

# Dispositivo experimental de bajo coste para el estudio y aprendizaje del efecto de la temperatura en la producción de hidrógeno mediante electrólisis

E. F. Cabrera<sup>\*a</sup>, D. Echeverría<sup>b</sup>, V. Henríquez<sup>a</sup>, A. Ramos<sup>\*a</sup> y F. Romero<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Departamento de Ingeniería de Procesos E.I.I.C, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria Campus Universitario de Tafira - Tafira Baja s/n, 35017 Las Palmas (España)

<sup>b</sup>Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería  
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria (España)

## RESUMEN

En este artículo se presenta un dispositivo experimental, para estudiar y aprender de una forma visual y práctica el efecto que causan factores como la temperatura en un fluido líquido implicado en un proceso determinado, haciendo uso de un sistema embebido de bajo coste (*Arduino Uno*), siendo en este caso la producción de hidrógeno gaseoso contenido en microburbujas generadas a través de un proceso de electrólisis. Este diseño se ha realizado a partir del desarrollo del Trabajo de Fin de Grado, de una estudiante de Grado en Ingeniería Química, impartido en la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Destaca la versatilidad del sistema, para plantear diferentes situaciones, y por la utilización de herramientas libres y de código abierto. Esto último, permite modificar el diseño y condiciones de ensayo, de forma rápida, por estudiantes y/o por docentes. Se muestran resultados obtenidos de una serie de ensayos realizados en distintas situaciones con los que se puede observar claramente el efecto estudiado, y donde queda reflejada la utilidad del diseño experimental para comprender y aprender el objetivo propuesto.

**Palabras clave:** Innovación educativa, Temperatura, Electrólisis, Fluido, Aprendizaje, Bajo coste, Sistema embebido.

## 1. INTRODUCCIÓN

La temperatura es un factor que influye en el comportamiento y características de los fluidos [1], tales como la densidad y viscosidad, aspecto que se debe entender y comprender a través de la interpretación de los datos aportados por sensores, con el objetivo de tener un control sobre los procesos industriales en los que se empleen estos fluidos. De esta manera se pueden aplicar mejoras y optimizaciones para aumentar la eficiencia del proceso y disminuir, en lo posible, determinados costes.

Es así, que resulta interesante crear estrategias de aprendizaje basadas en la construcción y uso de artefactos o diseños experimentales diseñados para el control de procesos, sistemas de adquisición y tratamiento de datos experimentales, con los que se promueva el estudio de los mismos y el análisis de las cuestiones planteadas. Estrategias que sirvan de ayuda al alumnado a reforzar conocimientos en un ambiente experimental, a través del planteamiento de diversas situaciones durante el desarrollo de un proceso determinado, tal y como se expone en diversos trabajos [2-5]. Estos dispositivos pueden ser desarrollados como prototipos, en los que se presenta la posibilidad de emplear sistemas embebidos de bajo coste, lo que permite una gran versatilidad en el diseño de experimentos [3,4, 6-8].

El objetivo de este artículo es mostrar un diseño experimental de bajo coste, para ayudar a los estudiantes de ingeniería a aprender y comprender el efecto que tiene la temperatura en el comportamiento de un fluido, variables implicadas en la producción de hidrógeno a través de un proceso de electrólisis generado a distintos valores de tensión. Cabe destacar que este diseño ha derivado en publicaciones como la de Cabrera et al [9], además de otras que se encuentran en desarrollo.

\*e-mail: eliana.cabrera101@alu.ulpgc.es, alejandro.ramos@ulpgc.es.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar el objetivo del experimento es necesario crear un entorno de estudio y evaluación del proceso, donde se llevan a cabo las pruebas y tomas de datos necesarias. En la Figura 1 se muestra el dispositivo en cuestión. Consta de una columna donde tiene lugar el proceso de electrólisis soportada en una base donde se sitúan los sistemas de medición, refrigeración así como las fuentes de alimentación.



Figura 1. Dispositivo experimental y entorno de estudio.

### 2.1 Materiales

Alrededor del dispositivo experimental, se emplean una serie de equipos y elementos fundamentales para el estudio. Estos son los siguientes:

1. En el proceso de electrólisis es necesario disponer de dos electrodos: ánodo (Cu) y cátodo (Al). En este trabajo, ambos terminales han sido diseñados intrínsecamente, siendo el resultado producto del estudio de Cabrera et al [9], donde se pone especial atención en el cátodo (Fig. 2).



Figura 2. Electrodos: cátodo y ánodo.

Mediante la aplicación de tensión a cada electrodo se produce el proceso de electrólisis del agua generando así microburbujas de hidrógeno. Es importante tener una adecuada conductividad en el agua para garantizar la eficiencia de la electrólisis. Para ello se aumenta la conductividad del agua mediante la adición de cloruro sódico. El valor de conductividad se mantiene constante para cada ensayo siendo éste 32,7 mS.

2. Sistema de refrigeración compuesto principalmente por dos células de Peltier, un ventilador centrífugo y una aleta de refrigeración.

El efecto Peltier consiste en hacer pasar una corriente por un circuito compuesto de materiales diferentes cuyas uniones están a la misma temperatura, se produce el efecto inverso al *Seebeck* (efecto termoelectrico). En este caso, se absorbe calor en una unión y se desprende en la otra.

El fenómeno se aprovecha con más eficacia a través de las células de Peltier, alimentando una de estas células se establece una diferencia de temperatura entre las dos caras de la célula Peltier. Esta diferencia depende de la temperatura ambiente donde esté situada la célula, y del cuerpo que se quiere enfriar o calentar. En este caso se utilizan dos células montadas en serie para enfriar justo debajo del sistema. Estas células son eficaces refrigerando, y dado su reducido tamaño, las hace ideales para sustituir costosos y voluminosos equipos de refrigeración asistida por gas o agua.

El ventilador centrífugo de 12V es instalado en la base del equipo en modo de extracción, haciendo de soporte de refrigeración del sistema junto con las células Peltier. Además, se le agrega una aleta de refrigeración que estará en el interior de la columna electrolítica.

3. Cuatro termistores tipo *NTC* (*Negative Temperature Coefficient*). Estos son sensores no lineales cuya resistencia disminuye a medida que el valor de temperatura aumenta. Se emplean dos modelos distintos (dos de cada uno): tipo perla o encapsulado de resina epoxi y tipo argolla o de contacto. Esto se debe a las condiciones características a las que se encuentran los distintos puntos de medición del artefacto experimental. De tal forma que se obtienen valores de:

- $T_{amb}$ ; La temperatura ambiente es un valor que se emplea de referencia, para obtener este dato el termistor se sitúa cerca del dispositivo.
- $T_{fluido}$ ; Este valor se relaciona con la temperatura del fluido en el que se produce la electrólisis, es decir, el electrolito. Por lo tanto, el termistor se coloca dentro del dispositivo experimental y en contacto con el electrolito.
- $T_1$ ; Refleja el dato obtenido de la parte fría de la primera célula Peltier.
- $T_2$ ; Dato recogido de la parte caliente de la segunda Peltier asociada en serie.

4. Dos divisores de tensión, Fig. 3, utilizados para la estimación del valor de la resistencia del termistor, empleando la medición de la tensión del divisor, la cual está relacionada con la temperatura alcanzada en cada transductor.

La casa comercial de los termistores proporciona unas tablas con los valores de temperatura y resistencia calculados para  $T_N = 25\text{ }^\circ\text{C}$  y un rango amplio de temperaturas para cada modelo de termistor. Con los datos correspondientes de resistencia para temperaturas desde  $0\text{ }^\circ\text{C}$  a  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , se calculan las tensiones de salida con la ecuación 1, que corresponde con la expresión matemática a la cual responde el divisor de tensión:

$$V_0 = R_0 \left( \frac{V_{cc}}{R_{NTC} + R_0} \right) \quad (1)$$

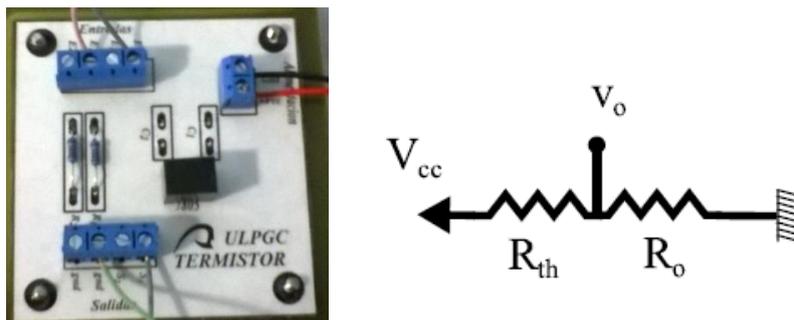


Figura 3. Divisor de tensión.

Con los valores de tensión obtenidos y sus correspondientes valores de temperatura, se ajusta a un polinomio característico para cada tipo de termistor, tal y como se muestra en las ecuaciones (2) y (3):

$$T = 1.2008V^3 - 7.858V^2 + 35.011V - 32.189 \quad (2)$$

$$T = 9 \cdot 10^{-6}V^3 - 0.0005V^2 + 0.0456V - 1.1731 \quad (3)$$

A partir de estas expresiones se obtienen los valores de temperatura correspondiente a las señales suministradas por los NTC instalados en los distintos puntos del equipo.

5. Una cámara de captación de imágenes con la que se realiza el seguimiento visual del proceso de electrólisis.
6. Un sistema de adquisición de datos formado por un microcontrolador Atmel modelo ATmega32U4 implementado en una placa *Arduino Uno*, como se muestra en la Figura 4. Este microcontrolador es el responsable del control de los procesos de medición de la tensión de los divisores de tensión de los distintos termistores. Además, del envío de los datos obtenidos al PC por comunicación USB, para su almacenamiento.



Figura 4. Arduino Uno.

7. Un PC cuya utilidad es configurar el sistema embebido y almacenar los datos obtenidos y suministrados por el *Arduino Uno*. Empleando el *software Processing (Processing Foundation)* se realiza un código de programación en lenguaje javascript, que genera una interfaz que comunica el PC con el sistema embebido. Con el *software Scilab (Scilab Enterprises)* se realiza el tratamiento de los datos obtenidos y el control de captación de imágenes.
8. Dos fuentes de alimentación. Una de ellas tiene como objetivo generar una tensión  $V_{cc}$  para que tenga lugar la electrólisis a través de los terminales (cátodo y ánodo) conectados a ella. Otra de las fuentes alimenta el ventilador centrífugo.

## 2.2 Procedimiento

Los ensayos se caracterizan por un procedimiento sencillo y repetitivo, donde en primer lugar se pone en marcha la fuente que alimenta los terminales (ánodo y cátodo) que conforman el circuito que produce la electrólisis. Desde aquí se aplican distintas tensiones, marcando esto la diferencia entre cada experimento a realizar. Estas tensiones producen una convección desde el cátodo al entorno fluido acelerado también por las turbulencias generadas por el microburbujeo. Estas variaciones de temperatura son captadas por el sensor sumergido. Además, el sistema de refrigeración ayuda a mantener la estabilidad térmica en la columna electrolítica, esto queda reflejado en los valores captados por los termistores localizados en el mismo.

El *Arduino Uno* leerá las señales de los sensores *NTC* para enviarlas al ordenador donde se guardan. Se crea un entorno *Processing* para construir una interfaz gráfica donde activar/desactivar la toma de datos por parte del *Arduino*. El *Processing* será el responsable de tomar los datos que aporta el microprocesador y generar un fichero para su posterior tratamiento.

Con el programa *Scilab* se desarrolla una subrutina que lee el archivo donde se almacenan los datos recibidos por el *Arduino* y se determinan los valores de temperaturas medidas por los sensores a través de las ecuaciones (2) y (3).

La cámara de captación de imágenes será una herramienta fundamental para registrar el comportamiento del microburbujeo durante los ensayos, siendo este el proceso de control del sistema.

## 3. RESULTADOS

La obtención de datos se realizan a diferentes tensiones aplicadas a los electrodos y las señales de cada sensor *NTC* se adaptan (según el modelo) con las ecuaciones 2 y 3 a los valores de temperatura.

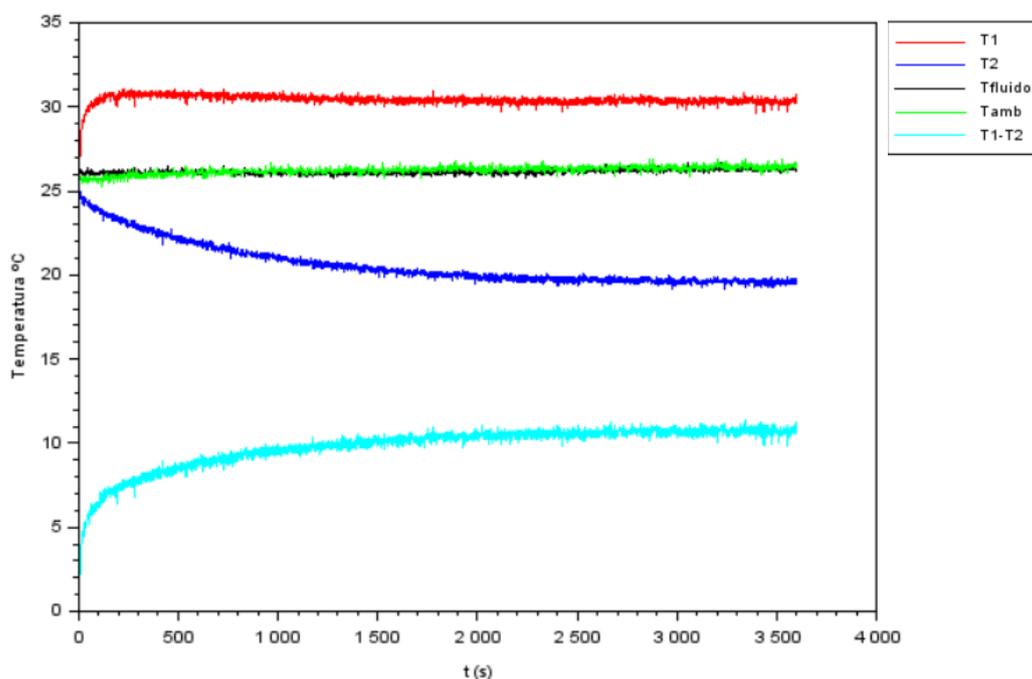


Figura 5. Evolución de temperaturas a tensión seleccionada de 2V en la fuente de alimentación para electrólisis.

En la Figura 5 se grafican los datos recogidos de temperatura para un proceso de electrólisis a 2V durante 1 hora de muestreo con una frecuencia de 1 dato por segundo. La evolución de datos en cian hace referencia a la diferencia entre la

temperatura del lado caliente y la temperatura del lado frío presentes en la configuración de las células de Peltier. Esto da una imagen de la estabilidad térmica que alcanzan ambos datos (línea de datos roja y azul son paralelas entre sí). El efecto visual se refleja en el microburbujeo mostrado en la Figura 6.

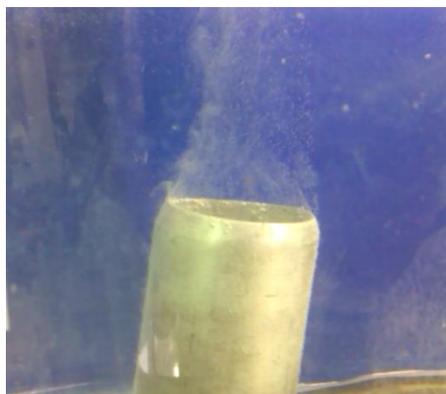


Figura 6. Microburbujeo generado a una tensión de 2 V.

La nube de microburbujas es poco densa y no se generan turbulencias apreciables, por lo que se traduce en una producción baja de hidrógeno.

Las diferencias se aprecian claramente si se observan los resultados obtenidos para una tensión de 8V durante 1 hora con la misma frecuencia de muestreo (Fig. 7), donde destaca el aumento de temperatura reflejado en el desplazamiento de las líneas de datos correspondientes a las células.

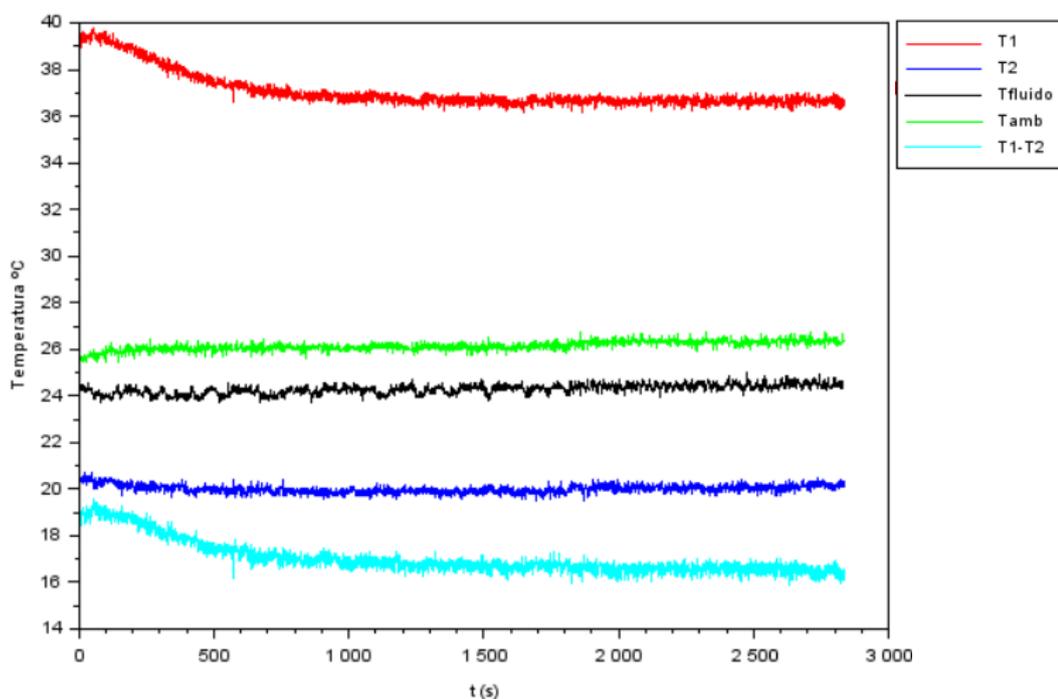


Figura 7. Evolución de temperaturas a tensión seleccionada de 8V en la fuente de alimentación para electrólisis.

Se aprecia un enturbiamiento en el seno del fluido electrolítico (Fig. 8) que se desplaza a lo largo de toda la columna, esto se debe a un aumento en la producción de hidrógeno gaseoso, dando lugar a turbulencias y una distribución dispareja de las microburbujas.



Figura 8. Microburbujeo generado a una tensión de 8 V.

La aplicación de una determinada tensión produce que el material del que está compuesto el cátodo aumente de temperatura, y como consecuencia se produce un flujo térmico (convección) hacia la porción de fluido que rodea al terminal haciendo que en este punto aumente la temperatura del electrolito. Además, estas diferentes tensiones producen distintos regímenes de producción y distribución de microburbujas de hidrógeno. Las microburbujas de hidrógeno tienen también un papel fundamental en el comportamiento de las distintas capas térmicas dispuestas a lo largo de toda la columna de electrolito, creando pequeñas turbulencias y por lo tanto un movimiento de estas capas. Como consecuencia esto ayuda a alcanzar la estabilidad térmica.

Se observa una clara diferencia entre las gráficas (Fig. 5 y 7) en el intervalo de temperaturas de operación de las células de Peltier.

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se muestra un dispositivo experimental para el estudio del efecto de la temperatura sobre un fluido líquido en un proceso de electrólisis, en el que se emplea un sistema embebido (*Arduino Uno*). Los resultados obtenidos para el estudio corresponden a dos ensayos diferentes con tensiones en la columna electrolítica de 2 y 8V, donde junto con las imágenes se verifica el cambio en la producción y características de las microburbujas de hidrógeno generadas en el cátodo en el proceso de electrólisis. El diseño permite crear un ambiente de aprendizaje práctico y dinámico, en el que se ayuda a estudiantes de ingeniería a entender y comprender la importancia del estudio de los efectos de la temperatura en fluidos. Además, la utilización de *software* y *hardware* libre y el montaje es de bajo coste, conforma un sistema de gran versatilidad lo que favorece el aprendizaje por las distintas condiciones y cuestiones a analizar que se pueden plantear.

## REFERENCIAS

- [1] Weerapun Duangthongsuk, Somchai Wongwises, “Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 706–714 (2009).
- [2] Mekic, E., Djokic, I., Zejnelagic, S., and Matovic, A., “Constructive approach in teaching of voip in line with good laboratory and manufacturing practice,” *Computer Applications in Engineering Education* , n/a–n/a (2015).
- [3] Garcia, I. and Cano, E. M., “Designing and implementing a constructionist approach for improving the teaching-learning process in the embedded systems and wireless communications areas,” *Computer Applications in Engineering Education* 22(3), 481–493 (2014).
- [4] Cano, E. M., Ruiz, J. G., and Garcia, I. A., “Integrating a learning constructionist environment and the instructional design approach into the definition of a basic course for embedded systems design,” *Computer Applications in Engineering Education* 23(1), 36–53 (2015).
- [5] Sorathia, K. and Servidio, R., “Learning and experience: Teaching tangible interaction and edutainment,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 64, 265 – 274 (2012). 12 th International Educational Technology Conference - {IETC} 2012.
- [6] Corbellini, S. and Vallan, A., “Arduino-based portable system for bioelectrical impedance measurement,” in [*Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2014 IEEE International Symposium on*], 1–5 (June 2014).
- [7] Pawar, P. A., “Heart rate monitoring system using ir base sensor amp; arduino uno,” in [*IT in Business, Industry and Government (CSIBIG), 2014 Conference on*], 1–3 (March 2014).
- [8] Gandra, M., Seabra, R., and Lima, F. P., “A low-cost, versatile data logging system for ecological applications,” *Limnology and Oceanography: Methods* 13(3), 115–126 (2015). e10012.
- [9] E. F. Cabrera, D. Echeverría, V. Henríquez, A. Ramos and J.A. Valencia. «"Hydrogen as energy vector. Study of geometry optimization of electrode for processes producing hydrogen by electrolysis of water."» *Internacional Conference On Modern Electrical Power Engineering*, 6 July 2016.