



# Potenciostato de Bajo Costo: Principios de Funcionamiento y Aplicación en Sensores de Hidrógeno

**Junior Gonzalo Hernández Espinosa**

*Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, Parque Tecnológico UIS  
Guatiguará, km 2 vía El Refugio, Piedecuesta, Colombia.*

*jhernandez@cddtdegas.com*

## **Resumen**

El presente artículo describe el funcionamiento de detectores de hidrógeno basados en principios electroquímicos que utilizan celdas de tres electrodos. Se ofrece un panorama general sobre el procedimiento para llevar a cabo la adquisición y tratamiento de las señales generadas por estos sensores, teniendo en cuenta las dos funcionalidades principales de un potenciostato: controlar la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo (WE) y el electrodo de referencia (RE) y leer el valor de la corriente que fluye a través de la celda. La señal de salida del potenciostato pasa a través de un microcontrolador que digitaliza y permite su posterior visualización y análisis. Este enfoque facilita la integración de detectores electroquímicos de hidrógeno para su uso en campo al reducir los costos y mejorar la portabilidad de estos dispositivos.

## **Abstract**

This article describes the operation of hydrogen detectors based on electrochemical principles that use three-electrode cells. It provides an overview of the procedure for acquiring and processing the signals generated by these sensors, taking into account the two main functions of a potentiostat: controlling the potential difference between the working electrode (WE) and the reference electrode (RE), and measuring the current flowing through the cell. The out signal by the potentiostat passes through a microcontroller that digitizes it, allowing for subsequent visualization and analysis. This approach facilitates the integration of electrochemical hydrogen detectors for field use by reducing costs and improving the portability of these devices.

# 1 Introducción

La Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT del Gas), de la mano del Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (Minciencias) busca dar un paso hacia la transición energética y descarbonización de la economía mediante el estudio del uso del hidrógeno gaseoso como un combustible limpio que puede ser utilizado parcialmente junto con el gas natural, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El hidrógeno como combustible es un portador de energía limpio, siendo el único producto de su combustión vapor de agua. Sin embargo, aunque es un elemento apropiado para mitigar el impacto ambiental, su incorporación y uso de forma segura supone nuevos retos. El hidrógeno es un gas incoloro e inodoro, y es también el elemento químico más liviano, con la molécula más pequeña. Su energía mínima de ignición en el aire a presión atmosférica es alrededor de 0.02 mJ, es decir, es de fácil ignición, por lo que es imprescindible el uso de métodos de detección acordes a los riesgos que representa [13, 7].

Hoy en día se reportan múltiples tecnologías para la detección de gases combustibles, las cuales se basan en principios como el efecto termoeléctrico, la conductividad térmica, la combustión catalítica, el uso de semiconductores de óxido-metal, los efectos ópticos y la electroquímica, entre otros. Los sensores electroquímicos basan su funcionamiento en la reacción química que ocurre en un electrodo sumergido en un electrolito cuando entra en contacto con el analito; éstos se pueden clasificar en amperométricos, potenciométricos y conductimétricos. Un sensor electroquímico amperométrico genera una corriente eléctrica cuya magnitud permite estimar la concentración de

hidrógeno, y se pueden encontrar en configuraciones con dos o tres electrodos según la aplicación [7, 9]. La medición de esta corriente se lleva a cabo utilizando un potencióstato, que es un dispositivo que permite leer la corriente generada por la celda, manteniendo un potencial eléctrico constante entre los electrodos. Sin embargo, el costo de un potencióstato comercial suele ser elevado y su aplicación en situaciones de campo es limitada, lo que crea la necesidad de explorar opciones más versátiles que permitan una lectura precisa de un detector.

El laboratorio de hidrógeno que se construirá en el marco del programa "Manejo integral del hidrógeno en mezcla con gas natural como medio para facilitar la transición energética hacia energías renovables", financiado por Minciencias, tiene como uno de sus objetivos estudiar las alternativas de bajo costo y bajo consumo energético para medición de hidrógeno disponibles actualmente en el mercado. Los detectores electroquímicos cumplen con estas características, ofreciendo uno de los enfoques más eficientes en términos de energía, combinados con un rendimiento analítico que incluye sensibilidad y selectividad a un costo relativamente bajo [3].

## 2 Fundamentos de operación de los potencióstatos

Los avances tecnológicos y el fácil acceso a dispositivos electrónicos y placas de desarrollo, junto con su bajo costo, han permitido el desarrollo de prototipos y dispositivos que se integran para facilitar y mejorar la calidad de vida de las personas. La literatura reporta equipos como termómetros, fotómetros, pH-metros y, por supuesto,

potenciostatos [2]. Para entender su funcionamiento, se buscó en la literatura contenido de interés sobre potenciostatos de bajo costo, utilizados en diferentes aplicaciones dentro del ámbito de la electroquímica.

Para entender el principio básico de operación de los potenciostatos, es fundamental conocer algunos conceptos clave, como las celdas de tres electrodos y los amplificadores operacionales. A continuación, se describe brevemente el funcionamiento de estos elementos.

## 2.1 Medición de concentración de hidrógeno

La señal de corriente dada por la celda electroquímica es de naturaleza analógica y de muy baja amplitud. Para obtener un valor de concentración a partir de ésta, debe ser amplificada y filtrada para luego ser convertida en un voltaje medible, este proceso es realizado por el potenciostato. Dada la baja magnitud de la señal, es importante minimizar el ruido eléctrico, mediante estrategias como el uso de filtros de paso bajo, eliminando ruido de altas

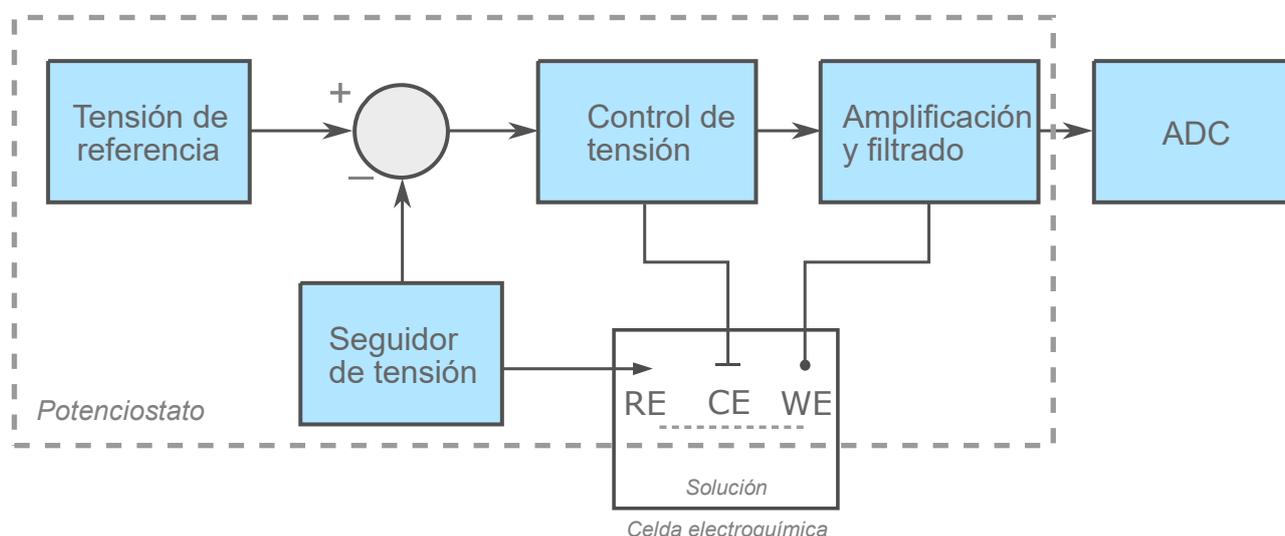
frecuencias, la implementación de escudos o apantallamientos, y el diseño de circuitos impresos con pistas cortas y planos de tierra adecuados.

Posterior al potenciostato, la señal ingresa a un conversor analógico digital (ADC) integrado en un microcontrolador donde la señal es digitalizada, permitiendo su procesamiento basado en las curvas de respuesta del elemento de detección, obteniendo valores en unidades de concentración reales. Los bloques de comparación, control de tensión y amplificación de corriente está integrados dentro del potenciostato.

La Figura 1 muestra un diagrama de bloques en donde se representa el flujo de la señal generada por un sensor electroquímico, en un sistema de medición basado en un potenciostato.

## 2.2 Celdas de tres electrodos

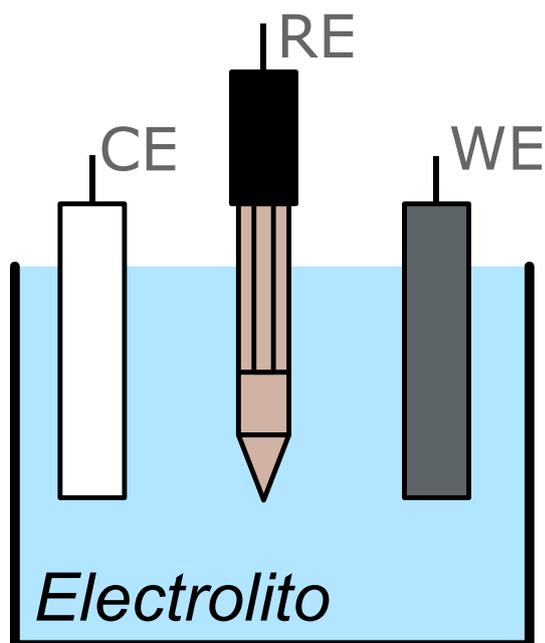
La electroquímica es la rama de la química encargada de estudiar los procesos que transforman energía química en energía eléctrica. El proceso en donde ocurren reacciones químicas en un electrodo en contacto con un



**Figura 1.** Diagrama de bloques adquisición de datos para un detector electroquímico.

electrolito cuando se aplica una diferencia de potencial externa se denomina electrólisis [4]. Estas reacciones en las cuales se presenta transferencia de electrones entre las moléculas se conocen como reacciones de óxido-reducción.

Un detector de hidrógeno electroquímico que entra en contacto con esta sustancia, genera una corriente eléctrica a partir de las reacciones de óxido-reducción que ocurren en sus electrodos. La corriente generada se caracteriza por ser de magnitud muy pequeña, en el orden de microamperios o nanoamperios, y depende directamente de los potenciales de cada electrodo. Los detectores generalmente constan de una celda electroquímica, y se pueden encontrar configuraciones de dos o tres electrodos, los cuales están en contacto con un electrolito o polímero sólido. Las características físicas de los electrodos, como los materiales y la geometría, influyen significativamente

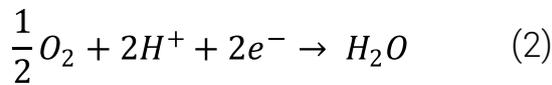
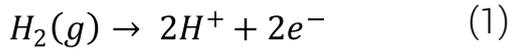


**Figura 2.** Celda de 3 electrodos. CE: electrodo auxiliar. RE: electrodo de referencia. WE: electrodo de trabajo.

en la medición de la concentración de hidrógeno. Los materiales comunes para el electrodo de trabajo (WE) incluyen platino, oro y carbono, cada uno con ventajas en términos de conductividad, eficiencia catalítica y costo. El platino, por ejemplo, es altamente eficiente pero costoso, mientras que el carbono es más económico, pero menos catalítico [8]. Una ilustración de una celda electroquímica se muestra en la Figura 2.

En las configuraciones de dos electrodos, el primero de ellos se denomina electrodo de trabajo o WE (*working electrode*), es en éste donde ocurre la reacción electroquímica; el segundo electrodo es el electrodo auxiliar o CE (*counter electrode*), que junto con el electrodo de trabajo y el electrolito permiten el flujo de la corriente generada a partir de la reacción electroquímica. En esta configuración se asume que el potencial en el electrodo de trabajo permanece constante. Sin embargo, éste puede verse afectado durante la electrólisis por alteración en factores como la densidad de corriente, la temperatura, el material del electrodo y la composición del electrolito [6], afectando directamente la relación de proporción entre la corriente y la concentración de hidrógeno, y, por ende, afectando la medición. Para enmendar este efecto, se incluye un tercer electrodo que sirve como referencia y facilita la medición y control del potencial en el electrodo de trabajo [12]. A esta técnica de llevar a cabo la medición de la corriente generada a partir de reacciones redox se le conoce como amperometría.

En general, los procesos en el detector de hidrógeno incluyen la reacción en el ánodo o electrodo de trabajo (WE) y la reducción en el cátodo o electrodo auxiliar (CE) que vienen dadas por (1) y (2) [8]:



### 2.3 Amplificadores operacionales

Un amplificador operacional (op-amp) es un dispositivo de alta ganancia que tiene dos terminales de entrada y uno de salida. El símbolo de un op-amp se muestra en la Figura 3. Un op-amp tiene al menos 5 terminales: entrada inversora  $V_-$ , entrada no inversora  $V_+$ , salida  $V_{out}$  y dos entradas más de alimentación  $+V_{cc}$  y  $-V_{ee}$ .

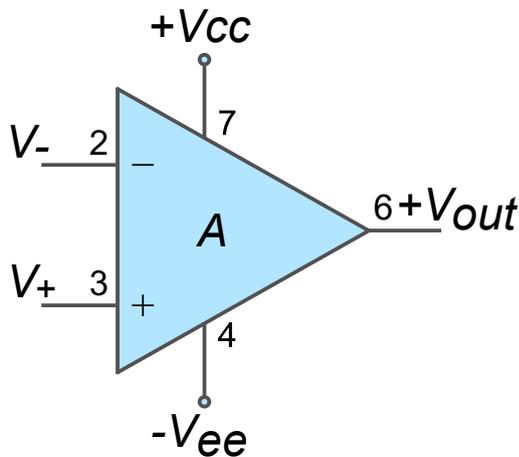


Figura 3. Amplificador operacional.

El voltaje  $V_{out}$  es la diferencia de potencial entre  $V_+$  y  $V_-$ , multiplicado por la ganancia  $A_o$  del amplificador:

$$V_{out} = A_{OL}(V_+ - V_-) \quad (3)$$

Un amplificador operacional ideal tiene las siguientes características principales:

- Ganancia de lazo abierto infinita  $A_{OL}$
- Resistencia de entrada  $R_{in}$  infinita, corriente de entrada cero
- Resistencia de salida  $R_{out}$  cero
- Ancho de banda infinito
- Ruido cero en su salida

Más allá de las características ideales, en un amplificador operacional real se encuentran ganancias desde  $10^5$  hasta  $10^6$  y resistencias desde  $0.3 \text{ M}\Omega$  en adelante, ancho de banda finito y se puede ver afectado por ruido, etc. Las características de los op-amp varían según su campo de aplicación. Los amplificadores comúnmente utilizados en potenciostatos son amplificadores de precisión como el OPA177 o el OPA211, gracias a su precisión y bajo *offset* de voltaje en su salida, y amplificadores de instrumentación como el INA114 o el INA128, por su bajo nivel de ruido y alto CMRR (factor de rechazo de modo común).

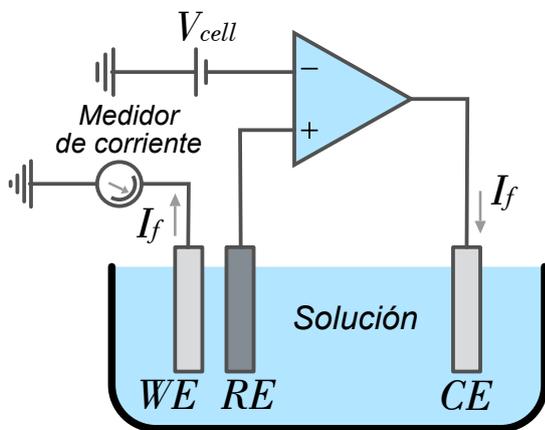
Las características de un amplificador operacional permiten que este pueda utilizarse en diferentes aplicaciones, variando su configuración. Un op-amp se puede configurar como: comparador, seguidor de tensión, amplificador inversor, amplificador no inversor, operaciones aritméticas, de integración y de derivación. Como se verá a continuación, los amplificadores operacionales son fundamentales en el funcionamiento de un potenciostato, tanto en la regulación del potencial como en la amplificación de la corriente.

### 2.4 Potenciostato

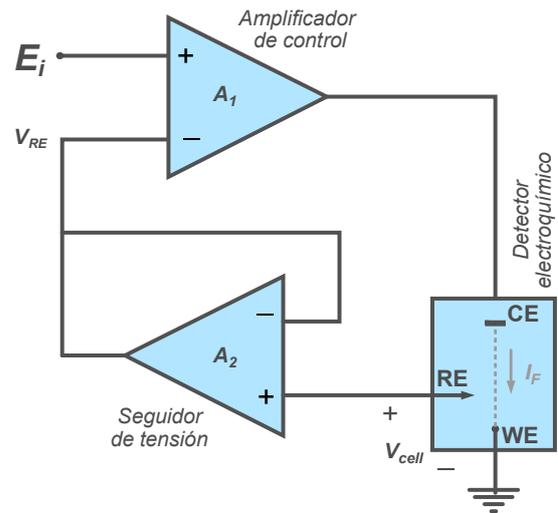
Para obtener una medición fiel a la concentración de hidrógeno, el potencial

en el electrodo de trabajo debe permanecer constante durante todo el proceso de medición. El potenciostato permite la realización de pruebas en celdas electroquímicas, midiendo la corriente generada por la celda y controlando el potencial en un electrodo de trabajo basándose en el electrodo de referencia. Algunos dispositivos que se utilizan actualmente fabricados por empresas reconocidas como Princeton Applied Research, Biologic Science Instruments y Gamry Instruments, reúnen estas funcionalidades y varias otras utilizadas en el campo de la electroquímica, sin embargo, el costo de estos equipos fácilmente supera los miles de dólares y además están diseñados principalmente para su uso en investigación dentro de un laboratorio [11].

Un potenciostato específico de bajo costo para uso en lectura de sensores de hidrógeno se puede construir usando algunas resistencias, capacitores y amplificadores. La Figura 4 muestra la estructura conceptual básica de un detector amperométrico con dispositivo potenciostato de tres electrodos.



**Figura 4.** Esquema conceptual de un potenciostato y celda de 3 electrodos.

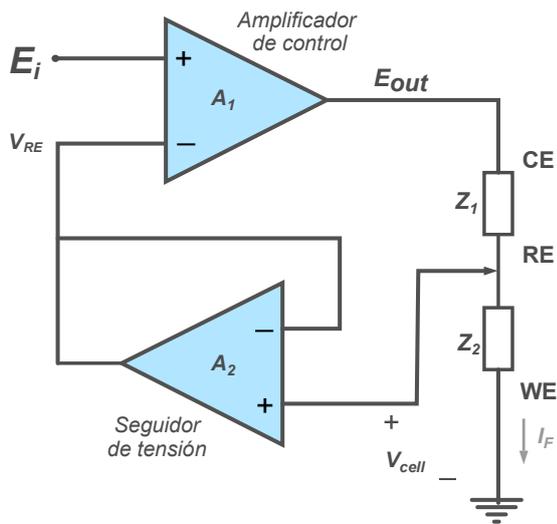


**Figura 5.** Control de potencial con WE aterrizado.

En términos generales, la operación de un potenciostato se reduce a dos funcionalidades principales: el control de potencial y la medición y amplificación de corriente. Para mantener el electrodo de trabajo a un potencial constante, debe evitarse el flujo de corriente a través del electrodo de referencia. Esto se logra aislando este potencial mediante un amplificador de alta impedancia configurado como seguidor de tensión. El potenciostato resuelve el problema de la deriva de potencial en el electrodo de trabajo causada por el flujo de carga debido a las reacciones redox [15][1].

### Control de potencial

Una de las configuraciones convencionales para el control de potencial es la configuración de electrodo de trabajo a tierra. Como se muestra en la Figura 5, el WE se conecta a tierra, y hay además un amplificador operacional (llamado amplificador de control) que se encarga de controlar la corriente  $I_f$  de manera que el voltaje en la celda  $V_{cell}$  se mantiene en un valor deseado  $E_i$  [14].



**Figura 6.** Equivalencia de impedancias en celda electroquímica.

Para entender en detalle cómo se realiza el control de potencial, el detector o celda electroquímica se pueden considerar como dos impedancias  $Z_1$  y  $Z_2$  conectadas en serie como se muestra en la Figura 6, donde  $Z_1$  representa la impedancia vista entre el electrodo auxiliar y electrodo de referencia y  $Z_2$  representa la impedancia vista entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia.

La corriente de entrada del amplificador tiende a cero, así, la corriente de salida  $I_c$  y la tensión en  $E_r$  vienen dadas por:

$$I_c = \frac{E_{out}}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

$$E_r = I_c Z_2 \quad (5)$$

Combinando las ecuaciones (4) y (5) se tiene que:

$$E_r = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} E_{out} = \beta E_{out} \quad (6)$$

Donde  $\beta$  es el factor de retroalimentación. Con (6) y la ecuación de tensión de salida del op-amp de la expresión en (3), se tiene que:

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{\beta A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}} \quad (7)$$

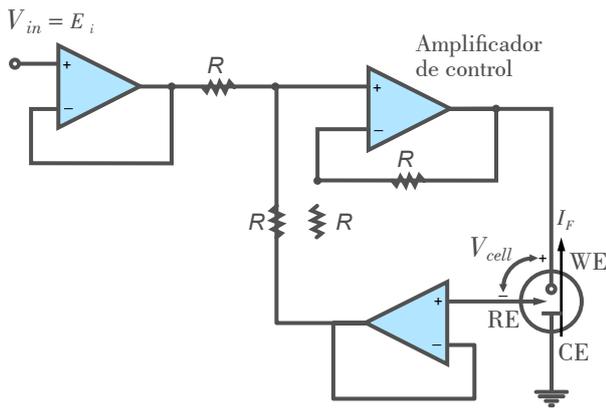
Puesto que  $A_{OL}$  es un valor muy grande respecto a uno, las tensiones  $E_i$  y  $E_r$  tienden a ser iguales. Esta es una de las características principales de un amplificador con retroalimentación negativa. Así, la ecuación se reduce a:

$$E_i = E_r \quad (8)$$

La ecuación (7) muestra cómo el amplificador trabaja para mantener la diferencia de potencial entre los electrodos de trabajo y de referencia acerca al valor del voltaje de entrada.

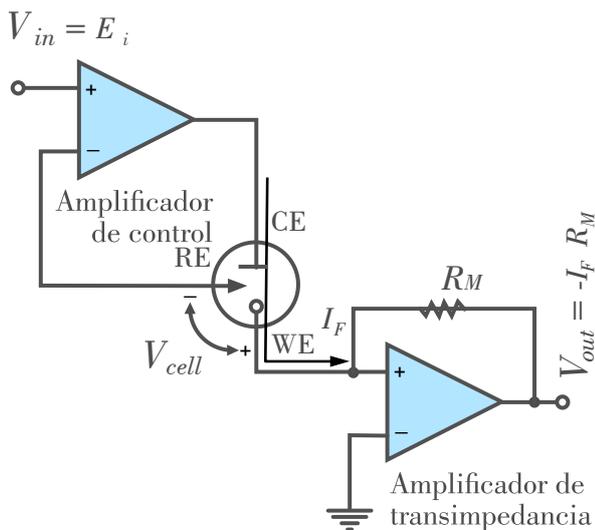
El circuito del potenciostato incluye principalmente el lazo de conducción del electrodo auxiliar (amplificador de control), el circuito seguidor de voltaje del electrodo de referencia y el circuito de conversión de corriente-voltaje para la corriente amperométrica generada en el electrodo de trabajo. A través de un amplificador operacional de alta precisión y el electrodo auxiliar, se inyecta la corriente necesaria para estimular la reacción electroquímica, sin afectar el potencial en los electrodos. La función principal del electrodo de referencia es proporcionar una tensión de referencia que no varíe a pesar de las condiciones externas. El circuito seguidor de tensión reduce la influencia de polarización electroquímica en el electrodo de referencia [10].

Otra configuración se ilustra en la Figura 7, denominada configuración de electrodo auxiliar a tierra que también



**Figura 7.** Control de potencial con CE aterrizado.

cuenta con un amplificador de control con realimentación negativa. Es más compleja ya que utiliza más componentes, pero ofrece ventajas al mejorar la medición de la corriente cuando hay exposición a interferencias electromagnéticas (EMI).



**Figura 8.** Medición de corriente utilizando un amplificador de transimpedancia.

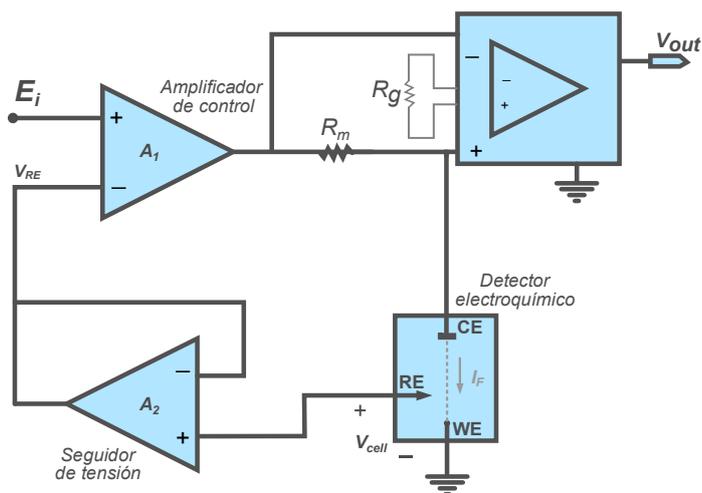
## Medición de la corriente

De igual manera que para el control de voltaje, existen diferentes configuraciones para la medición de la corriente amperométrica. A continuación, se explica dos alternativas para potencióstatos que utilizan la configuración de electrodo de trabajo a tierra para el control de potencial. Lo más común es utilizar un amplificador de transimpedancia, que es en esencia, un convertidor de corriente a voltaje implementando un único amplificador operacional (ver Figura 8). El amplificador de transimpedancia se conecta al electrodo de trabajo, creando una tierra virtual en éste y generando una salida de voltaje proporcional a la corriente  $I_F$  [14].

El voltaje a la salida del amplificador viene dado por la ecuación:

$$V_{out} = -I_F R_M \quad (9)$$

Este enfoque ofrece algunas ventajas, como su sencilla implementación, su capacidad de medir corrientes más pequeñas simplemente sustituyendo la resistencia  $R_M$  por una de mayor valor, y que tanto la medida de tensión como de corriente están referenciadas a tierra, mejorando la precisión. Sin embargo, debido a que WE no está conectado a una tierra física, el potencióstato es vulnerable a ruido eléctrico, particularmente a EMI de alta frecuencia [1]. Por otro lado, dado que la corriente más alta en la reacción es del orden de nanoamperios o microamperios, es importante que la corriente de polarización de entrada sea mucho menor que la corriente que se está midiendo para evitar que afecte el voltaje de salida. Por ello, se recomienda utilizar amplificadores operacionales con un valor alto de rechazo al modo común



**Figura 9.** Medición de corriente utilizando un amplificador de instrumentación.

Un amplificador de instrumentación ubicado a la salida del amplificador de control también es adecuado gracias a su alta precisión, ganancia ajustable y CMRR, suministrando una señal de entrada diferencial proporcional a la corriente amperométrica haciendo uso de una resistencia  $R_m$ , como se muestra en la Figura 9 [5].

La expresión que describe el voltaje de salida en función de la corriente que circula por la celda es:

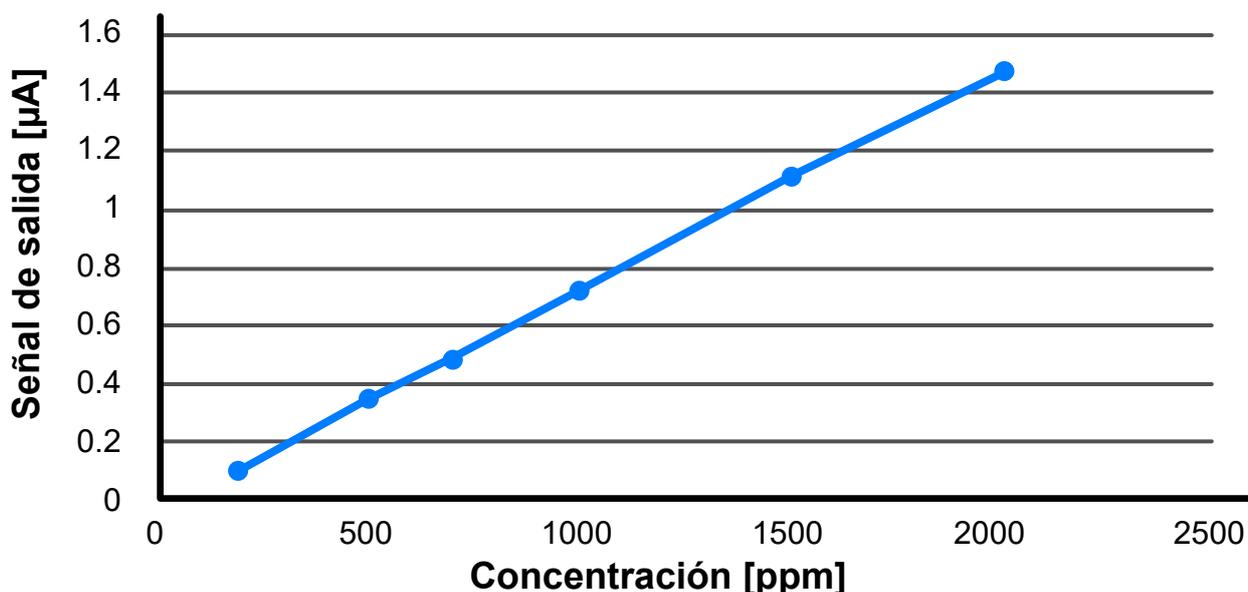
$$V_{out} = I_f R_m G \quad (10)$$

Donde  $G$  es la ganancia del amplificador de instrumentación, la cual se puede modificar en función de la resistencia  $R_g$ .

(CMRR), que se define como la relación entre la ganancia de la señal diferencial y la señal en modo común (señales no deseadas, como el ruido eléctrico, que afectan ambas entradas del op-amp) y se expresa en decibelios. Además, es importante contar con valores elevados de ganancia en lazo abierto y resistencia de entrada [10, 16].

## 2.5 Procesamiento de datos

La señal de salida del potencióstato  $V_{out}$  no es el valor de concentración de hidrógeno, sino una representación



**Figura 10.** Curva de calibración MEV-GH01.

proporcional de ésta. El valor de concentración final se obtiene a partir de las curvas de calibración del detector de hidrógeno, que inicialmente son suministradas por el proveedor. La Figura 10 muestra la curva de calibración para el sensor MEV-GH01 de la compañía Winsen Sensors. El eje x representa el valor de concentración en partes por millón, mientras que el eje y representa la magnitud de la señal de salida del detector. Generalmente, la relación entre la concentración y la corriente sigue un comportamiento lineal dentro de un rango específico. Sin embargo, en concentraciones límites del sensor, esta linealidad puede desviarse, requiriendo un ajuste polinomial o logarítmico. Para obtener un valor de concentración se debe realizar un procesamiento de la señal utilizando microcontrolador o una tarjeta de adquisición de datos [4].

Se debe elegir un microcontrolador que incluya un conversor analógico digital (ADC) con la suficiente resolución para medir de manera óptima la señal de salida del potencióstato, que a su vez depende del detector de hidrógeno utilizado. El fabricante especifica valores de sensibilidad (corriente por unidad de concentración) y rango de operación. Para detectar cambios en la corriente en el orden de  $0.1 \mu A$ , se debe asegurar que al circular esta corriente que circula por  $R_m$  genere una tensión de salida de al menos  $1 V_{LSB}$ , que representa el valor en tensión del bit menos significativo que puede representar el ADC.

$$V_{out} = 0.1 \mu A R_m G > 1 V_{LSB} \quad (11)$$

El ADC del microcontrolador se configura para operar en un rango de 0-5 V en su entrada analógica, así, la tensión del bit menos significativo es de 1.22 mV con un ADC de 10 bits;

entonces el valor de transresistencia  $R_m * G$  en la expresión (10) está dado por:

$$R_m G > \frac{1.22 \text{ mV}}{0.1 \mu A} = 12.2 \text{ k}\Omega \quad (12)$$

Bajo esta condición el ADC puede leer el menor cambio de corriente/concentración que el detector es capaz de ofrecer.

### 3 Discusión y conclusiones

Los potencióstatos son dispositivos esenciales en la medición de sensores electroquímicos. La revisión de la literatura nos permite concluir que no es necesario contar con un dispositivo comercial de alto costo para trabajar con estos detectores. Existen diversas posibilidades y configuraciones que utilizan componentes y equipos de bajo costo, dependiendo de la aplicación requerida, siempre prestando atención a las especificaciones de la celda utilizada. Es fundamental resaltar la importancia del control de potencial en el electrodo de trabajo para lograr mediciones precisas. Las magnitudes de las corrientes que se manejan pueden ser fácilmente alteradas por interferencias externas, como la EMI, lo que hace indispensable seleccionar dispositivos con elevados valores de CRMM, impedancia de entrada y ganancia diferencial para mejorar la precisión y estabilidad de la señal medida. Por último, es crucial elegir un ADC que se ajuste a la sensibilidad del detector para la lectura de la salida en el potencióstato; de lo contrario, se podría comprometer la exactitud de la medición.

## Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación, con recursos del Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas, y hace parte de la ejecución del programa "Manejo integral del hidrógeno en mezcla con gas natural como medio para facilitar la transición energética hacia energías renovables", co-ejecutado por el CDT de Gas, la Corporación para la Investigación de la Corrosión, la Universidad Pontificia Bolivariana sede Bucaramanga, la Fundación Universitaria de San Gil (Unisangil) y Promigas S.A. E.S.P.

## Referencias

- [1] Ahmadi M. M., Jullien G. A. 2009. Current-mirror-based potentiostats for three-electrode amperometric electrochemical sensors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 56(7): 1339–1348.
- [2] Alfaro M., Alfaro I. 2017. Construcción de un potenciostato de bajo costo para estudios de inhibición de corrosión de acero: determinación del potencial de corrosión y mediciones cronoamperométricas. *Educación Química*, 28(4): 269–274.
- [3] Aroutiounian V. M. 2005. Hydrogen detectors. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 3(23): 21-31.
- [4] Bard A. J., Faulkner L. R., White H. S. 2001. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. 3 edición. Wiley.
- [5] Barrero Pérez J. G., Amaya Palacio J. A., Acevedo Picón A. R., Acevedo Rueda J. J., González Sua G. E., Morales Suárez L. C. 2004. Diseño y construcción de un prototipo de potenciostato galvanostato para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica. *Revista UIS Ingenierías* 3(1): 29–40.
- [6] Hickling A. 1942. Studies in electrode polarization - Part IV – The automatic control of the potential of a working electrode. *Transactions of the Faraday Society* 38: 27–33.
- [7] Hübert T., Boon-Brett L., Black G., Banach U. 2011. Hydrogen sensors – A review. *Sensors and Actuators B: Chemical* 157(2): 329–352.
- [8] Korotcenkov G., Han S. D., Stetter J. R. 2009. Review of electrochemical hydrogen sensors. *Chemical Reviews* 109(3): 1402–1433.
- [9] Kroll A. V., Smorchkov V., Nazarenko A. Y. 1994. Electrochemical sensors for hydrogen and hydrogen sulfide determination. *Sensors and Actuators B: Chemical* 21(2): 97–100.
- [10] Ning Z. H., Huang J. Q., Guo S. X., Wang L. H. 2020. A portable potentiostat for three-electrode electrochemical sensor. *Journal of Physics: Conference Series* 1550: 042049.
- [11] Segura Giraldo B., Jiménez García F. N., Giraldo Torres L. R. 2016. Prototipo de potenciostato con aplicaciones en procesos electroquímicos. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 10(19): 61–69
- [12] Skoog D. A., West D. M., Holler F. J. 1996. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Harcourt Brace College Publ.
- [13] Verfondern K. 2022. Chapter 1 - Hydrogen fundamentals, en *Hydrogen Safety for Energy Applications*, Kotchourko A. y Jordan T. (eds.). Elsevier.
- [14] Wang W.-S., Kuo W.-T., Huang H.-Y., Luo C.-H. 2010. Wide dynamic range CMOS potentiostat for amperometric chemical sensor. *Sensors* 10(3):1782–1797.
- [15] Arrieta Almario A. A., Tarazona Cáceres R. L. 2014. Sistema multipotenciostato basado en instrumentación virtual. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* 15(3): 321–337.