para la Caracterización de ISFET utilizando Instrumentación Virtual", V Ibersensors, Montevideo, Uruguay, 2006.