

MEDIDOR DE pH DE BAJO COSTO PARA APLICACIONES DIDÁCTICAS

LOW-COST pH-METER FOR DIDACTIC APPLICATIONS

Miguel Ángel Bañuelos Saucedo

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, México
miguel.banuelos@icat.unam.mx

Recepción: 29/octubre/2020

Aceptación: 27/noviembre/2020

Resumen

Con el propósito de abordar el problema de la falta de instrumentos de medición en los laboratorios de Química y Biología, se presenta el desarrollo de un medidor de pH de bajo costo basado en un microcontrolador ATmega328P. El sistema mide también la temperatura y tiene un costo aproximado de US\$50 dólares, los equipos comerciales de precio similar no cuentan con la función de medición de temperatura. El sistema desarrollado tiene calibración automática de uno, dos o tres puntos y medición de temperatura mediante una sonda DS18B20. Se presenta una comparación de su desempeño contra un equipo comercial Extech PH210, encontrándose mediciones casi idénticas.

Palabras Clave: ATmega328P, instrumentación didáctica, medidor de pH.

Abstract

With the purpose of tackling the problem of the lack of measurement instruments in Chemistry and Biology laboratories, the development of a low-cost temperature and pH-meter based on an ATmega328P microcontroller is presented. The system also measures the temperature and it has an approximate cost of US \$50 dollars, commercial equipments of similar price lack of the temperature measurement function. The system has one-, two- or three-points automatic calibration and temperature measurement using a DS18B20 probe. A comparison of its performance against a commercial Extech PH210 equipment is presented, finding almost identical measurements.

Keywords: ATmega328P, didactic instrumentation, pH-meter.

1. Introducción

La medición del pH, o potencial de hidrógeno, es un tema común de las asignaturas del bachillerato universitario tales como química o biología. Entre los tópicos que se mencionan en los planes de estudio se incluyen: el pH del océano, la lluvia ácida, la teoría ácido-base de Arrhenius, la escala de pH; las propiedades de ácidos y bases, y sus usos domésticos [ENP-UNAM, 2017b], [ENP-UNAM, 2017a], [CCH-UNAM, 2016]. Los conceptos de acidez y basicidad presentan una problemática de aprendizaje particular, que incluye deficiencias en el manejo de exponentes y logaritmos, o conceptos tales como concentración, reacciones de neutralización y equilibrio ácido-base [Alvarado, 2013]. Para resolver esta problemática, se requiere del desarrollo de estrategias didácticas apropiadas, apoyadas por experiencias en los laboratorios. Sin embargo, no siempre se cuenta con medidores de pH electrónicos, y a menudo se debe recurrir a tiras de papel, las cuales proporcionan una resolución de unidades de pH. Por otro lado, la medición por métodos electro-químicos puede alcanzar resoluciones menores a 0.02 unidades de pH, dependiendo fundamentalmente del electrodo utilizado [Glab, 2005].

El objetivo del presente trabajo es presentar el desarrollo de un medidor de pH electrónico, de bajo costo, basado en el microcontrolador ATmega328P. El medidor desarrollado pretende ser una opción accesible para la realización de prácticas de laboratorio en las asignaturas de Química y Biología, tanto del bachillerato universitario como de cursos de pregrado.

Actualmente, cuando se piensa en instrumentación de bajo costo aparece la opción de utilizar una tarjeta Arduino. Esta tarjeta está basada en un microcontrolador ATmega328P y se han desarrollado numerosos módulos sensores compatibles. Entre ellos está el sensor analógico de pH SEN0161 (ver figura 1), el cual se puede conseguir por \$1900 pesos MNX, con sonda de pH incluida. Al costo habría que añadir una tarjeta Arduino (\$150 pesos MNX), un display LCD y conexiones (\$250 pesos MNX). El módulo requiere un ajuste manual, mediante dos trimpots. Como referencia de temperatura tiene un termistor y como referencia de voltaje un circuito integrado en encapsulado TO-92, que podría ser un LM35 o similar.



Figura 1 Módulo sensor de pH SEN0161.

El ajuste manual lo hace difícil de operar, y no incluye la medición de la temperatura del líquido que se pretende caracterizar. Sin embargo, es posible añadir un módulo sensor de temperatura como proponen los autores del sistema denominado “Chemduino”, que utiliza un Arduino para realizar mediciones de laboratorio de bajo costo [Kubínová, 2015]. Un sistema de adquisición de datos basado en Arduino, orientado a instrumentación química y con un costo de US\$50 dólares se presenta en [Grinias, 2016]. Otro medidor de pH basado en Arduino, y de bajo costo, orientado a cultivos hidropónicos se muestra en [Barrales, 2016]. Los autores presentan una solución orientada a una comunicación inalámbrica con un teléfono celular, de manera similar a la presentada en [Jin, 2018]. El módulo sensor de pH SEN0161 y un sensor de temperatura DS18B20 son acoplados a una tarjeta Arduino y una pantalla LCD en el sistema presentado por [Dewi, 2020]. En este caso, los autores omiten mencionar qué tipo de calibración utilizan.

Como alternativa a la utilización de plataformas de hardware abierto, existen equipos comerciales de bajo costo para la medición de pH, como el medidor TENMA modelo 72-6783 (\$750 pesos MNX), que no tiene forma de calibrarse y no despliega la temperatura [Tenma, 2003], el medidor de bolsillo HANNA HI-98103 (\$958 pesos MNX), con calibración automática de dos puntos, sin medición de temperatura [Hanna, 2016], y el medidor pH EXTECH modelo pH100 (\$3400 pesos MNX), que cuenta con calibración automática de uno, dos o tres puntos y medición de temperatura [Extech, 2015]. De estos equipos (Figura 2), el Hanna y el Extech utilizan sondas de pH integradas, que si bien son reemplazables, convierte los instrumentos en dependientes de un proveedor, su disponibilidad y tiempos de entrega. Esto es común en medidores de pH de bajo costo.



Figura 2 Equipos comerciales de bajo costo.

La propuesta que se presenta en este trabajo pretende disminuir el costo del medidor de pH al sustituir la tarjeta Arduino por un microcontrolador e incluir la electrónica de procesamiento analógico en la misma tarjeta, además de incluir un puerto para un sensor de temperatura de tipo digital. El sistema que se presenta, si se compara con los desarrollados alrededor de la tarjeta Arduino, tiene la ventaja de no requerir conocimientos de electrónica o computación para su utilización, y no se invierte tiempo en ensamblar los componentes y verificar conexiones.

2. Métodos

El pH, o potencial de Hidrógeno [Myers, 2010], es una medida de la actividad de iones de hidrógeno en una sustancia y se define de acuerdo con la ecuación 1 [Sheppard, 1998].

$$pH = -\log_{10} a_{H^+} \quad (1)$$

Donde:

a_{H^+} : la actividad de los iones de hidrógeno

pH: el potencial de Hidrógeno

Debido a su naturaleza logarítmica, un cambio de una unidad de pH representa un cambio de 10 veces en la actividad de los iones de hidrógeno. Se establece una escala de medición entre 0 y 14, donde 7 indica una solución neutra; valores menores a 7 indican acidez, y mayores a 7 basicidad o alcalinidad. Sin embargo, también es posible tener mediciones fuera del intervalo 0-14 [McMillan, 2005].

El voltaje generado por la sonda produce alrededor de 59 mV/pH, de acuerdo con la ecuación 2 de Nernst [Analog Devices, 2013].

$$E = a - \frac{2.303 R (T_K)}{nF} (pH - pH_7) \quad (2)$$

Donde:

- E : El voltaje generado por la sonda
- a : ± 30 mV: El punto de cero tolerancia.
- TK : La temperatura en Kelvin
- N=1 : La valencia a 25 °C
- F : La constante de Faraday (96485 C/mol)
- R : El número de Avogadro (8.314 V·C/K.mol)
- pH : La actividad de iones de hidrógeno de la muestra
- pH_7 : El valor de referencia

Debido a la dependencia del pH con la temperatura, se ha considerado incluir una sonda para medirla de manera simultánea. El sistema desarrollado consiste, de manera simplificada de: una sonda de pH (compatible con sondas de conector BNC), una sonda de temperatura digital DS18B20 (conexión específica mediante conector jack estéreo de 3.5 mm), un amplificador búfer, un microcontrolador y una pantalla OLED (128 x 64 pixeles monocromática) para el despliegue de las mediciones y del procedimiento de calibración (figura 3).

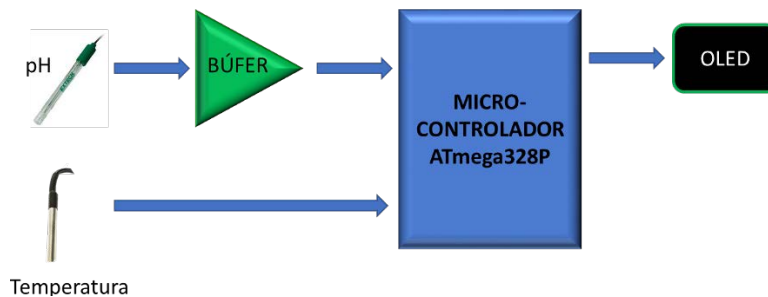


Figura 3 Diagrama de bloques del sistema desarrollado.

Para la medición del pH, es muy común emplear electrodos de membrana de vidrio [Sheppard, 1998], los cuales se modelan como una fuente de voltaje en serie con

una resistencia de valores entre 1 MΩ y 1 GΩ [Analog Devices, 2013]. En el sistema desarrollado se emplea una sonda Extech modelo 601500, la cual tiene una impedancia de salida de 127 MΩ, de acuerdo con la medición realizada con un multímetro de banco de 6 ½ dígitos Keysight modelo 34465A.

Para evitar que la alta impedancia de salida de la sonda altere el proceso de medición, se suele utilizar un circuito seguidor de voltaje, basado en un amplificador operacional con baja corriente de bias, como frente de entrada analógico. En tabla 1 se enlistan opciones de amplificadores comerciales que se consideraron.

Tabla 1 Amplificadores operacionales de bajo costo y baja I_b.

Dispositivo	I _{bias} max	V _{os} max	Precio (Digikey)
MCP6071	100 pA	150 μV	US\$0.47
TL081C	200 pA	20 mV	US\$0.48
AD8603	1.0 pA	300 μV	US\$2.17
OPA333	200 pA	10 μV	US\$2.20
LMP7721	20 fA	180 μV	US\$4.47
TLC4502	60 pA	100 μV	US\$5.71

Todos, con excepción del TL081C, funcionan con alimentación unipolar y un voltaje máximo entre 5 y 6 V. Con base en su costo, baja corriente de bias y bajo voltaje de offset se seleccionó el MCP6071 de Microchip.

A 25 C, la sonda de pH producirá voltajes entre -414 y +414 mV para valores de pH entre 0 y 14, según se muestra en la figura 4.

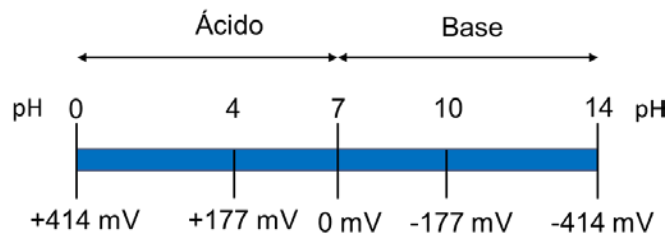


Figura 4 Escala de pH.

Debido a la utilización de amplificadores de voltaje unipolar, es necesario añadir un voltaje al proporcionado por la sonda de pH. Para ello, se utiliza una referencia de voltaje en circuito integrado. Algunos de las opciones consideradas se muestran en

la tabla 2. Considerando el costo y la exactitud inicial se selecciona el circuito integrado MCO1501-10E.

Tabla 2 Referencias de voltaje.

Parte	Voltaje	Deriva térmica	Exactitud inicial	Precio (Digikey)
MCP1501-10E	1.024 V	50 ppm/°C	±0.1%	US\$0.78
LM336Z-2.5	2.49 V	--	±1.0%	US\$0.79
LM4040AIZ-N-2.5	2.5 V	100 ppm/°C	±0.1%	US\$1.79
LM4140CCM-1.0	1.024 V	10 ppm/°C	±0.1%	US\$3.78

El voltaje de referencia de 1.024 V se suma al producido por la sonda (0 a 0.828 V), por lo que se opta por utilizar una referencia de voltaje MCP1501-20E, de 2.048 V para la referencia analógica de la conversión analógica-digital. Tiene un precio de US\$0.76 dólares. El microcontrolador que se ha seleccionado es el ATMEL (actualmente Microchip) ATmega328P, el cual tiene una arquitectura RISC de 8 bits, cuenta con 32 KBytes de memoria de programa, 2 KBytes de SRAM, 1 KByte de EEPROM, y un convertidor A/D de 10 bits. Considerando los 10 bits de resolución, los intervalos de voltaje de salida de la sonda de pH, el voltaje de referencia analógica y el voltaje de referencia que se le añade a la sonda, es posible obtener una resolución de 0.034 unidades de pH. El ATmega328P tiene un costo al menudeo de US\$2.00 dólares.

Una de las principales fuentes de error en la determinación del pH es la calibración de las sondas. Como se mencionó anteriormente, los medidores de pH comerciales pueden contar con la opción de calibración automática de dos o tres puntos. La determinación del valor ajustado se realiza mediante interpolación (*bracketing*), pero si se requiere de precisiones mejores a ± 0.02 pH, se recomienda utilizar regresión lineal multipunto [Naumann, 1994]. Para obtener una buena calibración se recomienda utilizar soluciones búfer con valores cercanos al de la muestra, por lo que usualmente no es necesario, o factible, realizar un ajuste en todo el intervalo 0 a 14 pH [Cheng, 2005].

El medidor de pH desarrollado utiliza el método de calibración automática utilizando una, dos o tres soluciones búfer de 4.0, 7.0 y 10.0. Si alguna de las soluciones no se detecta, se toma el valor previo de calibración o uno por omisión. Se utiliza un

modelo lineal con interpolación. Este es un modo de operación similar al que aparentemente utiliza el medidor Extech PH100.

La compensación automática por variaciones en la temperatura se realiza mediante la expresión de la ecuación 3 [Westcott, 1978].

$$pH = 7 - \frac{T_1}{T_2}(7 - pH_0) \quad (3)$$

Donde:

pH₀: es el valor de pH medido

T₁: es la temperatura de calibración en Kelvin

T₂: es la temperatura de la muestra en Kelvin

3. Resultados

El sistema desarrollado, basado en un microcontrolador ATmega328P, cuenta con una pantalla OLED de 128x64 pixeles, un botón y un interruptor, los cuales sirven para comunicación con el usuario. En la pantalla se muestra el valor de pH y de temperatura de manera simultánea. Durante el proceso de calibración, la pantalla se utiliza para dar mensajes al usuario respecto al momento adecuado para introducir la sonda de pH en la solución búfer correspondiente. Los datos de la calibración se almacenan en la memoria interna no-volátil EEPROM del microcontrolador. La tarjeta electrónica es de dos caras, tiene un conector BNC dedicado a la sonda de pH y un conector jack estéreo de 3.5 mm que sirve para conectar la sonda de temperatura (sensor DS18B20).

En la figura 5 se muestra la tarjeta; además, se pueden apreciar el conector para la alimentación mediante un eliminador de baterías externo, el interruptor de encendido y un conector para el programador del microcontrolador. La programación fue desarrollada en lenguaje C, utilizando la plataforma Atmel Studio 7.0. Se importaron las bibliotecas necesarias para el manejo de la pantalla OLED y del sensor DS18B20.

En la figura 6 se muestra el diagrama esquemático del medidor de pH. El sistema opera con una alimentación de 5 V que proporciona el regulador de voltaje lineal de bajo *dropout* AZ1117EH-5.0, que es similar al que utilizan las tarjetas Arduino UNO.

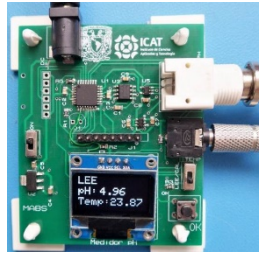


Figura 5 La tarjeta electrónica desarrollada.

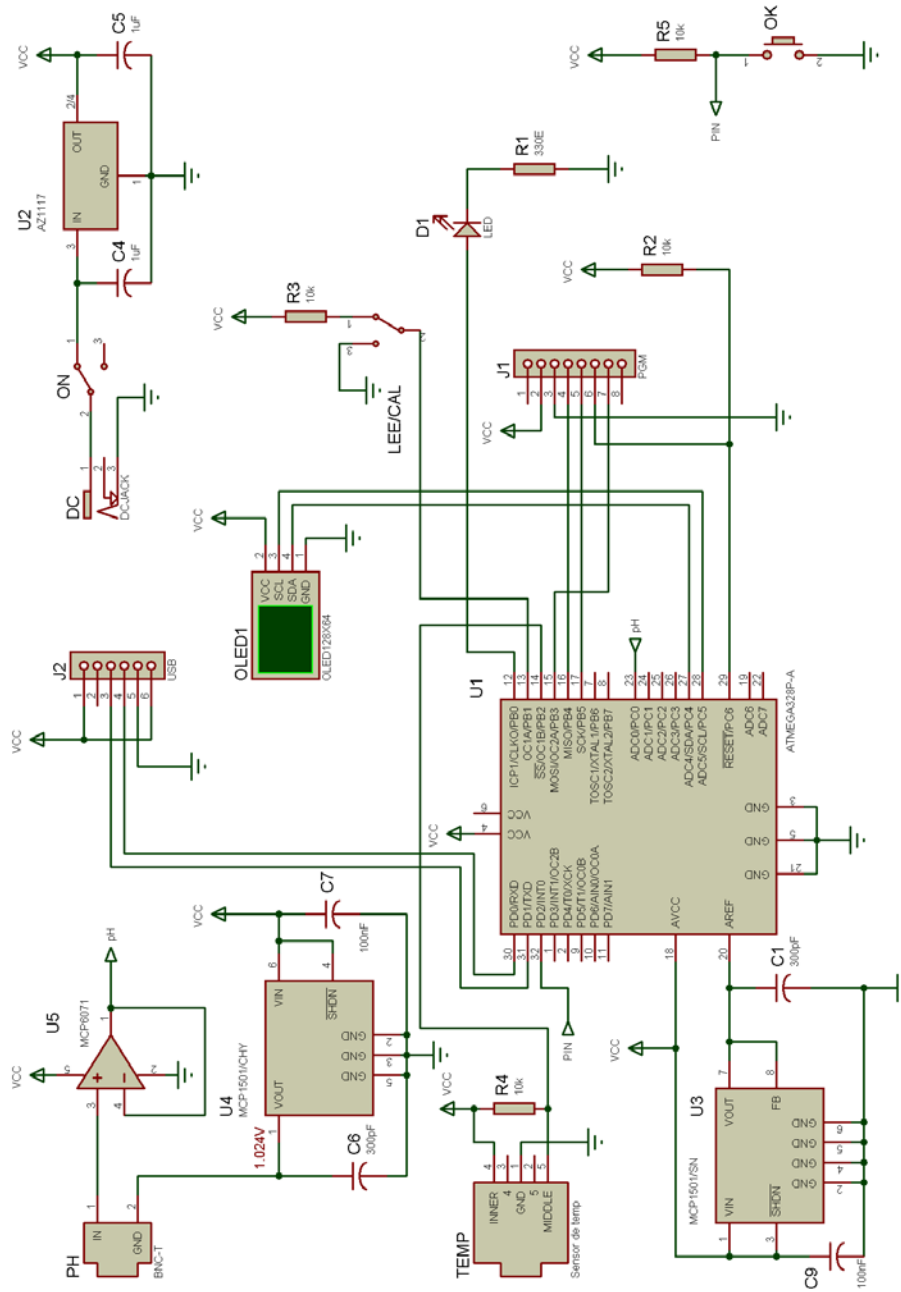


Figura 6 Diagrama esquemático del medidor de pH.

El conector J2 no está montado y está pensado para conectar un módulo de comunicación USB. El sistema cuenta con dos modos de operación: LEE y CALIBRA, los cuales se seleccionan antes de encenderlo, mediante el interruptor LEE/CAL. En el modo LEE se despliega de manera continua el valor del pH y la temperatura registrados. En el modo CALIBRA, se utiliza la pantalla para guiar al usuario en la aplicación de las soluciones búfer para el proceso de calibración (ver figura 7).



Figura 7 La pantalla durante la calibración.

En cada paso, se muestra el valor descalibrado del pH, para que el usuario pueda esperar a que se establezca la lectura (unos 30 segundos). El diagrama de flujo simplificado que describe el funcionamiento se muestra en la figura 8.

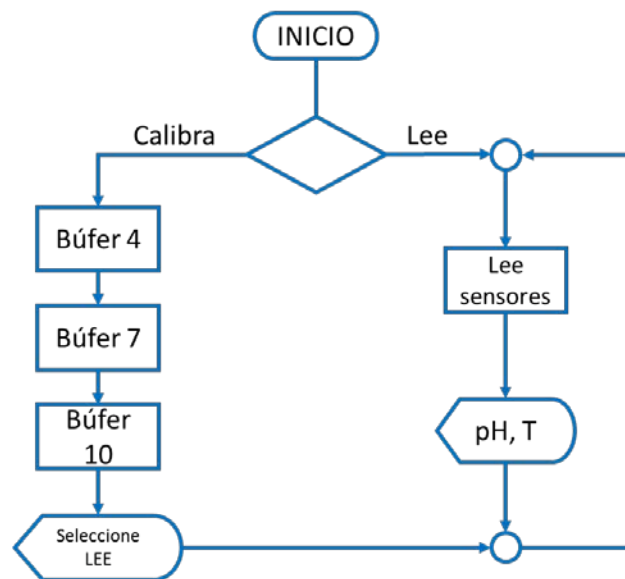


Figura 8 Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema.

Se efectuó una prueba de comparación contra un equipo comercial, el Extech PH210 (costo aproximado: US\$130). Para la calibración se utilizaron las mismas soluciones de referencia. Para las mediciones se utilizó una combinación de soluciones búfer y se empleó la misma sonda en ambos instrumentos (Extech 601500). Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Comparación de mediciones con un equipo comercial.

Equipo comercial Extech PH210	Medidor de pH desarrollado
3.98	3.97
3.99	4.00
4.61	4.60
5.06	5.07
6.08	6.08
6.40	6.40
6.85	6.84
7.00	7.00
7.53	7.57
8.22	8.26
9.54	9.59
9.99	10.04

4. Discusión

Para comparar los resultados de las mediciones entre instrumento de referencia y sistema desarrollado se obtuvo un modelo linealizado con un coeficiente de correlación $R^2=0.9999$, lo cual sugiere una correspondencia casi ideal (figura 9).

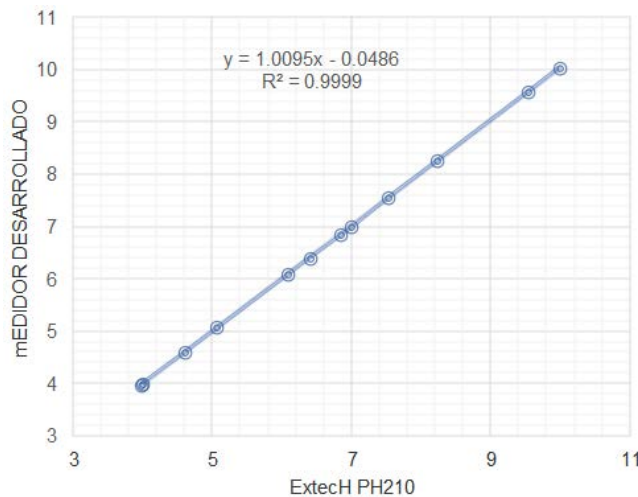


Figura 9 Modelado de la respuesta del medidor desarrollado.

El manual de operación del medidor PH210 señala que se debe efectuar una calibración utilizando un par de soluciones búfer; ya sea pH=4 y pH=7; o bien, pH=7 y pH=10. Se aprecia que la diferencia entre los dos instrumentos es casi nula en el intervalo pH=4 a 7, y comienza a haber una pequeña diferencia al acercarse a un pH=10. Esta diferencia podría deberse a pequeñas diferencias en el método de interpolación y ajuste a cero. El medidor pH210 utiliza como amplificador búfer un circuito integrado ICL7611, que si bien tiene una baja corriente de bias ($I_{B_max}=400$ pA), tiene un voltaje de offset elevado ($V_{OS_max}=20$ mV).

Los resultados obtenidos son alentadores, si se considera que el medidor desarrollado es alimentado mediante un eliminador de baterías de 9 V, de tipo fuente conmutada, el cual tiene un nivel de ruido de 15 mV_{RMS}, en comparación con el equipo comercial que se alimenta con una batería de 9 V, y que al realizar una medición similar entregó un voltaje de ruido menor a 850 μ V_{RMS}.

Considerando el costo del circuito impreso y los componentes, el sistema desarrollado tiene un valor aproximado de US\$12 dólares, sin considerar la sonda. A esa cantidad habría que añadirle el precio de un gabinete, lo cual podría duplicar el costo mencionado.

El medidor desarrollado puede mostrar lecturas con una resolución de 0.034 unidades de pH, en lugar de 0.01 que tendría el medidor PH210 de acuerdo con su hoja de datos. Este último está basado en un microcontrolador de aplicación específica, por lo que no se tuvo acceso a su hoja de datos para consultar el tipo de convertidor analógico-digital que utiliza. De cualquier manera, es difícil comprobar si la resolución que señala el fabricante es sobre la medición o únicamente sobre los valores desplegados. Además, resoluciones del orden de pH=0.01, dependen en gran medida de la calidad del electrodo de medición. Por otro lado, para los fines didácticos que se pretenden, una resolución de 0.1 pH se considera buena, condición que cumple el circuito diseñado.

5. Conclusiones

Se ha presentado el desarrollo de un medidor de pH y temperatura, orientado a prácticas escolares. El costo ha sido uno de los factores principales a considerar en

el diseño, con la finalidad de hacerlo accesible a los normalmente limitados presupuestos de las instituciones educativas. El precio del circuito impreso y sus componentes es de US\$12 dólares, lo que lo hace competitivo con sistemas basados en una tarjeta Arduino (unos US\$20 dólares sin considerar la sonda), teniéndose la ventaja de no ser necesarios conocimientos adicionales tales como: manejo de la plataforma Arduino y conexión de circuitos. En ambos casos no se incluye un gabinete. En caso de incluir un gabinete y una sonda económica, el costo del sistema desarrollado podría llegar a los US\$50 dólares. El equipo comercial más económico encontrado tiene un precio de US\$50 dólares (con sonda interconstruida), pero no cuenta con medición de temperatura; característica importante que incluye el sistema desarrollado. Esto pone en ligera ventaja al prototipo aquí presentado. Aún no se consideraron los costos indirectos involucrados, tales como uso de equipo, instalaciones, o salarios. Por otro lado, tampoco se ven reflejados en la estimación: la reducción en costos por adquirir componentes en volumen, o la disminución en gastos por mantenimiento del instrumento, al poder realizarse éste de manera local.

Con respecto al desempeño del prototipo se ha obtenido una resolución ligeramente menor a equipos comerciales: 0.034 pH vs 0.01 pH; lo cual no representa una desventaja importante en aplicaciones didácticas. La exactitud fue comparada favorablemente con un equipo comercial (Extech PH210), encontrándose un coeficiente de correlación de 0.9999. El procedimiento de calibración y el algoritmo de calibración son similares a los que se utilizan en equipos comerciales.

Como trabajo futuro se puede pensar en utilizar un gabinete comercial o desarrollar uno específico. Al circuito impreso se le puede montar un módulo de conectividad serial, si se desea que las lecturas se envíen a una computadora personal. La versión actual utiliza como alimentación un eliminador de baterías externo, pero esto podría modificarse para utilizar un cargador de teléfono celular.

Será importante contar con la retroalimentación de los docentes que utilicen el medidor de pH aquí presentado. Si ellos lo consideran de valor para sus propuestas didácticas, se puede modificar el programa para desplegar, además del valor de pH, indicadores cualitativos tales como: muy ácido, poco ácido, neutro u otros. También

se puede mostrar una lista de sustancias con valor de pH similar al medido. Es decir, se pueden añadir funciones que apoyen el proceso de enseñanza.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Alvarado-Zamorano, C., Cañada, F., Mellado, V., & Garritz, A. (2013). Dificultades en el aprendizaje de acidez y basicidad y el conocimiento didáctico del contenido de profesores mexicanos de bachillerato. IX Congreso Internacional Sobre Investigación En Didáctica de Las Ciencias, 107–112.
- [2] Analog-Devices. (2013). Circuit note CN-0326. Isolated low power pH monitor with temperature compensation, Analog Devices.
- [3] Barrales, R., Reyes, N., Rodríguez, E., Barrales, V., Vázquez, E., & Medina, A. (2016). Medidor de pH, electro-conductividad y temperatura para cultivos hidropónicos. *Pistas Educativas*, (120), 736–758.
- [4] CCH-UNAM. (2016). Química II, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [5] Cheng, K. L., & Zhu, D. M. (2005). On calibration of pH meters. *Sensors*, 5(4), 209–219.
- [6] Dewi, L. W., Gumiwang, H., & Titisari, D. (2020). Effect of Temperature on pH Meter Based on Arduino Uno With Internal Calibration. *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics*, 2(1), 23–27.
- [7] ENP-UNAM. (2017a). Biología IV, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [8] ENP-UNAM. (2017b). Química III, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [9] Extech. (2015). ExStik waterproof pH meters pH100 and pH110, FLIR Systems, Inc.
- [10] Glab, S., & Hulanicki, A. (2005). pH. In P. Worsfold, A. Townshend, & C. Poole (Eds.), *Encyclopaedia of analytical science*, Second edition, Elsevier.
- [11] Grinias, J. P., Whitfield, J. T., Guetschow, E. D., & Kennedy, R. T. (2016). An Inexpensive, Open-Source USB Arduino Data Acquisition Device for Chemical Instrumentation. *Journal of Chemical Education*, 93(7), 1316–1319.

- [12] Hanna. (2016). Checker HI98103 tester de pH, Hanna Instruments.
- [13] Jin, H., Qin, Y., Pan, S., Alam, A. U., Dong, S., Ghosh, R., & Deen, M. J. (2018). Open-Source Low-Cost Wireless Potentiometric Instrument for pH Determination Experiments. *Journal of Chemical Education*, 95(2), 326–330.
- [14] Kubínová, Š., & Šlégr, J. (2015). ChemDuino: Adapting Arduino for Low-Cost Chemical Measurements in Lecture and Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 92(10), 1751–1753.
- [15] McMillan, G., & Cameron, R. (2005). *Advanced pH measurement and control*, third edition, ISA.
- [16] Myers, R. J. (2010). One-Hundred Years of pH. *Journal of Chemical Education*, 87(1), 30–32.
- [17] Naumann, R., Alexander-Weber, C., & Baucke, F. G. K. (1994). The standardization of pH measurements. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 349(8), 603–606.
- [18] Sheppard, N., & Guiseppe-Elie, A. (1998). pH measurement. In J. G. Webster (Ed.), *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, pp. 71-171-16, CRC Press.
- [19] Tenma. (2003). pH meter 72-6783, Tenma, a Premier Farnell Company.
- [20] Westcott, C. (1978). *pH Measurements* Academic Press.