



Automatización de una valoración volumétrica ácido-base como prototipo educativo

Automation of an acid-base volumetric titration as an educational prototype

Sara Marcela Arellano Díaz¹, José Luis Hurtado Chávez¹, Alejandro Ruelas Abonce¹ y Fabiola Estefanía Tristán Flores^{1*}

Recepción: 06/12/21
Aceptación: 11/04/22

Resumen

La utilización de prototipos en el proceso enseñanza-aprendizaje promueve en los estudiantes un mayor interés en el aprendizaje de la Química, para con ello mejorar, su capacidad de innovación, creatividad y resolución de problemas. El uso del microcontrolador de Arduino y sus sensores son ampliamente utilizados para el diseño de distintos prototipos, debido a su bajo costo, además cuenta con una programación simple y software de código abierto. Para la presente investigación, se desarrolló un prototipo educativo, el cual realiza una valoración volumétrica ácido-base de forma automatizada, formado por piezas mecánicas, eléctricas, así como de impresión 3D, en consecuencia puede ser implementado y mejorado en carreras de ingeniería donde la química es una asignatura fundamental.

Palabras clave

Arduino, Enseñanza, Prototipo, Química.

Abstract

The use of prototypes in the teaching-learning process promotes in students a greater interest in learning Chemistry, thereby enhance, their capacity for innovation, creativity and problem solving. The use of the Arduino microcontroller and its sensors are widely used for the design of different prototypes, due to their low cost, in addition to having simple programming and open-source software. For the present research, an educational prototype, was developed which performs an acid-base volumetric titration in an automated, way which is made up of mechanical, electrical, as well as 3D printing parts, in consequence can be implemented and improved in engineering careers where chemistry is a fundamental subject.

Keywords

Arduino, Teaching, Prototype, Chemistry.

¹Tecnológico Nacional de México en Celaya, México. * fabiola.tristan@itcelaya.edu.mx

Introducción

Principalmente para los ingenieros que se desempeñan en la industria, como los Ingenieros Químicos, Bioquímicos, Mecatrónicos, Mecánicos, una comprensión profunda de las interrelaciones entre los componentes eléctricos, mecánicos y de computadora será una habilidad vital para desarrollar productos y procesos innovadores y resolver problemas relacionados con la calidad (Erol et al., 2016; Garcés & Peña, 2020). El uso de prototipos presenta la ventaja de fomentar en los estudiantes sus habilidades de resolución de problemas, así como su capacidad de innovación y creatividad, debido a que estudiar o explicar los fenómenos reales directamente resulta ser muy complicado (Guevara S. & Valdéz, 2018). El proyecto Arduino se desarrolló por primera vez en Italia en 2005, fue creado como una plataforma electrónica de código abierto, que se basa en un hardware y software de fácil uso, el cual se puede programar usando un lenguaje de programación en código C/C++, con el microcontrolador Arduino se pueden diseñar prototipos orientados a la química (Torrente-Artero, 2013). Las ventajas que ofrece esta plataforma son las siguientes: ser una plataforma de bajo costo, multiplataforma, con programación simple, software y hardware de código abierto, además de ser equipado con una gran cantidad de pines analógicos y digitales, así como módulos de comunicación en serie, conexión USB y capacidad ICSP (Chandrasekaran et al., 2013). Existen una gran variedad de sensores que permiten la aplicación en la química, como el pH metro, el colorímetro, sensores de diferentes compuestos, dispensadores de volumen, entre otros, tales sensores se pueden utilizar para realizar automatizaciones, al poner a los sensores a interactuar con otros dispositivos mecánicos y eléctricos (Urban, 2014). En últimos años se a utilizado los sensores para medir la temperatura y pH, durante experimentos de docencia (Kubínová & Šlégr, 2015), en la construcción de fotómetros (McClain, 2014), en calorímetros (Vallejo et al., 2020), sensores para gases (Delgado-Castro & Rojas-Bolaños, 2015), en prototipos de producción de aceite en un sistema biológico controlado por Arduino (Brasileiro et al., 2016), entre otros. Dentro de las ventajas es que los valores obtenidos del experimento pueden ser mostrados en el momento en una computadora y ser analizados automáticamente, y así convertirlos a número de moles, absorbancia, o modelos de tendencia, entre otros, de esta manera evitamos los cálculos repetitivos y tediosos (Urban, 2014).

Dentro del Tecnológico Nacional de México (TecNM) la química es una de las asignaturas básicas para los estudiantes de ingeniería, los estudiantes de carreras como Mecatrónica, Mecánica, Industrial, Sistemas Computacionales exteriorizan su disgusto o poco interés en la asignatura ya que consideran que no la requieren para poder desarrollar su carrera. Sin embargo, consideramos que el desarrollo de un prototipo en el área de Química con apoyo del microcontrolador Arduino, además de ayudar a que los alumnos tengan un aprendizaje profundo, situado y significativo, fomentará el interés y curiosidad en la Química. El prototipo realiza una automatización de una valoración volumétrica ácido-base, el cual nos servirá para analizar conceptos básicos de Química como en la reacción de neutralización, utilizamos un potenciómetro conectado al microcontrolador Arduino para ir detectando el pH durante el procedimiento, el prototipo esta formado por un dosificador que suministra un volumen específico de una solución de NaOH dirigido por las lecturas de pH, lo cual nos permitirá determinar correctamente el punto de equivalencia de la valoración, con el objetivo de disminuir el error en la valoración ácido-base. Además, estudiantes de carreras como ingeniería de Química, Bioquímica, Ambiental entre otras,

pueden trabajar de manera multidisciplinaria en el desarrollo del prototipo, para el uso de estudiantes que cursen química como asignatura base.

Materiales y Métodos

La dosificadora cuenta con diversas partes, tanto electrónicas, mecánicas y de impresión 3D, en la figura 1 se muestran las partes que lo componen. Se utilizó un Arduino nano para controlar la dosificadora, se programó un menú el cual es mostrado en una pantalla LCD de 20 caracteres por 4 renglones (figura 1, A1), en el menú se puede realizar la calibración de la dosificadora indicando a cuantos pasos del motor equivale cierto volumen, la parte de la calibración solo es accesible si se inserta la llave en el interruptor de seguridad (figura 1, A2). El interruptor de botón *push* y el *joystick* (figura 1, A3 y A4 respectivamente), sirven para controlar el menú visualizado en la pantalla. La dosificadora cuenta con un mecanismo que controla el suministro del titulante, se utiliza un interruptor de final de carrera (figura 1, A5).

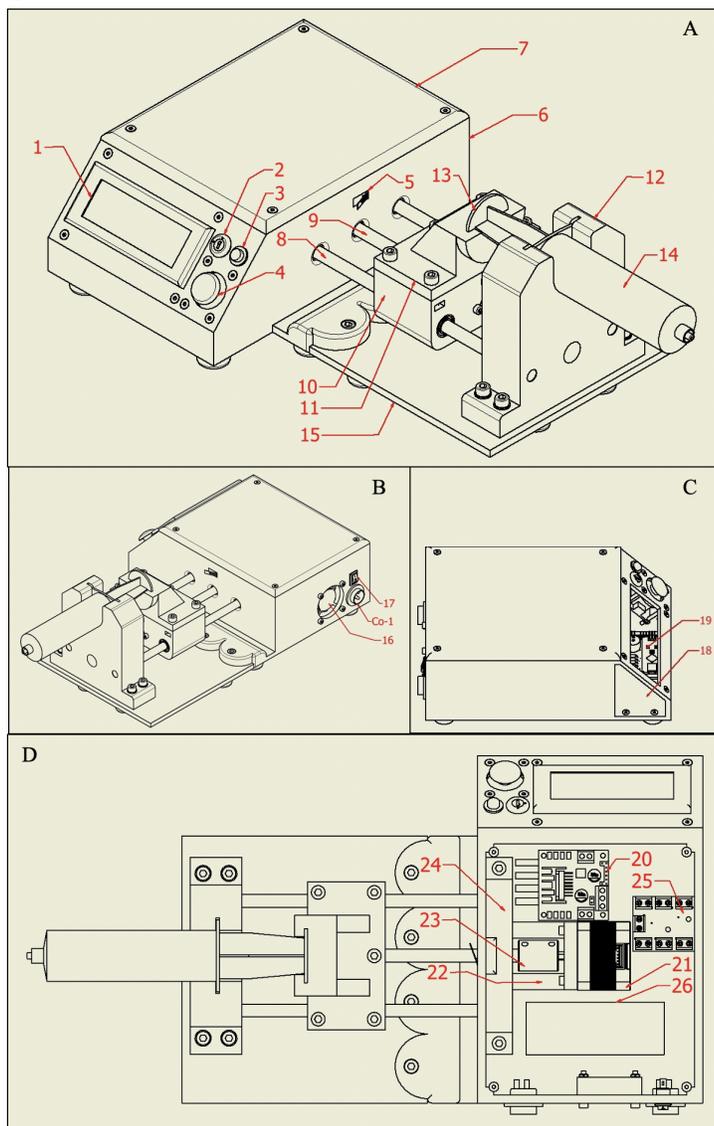


FIGURA 1. Dosificador Automático/Manual. **A. Vista frontal superior.**

1. Pantalla LCD 20x4, 2. Interruptor de seguridad, 3. Interruptor de botón *push*, 4. *Joystick*, 5. Interruptor de final de carrera, 6. Carcasa impresa parte A, 7. Carcasa impresa parte B, 8. Eje liso de 8 milímetros de diámetro, 9. Varilla roscada de 8 milímetros de diámetro, 4 hilos y 2 milímetros de paso, 10. mesa de desplazamiento, 11. Pieza impresa de agarre de jeringa A, 12. Pieza impresa de agarre para la jeringa B, 13. Embolo de jeringa, 14. Cuerpo de jeringa, 15. Carcasa impresa parte C. **B.**

Vista trasera superior. 16. Ventilador, 17. Interruptor general, Co-1. Conector serial a titulador. **C. Vista superior.** 18. Tapa lateral impresa. 19. Tarjeta principal de control.

D. Vista interna. 20. Puente H de control de motor, 21. Motor a pasos NEMA 17 de 1.8 grados por revolución y 12 volts/500mA, 22. Soporte Impreso para motor Nema 17, 23. Cople rígido de aluminio 5x8mm, 24. Pieza impresa lateral, 25. Tarjeta de distribución de voltajes, 26. Fuente 120VAC a 12VDC 3a 36w.

1, A5). El motor que brinda movimiento al sistema, así como el resto de las partes electrónicas son protegidos por una carcasa (figura 1, A6), la cual lleva atornillada una tapa en la parte superior (figura 1, A7). Retomando el mecanismo de dosificación, este cuenta con 3 ejes, 2 ejes lisos fijos (figura 1, A8) y un eje roscado (figura 1, A9) unido al motor el cual transmite la rotación y provoca el desplazamiento de la mesa de deslizamiento (figura 1, A10) debido a una tuerca unida fijamente debajo de dicha mesa, teniendo como resultado una transformación de movimiento angular a movimiento lineal por medio del mecanismo husillo-tuerca. La dosificadora cuenta con dos piezas de agarre de la jeringa, una pieza sostiene el embolo jeringa (figura 1, A11), la cual va montada fijamente sobre la mesa de deslizamiento y es la que provoca la salida

del titulante, y otra pieza fija que sostiene el cuerpo (figura 1, A12) e impide el movimiento de este. El motor debido a su fuerza producida tiende a calentarse por lo que se genera una corriente de aire que entra por unas aberturas debajo del motor y sale utilizando un ventilador (figura 1, A16) el cual expulsa el aire caliente. La dosificadora tiene un conector (figura 1, A CO-1) para la comunicación con el titulador y cuenta con un interruptor general (figura 1, A17) el cual enciende o apaga el sistema en su totalidad. Podemos observar en la vista superior (figura 1, C) que el titulador tiene una tapa (figura 1, C18), la cual se decidió debido a que nos da acceso al puerto USB del Arduino nano (figura 1, C19), montado en la placa de control justo detrás de la pantalla LCD. Dentro de la carcasa, como se ha dicho en líneas anteriores, se encuentran más partes electrónicas, tales como un módulo de puente H L298n (figura 1, D20), el cual recibe las señales de la tarjeta de control, y por medio de la alimentación recibida por la fuente de voltaje (figura 1, D25), genera los pulsos de voltaje para mover el motor en la dirección, velocidad y revoluciones indicadas.

Para evaluar el diseño de las 2 piezas sujetadoras de la jeringa, figura 1A pieza 11 y 12, se asume el máximo torque que puede proporcionar el motor, se realizó un análisis utilizando el software *Inventor autodesk*, primeramente, se determinó la fuerza mediante la fórmula simplificada:

$$T = F \cdot d$$

Donde:

T : Torque

F : Fuerza

d : distancia

El dosificador usa un motor a pasos modelo NEMA 17, el motor brinda un torque máximo de 0.3922 Nm, tomando en cuenta que este torque se transmite a través de un eje roscado de 8 mm de diámetro tomamos como distancia el radio de dicho eje el cual sería de 4 mm, obtenemos que la fuerza:

$$F = \frac{0.3922 \text{ N} \cdot \text{m}}{4 \times 10^{-3} \text{ m}} = 98.05 \text{ N}$$

La fuerza obtenida es la máxima que se aplica en el émbolo de la jeringa de forma ideal, por lo cual, si consideramos esta fuerza en nuestro análisis y en el diseño de la pieza, entonces la pieza superará las características necesarias para soportar las fuerzas reales que se le puedan aplicar en el dispositivo montado. Para la fabricación de estas piezas se utilizó filamento de ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA) el cual cuenta con las siguientes propiedades densidad de masa 1.25 g/cm³, límite de elasticidad 63.5 MPa, resistencia máxima 58.5 MPa, módulo de Young 3.5 GPa, coeficiente de Poisson 0.39 y módulo cortante 1.25 GPa.

Obtenida la fuerza y considerando las propiedades del material se procedió al análisis de las piezas, para la pieza que sujeta la cabeza del émbolo de la jeringa, pieza 11 figura 1A, se evaluó el esfuerzo utilizando un mallado el cual consta de 2585 elementos y 4692 nodos, utilizando el criterio de Von Mises (Lin, 1971).

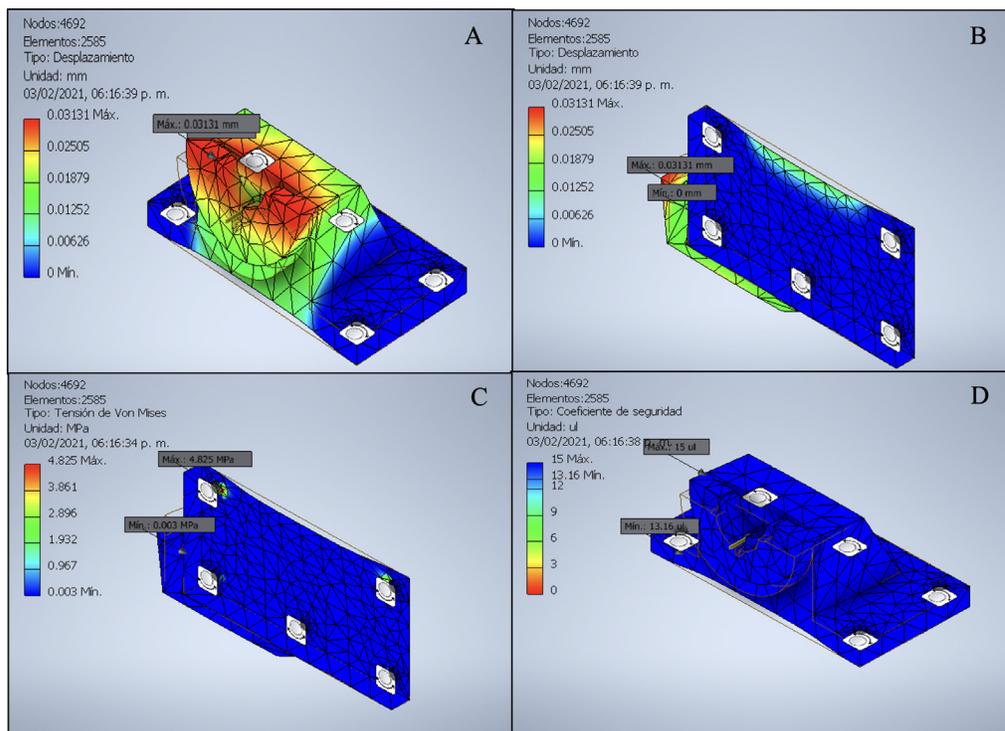


FIGURA 2. Análisis pieza 11. **A.** Análisis de deformación vista superior. **B.** Análisis de deformación vista inferior. **C.** Análisis de esfuerzo. **D.** Coeficiente de seguridad.

Del análisis se obtuvo como resultados que la deformación máxima será de 0.03131 mm, que el esfuerzo máximo será de 4.825 MPa, cuando el coeficiente de seguridad es menor a uno nos indica que hay una deformación permanente, el coeficiente de seguridad mínimo es de 13.16, por lo que la pieza soportará sin ningún problema la fuerza que regularmente el émbolo aplica sobre esta.

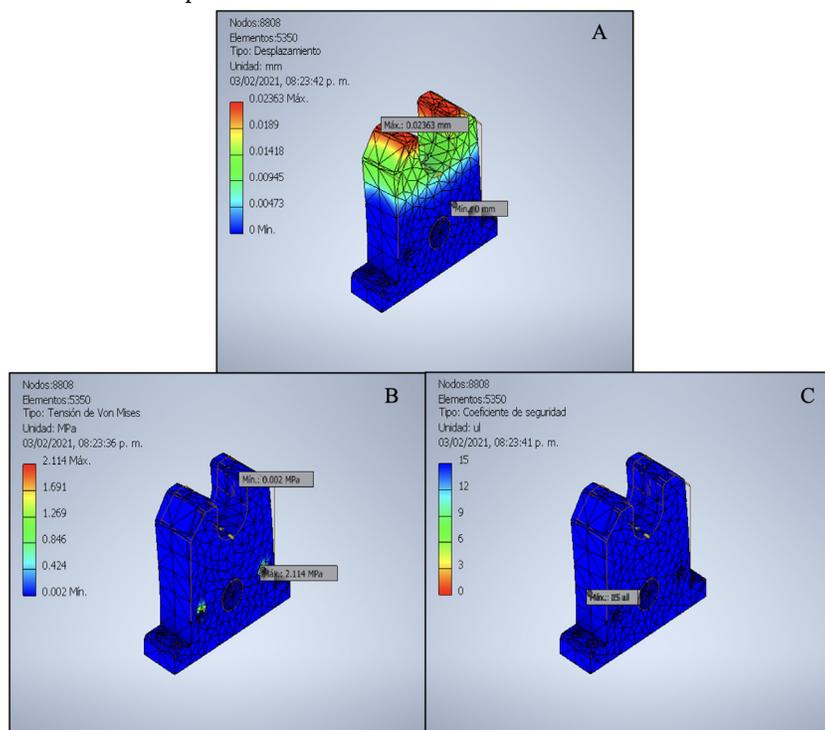


FIGURA 3. Análisis pieza 12. **A.** Análisis de deformación. **B.** Análisis de esfuerzo. **C.** Coeficiente de seguridad.

Para el análisis de la pieza 12, la cual tiene como función sujetar el cuerpo de la jeringa, se evaluó el esfuerzo utilizando un mallado el cual consta de 5350 elementos y 8808 nodos, utilizando el criterio de Von Mises.

Del análisis anterior resulta que la deformación máxima será de 0.02363 mm, que el esfuerzo máximo será de 2.114 MPa y que el coeficiente de seguridad mínimo es de 15 por lo que la pieza soportará sin ningún problema la fuerza que regularmente el émbolo aplica sobre esta. El análisis de los materiales se ve en asignaturas como ciencia e ingeniería de materiales y en mecánica de materiales, cursada por es estudiantes de ingeniería en Mecánica, Mecatrónica, entre otras, donde la química es una de las áreas base, por lo que es importante hacer hincapié en los estudiantes la importancia de la química.

La carcasa del prototipo figura 1A-7, se diseñó tomando en cuenta las dimensiones de los diversos componentes electrónicos y el recorrido de la jeringa. La dosificadora cuenta con 3 placas electrónicas, un joystick, una pantalla LCD con un módulo I2C para una conexión más sencilla, un ventilador de dos pulgadas, 4 interruptores diversos, y un motor a pasos, estos elementos se encuentran conectados entre sí, el sistema es alimentado por una fuente de 12v a 3A. A continuación, se muestra en la figura 4 el diagrama general de conexiones, internamente la tarjeta principal de control y la tarjeta de distribución de voltajes están conectadas como se muestra en la figura 4 B.

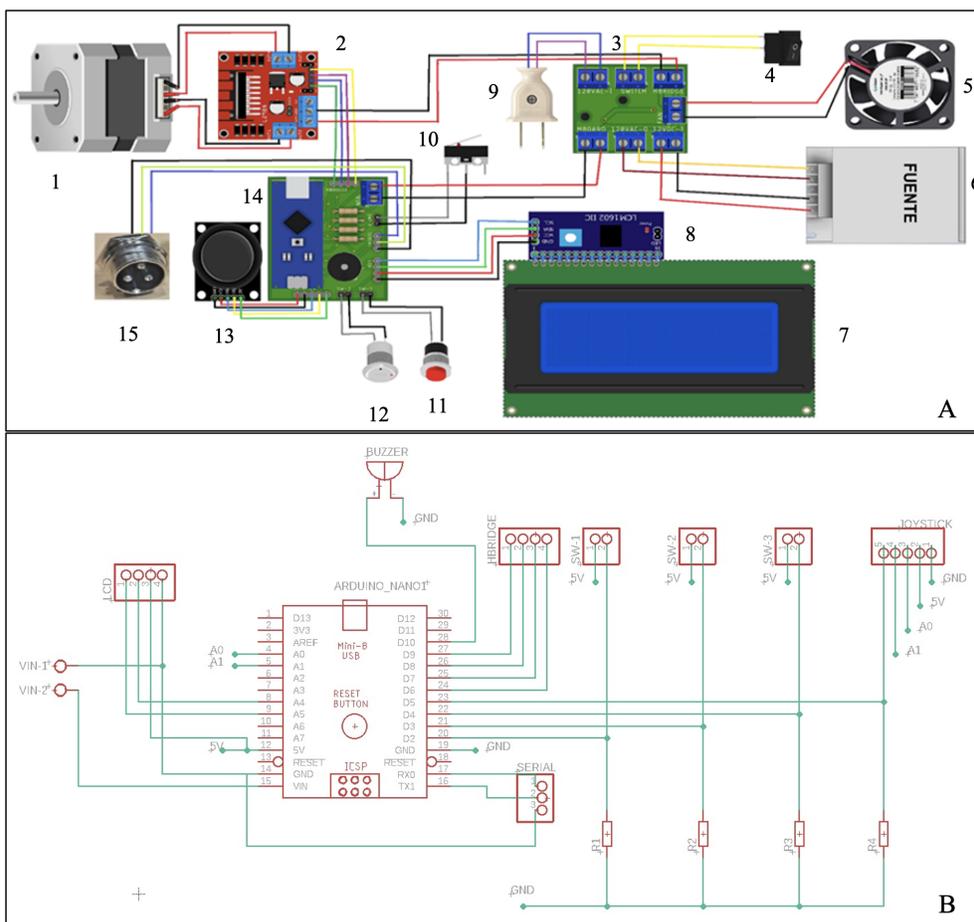
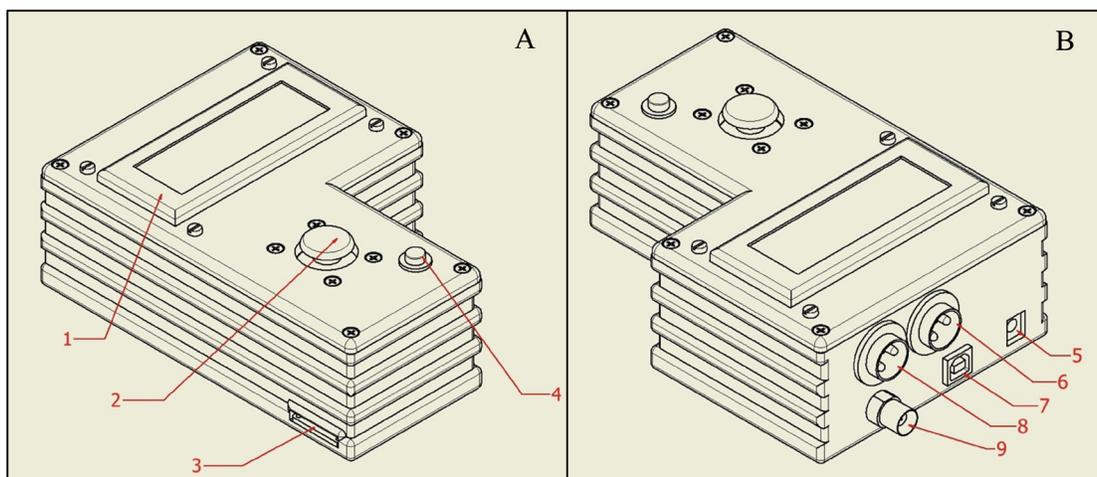


FIGURA 4. Diagrama de conexiones dosificador. A. Conexiones generales. 1. Motor a pasos, 2. Puente H L298, 3. Tarjeta de distribución de voltajes, 4. Interruptor general, 5. Ventilador, 6. Fuente 127VAC a 12VDC 3 A, 7. Pantalla LCD 20x4, 8. Módulo serial I2C para LCD, 9. Enchufe, 10. Interruptor de final de carrera, 11. Interruptor de botón *push*, 12. Interruptor de seguridad, 13. *Joystick*, 14. Tarjeta de control con Arduino Nano, 15. Conector serial a titulador.

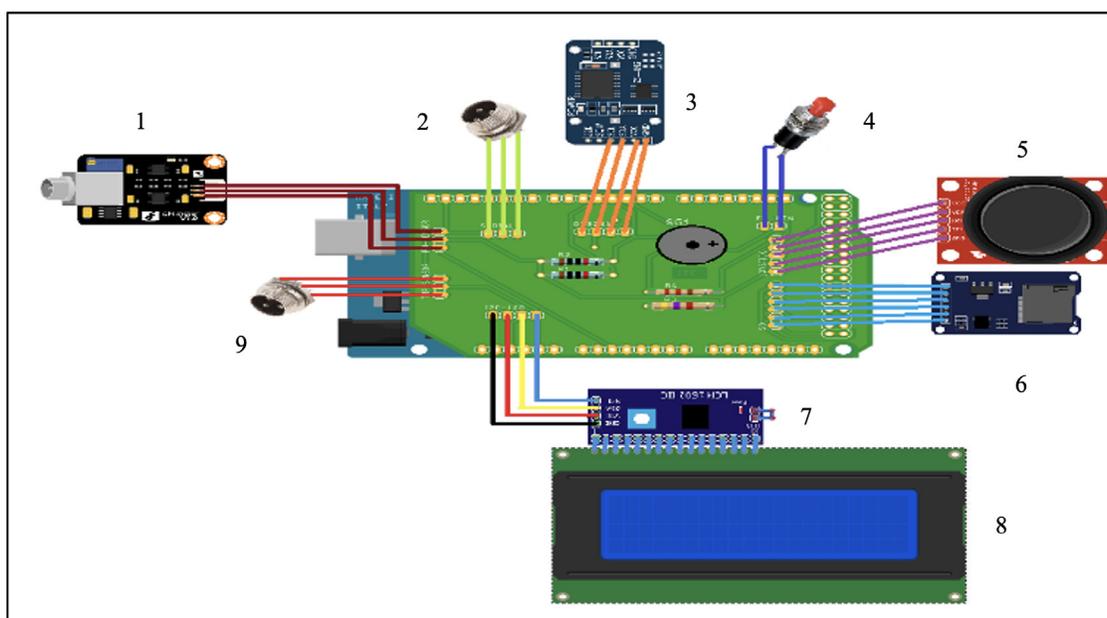
Con el Titulador se pueden realizar titulaciones ácido-base de forma manual o automática, para utilizarlo en su forma automática se conecta al dosificador mediante un conector tipo gx 16-3. En la figura 5 se presenta el prototipo del Titulador y sus botones de operación. En su operación en modo automático, una vez que se termina el proceso de titulación, los datos se pueden visualizar en una pantalla LCD y se guardan en una memoria microSD. Los datos almacenados en la memoria contienen la información sobre de la fecha y la hora en la que se realizó el experimento, esto gracias a que se tiene un módulo de reloj en el interior. En su operación en modo manual, el titulador funciona como un medidor de pH.

FIGURA 5. Titulador. **A. Vista frontal.** 1. Pantalla LCD 20x4, 2. Módulo Joystick, 3. Slot para memoria microSD, 4. Botón “atrás”. **B. Vista trasera.** 5. Conector de alimentación externa 12 V, 6. Conector tipo gx 16-3 para el Dosificador, 7. Conector USB a computadora, 8. Conector para sensor de temperatura, 9. Conector para sensor de pH.



Los dispositivos electrónicos usados para la implementación del Titulador se muestran en la figura 6. El sensor de pH utilizado fue DFRobot SEN0161 el cual tiene una precisión de ± 0.1 con un rango de medición de 0-14 con un costo aproximado de 35 dólares, el dispositivo más caro utilizado. El sensor de temperatura utilizado fue el sensor DS18B20 tiene una precisión de ± 0.5 grados, con un rango de operación de -50 a 125°C, encapsulado en acero inoxidable lo que le permite estar en la reacción de neutralización ácido-base.

FIGURA 6. Diagrama de conexiones titulador. 1. Módulo y conector para el sensor de pH. 2. Conector Hembra gx16-3 para comunicación serial 3. Módulo de reloj ds3231 4. Botón “atrás”. 5. Módulo joystick 6. Módulo lector de memorias microSD 7. Módulo I2C para pantallas LCD 8. Pantalla LCD 20x4. 9. Conector Hembra gx16-3 para conexión de sensor de temperatura.



El código del dosificador tiene la condición de que conforme aumenta el pH se va dosificando una menor cantidad del titulante valorado y se detiene cuando detecta un pH mayor a 11. Para comenzar la corrida se conecta el Titulador con el dosificador, utilizando para ello el cable gx-16 H-H, figura 5 núm.8, con Co-1 de la figura 1. Posteriormente se conecta el sensor de temperatura en el Titulador, figura 5 núm. 6 y el sensor de pH, figura 5 núm. 9. Se fija la pinza en el soporte universal a una altura que permita una separación aproximada de 1 pulgada entre la pinza, el vaso de precipitado, el cual se coloca encima del agitador magnético, en la pinza anclada sobre el soporte universal sostenemos el sensor de temperatura y el sensor de pH de tal manera que esté ubicado al fondo del vaso de precipitado, pero sin tocar las paredes y evitando que choque con la barra agitadora. Se vierten 20 mL de una solución de ácido clorhídrico al 0.1 M, en el vaso de precipitado utilizando una pipeta volumétrica de 20 mL, también se añaden 2 gotas de fenolftaleína y la barra de agitación la cual movemos con ayuda del agitador magnético. Llenamos la jeringa con hidróxido de sodio a una concentración de 0.1 M, en la figura 7 se muestran los prototipos y el montaje listo para la valoración volumétrica.

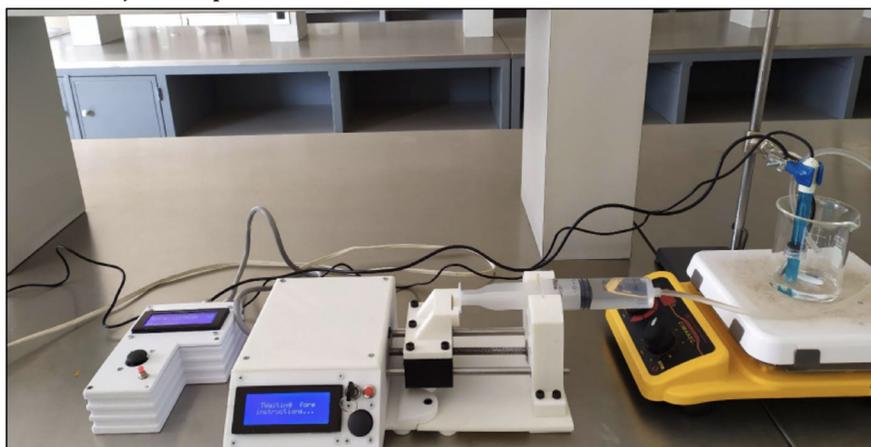


FIGURA 7. Dosificador y Titulador conectados.

Para configurar el Titulador se selecciona funciones, después titulador, seguido de la opción de automático, posteriormente nos preguntará el volumen del analito con la palanca indicamos que son 20 ml y la molaridad de titulante, es este caso es NaOH a 0.1 M (figura 8).



FIGURA 8. Instrucciones para el Titulador: A. Primer menú: funciones y configuración. B. Segundo menú: titulador y medición de pH. C. Tercer menú, se indica el volumen del analito. D. Cuarto menú, se indica la molaridad del titulante.

Para el dosificador seleccionamos la opción de modo automático, entonces el dosificador nos indica que removamos la jeringa, la removemos y presionamos OK, se moverá el mecanismo esperamos a que termine, colocamos la jeringa con el titulante e iniciamos con la purga de la jeringa para quitar burbujas e indicamos cuando terminamos presionando el botón rojo.



FIGURA 9. Instrucciones para el Dosificador. **A.** Modo automático. **B.** Removemos la jeringa. **C.** Realizamos la purga. **D.** Terminamos la purga.

Colocamos la manguera en el vaso de precipitado, en el titulador indicamos que comience la titulación, el sensor de pH irá midiendo el pH de la solución en el vaso de precipitado y esto dirigirá el volumen de NaOH suministrado por el dosificador; esperamos a que la titulación automática concluya, se realizaron tres corridas, los resultados de las valoraciones se guardan en la memoria microSD. Los estudiantes y docentes pueden trabajar de manera multidisciplinaria en el desarrollo del prototipo y mejorarlo. La propuesta es que realicen la práctica en la asignatura de Química o Química Inorgánica estudiantes de ingeniería de carreras como: Química, Bioquímica, Ambiental, Electrónica, Mecánica, Mecatrónica, Sistemas Computacionales, entre otras, de preferencia mezclar carreras en los grupos de trabajo, con la finalidad de que se aporten diferentes puntos de vista, conocimientos, para la mejora del prototipo, así como el desarrollo otros prototipos con un enfoque multidisciplinario e integral. Para el desarrollo de la práctica los estudiantes deberán tener un manual, que les indique como realizar las conexiones entre el dosificador y titulador, titulador con el sensor de pH, así como el montaje del soporte universal, agitador magnético, vaso de precipitado, piezas entre otras. Posteriormente se realizaría la valoración volumétrica de manera automática, el estudiante podrá extraer la información de la memoria microSD, realizar la gráfica en alguna hoja de cálculo y al final el docente puede retirar la carcasa y explicaría el diseño.

Resultados

Los experimentos los realizó un estudiante de la carrera de Mecatrónica, el cual apoyo en el desarrollo del prototipo. Después del montaje al analito le adicionamos dos gotas de

fenolftaleína como indicador, el cual en una valoración ayuda a identificar de manera visual el punto final de la valoración volumétrica, en este punto no ocurre la neutralización, a ese punto se le conoce como punto de equivalencia donde existen concentraciones equivalentes estequiométricamente entre los iones de H^+ y OH^- (Harvey, 2000; Robinson et al., 2021). En la figura 11 A podemos visualizar que el prototipo logró identificar el punto de equivalencia, como muestra la imagen indica que no hay estabilidad debido a que el cambio de pH en esta etapa es muy rápido, el prototipo realiza una lectura de pH cada segundo, se indica que hay estabilidad cuando se toman 5 lecturas de pH y hay una diferencia menor al 5% entre estas lecturas.

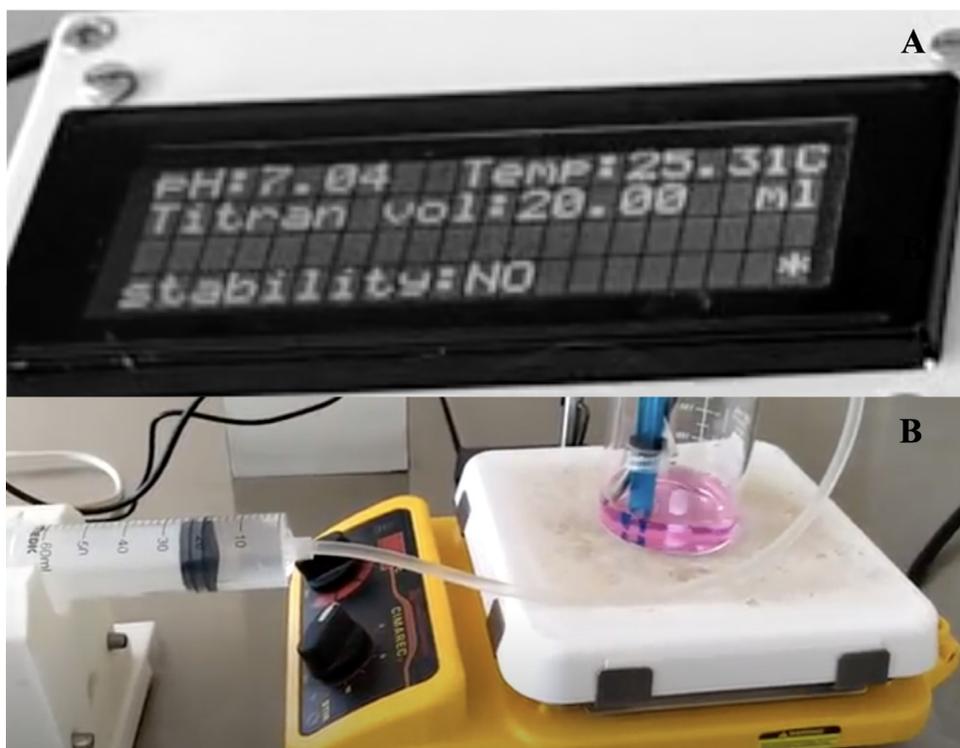


FIGURA 10. Valoración volumétrica terminada. **A.** Punto de neutralización. **B.** Punto de viraje.

Las lecturas realizadas se registraron en la memoria microSD, el cambio de pH con respecto al volumen de NaOH a 0.1 M suministrado, con esta información realizamos las curvas de titulación de la valoración volumétrica, se graficó los mL gastados del NaOH, el titulante, contra el pH promedio de las tres corridas, la gráfica consta de 3 fases esencialmente, la fase 1 en la cual el pH no varía considerablemente con una adición de la solución titulante, como se muestra en la gráfica la desviación estándar fue pequeña con un rango de ± 0.03 a ± 0.1 , en la fase 2 es la más importante y representativa ya que al acercarse al punto de equivalencia el pH sufre grandes cambios con una mínima adición de solución titulante, esta fase permite determinar el pH en el punto de equivalencia, podemos observar en la gráfica que el punto de equivalencia ocurre cuando gastamos 20 mL de NaOH a 0.1 M, en este punto hay una desviación estándar de ± 0.53 y la fase 3 donde el pH aumenta rápidamente, el rango en la desviación estándar es de ± 0.1 a ± 0.25 . Podemos observar que en la etapa 2 hay grandes cambios de pH, debido a las pequeñas variaciones en el volumen suministrado afectan considerablemente el pH, el prototipo registra la lectura hasta que hay estabilidad.

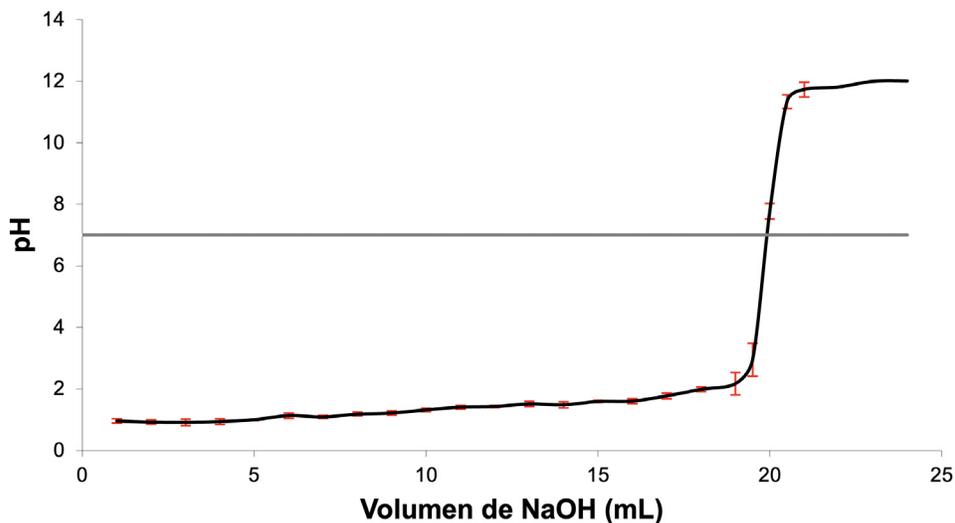


FIGURA 11. Curva de titulación en la valoración volumétrica.

Para que un prototipo sea considerado como óptimo en el aprendizaje debe considerar las siguientes características: facilitar la visualización y/o comprensión conceptual del objeto modelado y permitir un tratamiento cuantitativo que facilite una adecuada interpretación y que además constituya una primera aproximación al comportamiento del objeto que el modelo o prototipo representa (Guevara S. & Valdéz, 2018). El prototipo cumple con estas características lo cual nos lleva a proponer que será de gran apoyo en el proceso de enseñanza-aprendizaje, por tanto llevara a fomentar en los estudiantes sus habilidades de resolución de problemas, además de ser un prototipo de bajo costo.

Conclusiones

La construcción del prototipo permitirá que los estudiantes realicen valoraciones volumétrica ácido-base automatizadas con una interfaz accesible, donde podrán almacenar en la memoria micro SD, los valores a medir durante la valoración volumétrica, tales como: los mililitros a utilizar de NaOH utilizados y el pH obtenida durante la titulación; con estos datos, los estudiantes serán capaces de obtener su gráfica de titulación para identificar el punto de equivalencia. Además, el prototipo tiene un costo y diseño accesible, el cual puede servir como base para prototipos similares o mejorados, incentivando el trabajo multidisciplinario de estudiantes de varias especialidades. Es importante enfatizar que el diseño de prototipos educativos será de gran ayuda durante el proceso enseñanza-aprendizaje por parte de los estudiantes y será un factor de alta importancia para despertar el interés por la Química, la programación y el diseño de prototipos para el estudio de otros temas importantes en la misma asignatura.

Bibliografía

Chandrasekaran, S., Stojcevski, A., Littlefair, G., & Joordens, M. (2013). This is the published version Project-oriented design-based learning: aligning students' views with industry needs Project-Oriented Design-Based Learning: Aligning Students' Views with Industry Needs*. *International Journal of Engineering Education*, 29(5), 1109–1118. <http://hdl.handle.net/10536/DR0/DU:30056843>

- Delgado-Castro, A., & Rojas-Bolaños, O. (2015). Construcción de un sistema de bajo costo para el uso y evaluación de sensores semiconductores para gases. *Educación Química*, 26(4), 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.07.001>
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihm, W. (2016). *Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production*. 54, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.162>
- Garcés, G., & Peña, C. (2020). Ajustar la Educación en Ingeniería a la Industria 4.0: Una visión desde el desarrollo curricular y el laboratorio. *Revista de Estudios y Experiencias En Educación*, 19(40). <https://doi.org/10.21703/rexe.20201940garces7>
- Guevara S., M., & Valdéz, R. (2018). Los modelos en la enseñanza de la Química. Algunas de las dificultades asociadas a su enseñanza y a su aprendizaje. *Educación Química*, 15(3), 243. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2004.3.66181>
- Harvey, D. (2000). *Modern analytical chemistry* (Vol. 798). McGraw-Hill.
- Kubínová, Š., & Šlégr, J. (2015). ChemDuino: Adapting Arduino for Low-Cost Chemical Measurements in Lecture and Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 92(10). <https://doi.org/10.1021/ed5008102>
- Lin, T. H. (1971). *Physical Theory of Plasticity*. [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70344-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70344-2)
- McClain, R. L. (2014). *Construction of a Photometer as an Instructional Tool for Electronics and Instrumentation*. <https://doi.org/10.1021/ed400784x>
- Brasileiro, P. F., Meira, H. M., Luna, J. M., Rufino, R. D., dos Santos, V. A., & Sarubbo, L. A. (2016). Oil Bioremoval Prototype Controlled by Arduino Utilizing the Biosurfactant Produced by *Candida Guilliermondii*. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 49, 505–510.
- Robinson, J. W., Skelly Frame, E. M., & Frame, G. M. (2021). *Instrumental Analytical Chemistry*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b21879>
- Torrente-Artero, Ó. (2013). *Arduino. Curso práctico de formación* (1st ed.). Alfaomega Grupo Editorial.
- Urban, P. L. (2014). Open-source electronics as a technological aid in chemical education. *Journal of Chemical Education*, 91(5), 751–752. <https://doi.org/10.1021/ed4009073>
- Vallejo, W., Diaz-Uribe, C., & Fajardo, C. (2020). Do-it-yourself methodology for calorimeter construction based in Arduino data acquisition device for introductory chemical laboratories. *Heliyon*, 6(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03591>