Construcción de un conductímetro de bajo coste y su aplicación para prácticas de laboratorio

Francisco E. Jarabo Friedrich[a1], Nicolás Elórtegui Escartín[b], Francisco J. García Álvarez[a]
[a]Departamento de Ingeniería Química - Universidad de La Laguna, 38200 La Laguna (Santa Cruz de Tenerife); [b]Catedrático de Enseñanza Secundaria jubilado

RESUMEN

Siguiendo la línea de un trabajo anterior, se ha procedido al diseño y construcción de un sistema basado en un sensor de conductividad de bajo coste y un microcontrolador Arduino. Este sistema se ha calibrado convenientemente y se ha dotado de salidas de datos por cable e inalámbrica. El dispositivo así construido permitirá medir conductividades tanto de sistema estacionarios como de sistemas no estacionarios.

Palabras Clave: Conductividad, prácticas de laboratorio, conductímetro, Arduino

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Conductividad electrolítica

La conductividad de una disolución electrolítica es una medida de su capacidad para conducir la electricidad. Esta medida se utiliza de forma rutinaria en muchas aplicaciones industriales y medioambientales como una manera barata, rápida y fiable de conocer el contenido iónico de una disolución de sales.
La conductividad se determina habitualmente midiendo la resistencia de una disolución entre dos electrodos. Al igual que en un conductor sólido, seguirá la ley por la que la resistencia (R, ohmios, Ω) al paso de la corriente es directamente proporcional a la longitud (L) e inversamente proporcional a la sección (A):

$$R\,[\Omega] = \rho\,\frac{L\,[m]}{A\,[m^2]} \qquad (1)$$

siendo ρ (Ω · m) el factor de proporcionalidad, *"resistividad"*, característico de cada sustancia.
La inversa de la resistencia es la conductancia, cuya unidad es el Siemens (S, Ω^{-1} o mho). Asimismo, la inversa de la resistividad es la ***"conductividad"***, κ (S · m^{-1}).
La medida experimental de la resistencia se basa en poner dos electrodos en serie con otra resistencia conocida y aplicar una diferencia de potencial también conocida, midiendo la caída de potencial entre los electrodos.
Por otro lado, como la conductividad depende de la temperatura, todas las medidas de conductividad han de tener en cuenta esta variable.
Cuando la medida de conductividad puede hacerse de manera continua, es posible utilizarla para estudiar la variación de la concentración de iones en una disolución con el tiempo, lo que resulta especialmente valioso en estudios cinéticos o de estado no estacionario.

1.2 Constante de celda y dependencia de la temperatura

Para interpretar las medidas experimentales que proporciona la conductividad de una disolución se suelen agrupar las características geométricas del sistema de medida ("celda" o "célula") denominando al cociente entre la distancia entre electrodos, **L**, y el área de sección transversal de aquéllos, **A**, "constante de celda", k_c:

[1] fjarabo@ull.es

$$k_c = \frac{L}{A} \tag{2}$$

expresándose en la práctica en cm^{-1}. Por tanto, conocida esta constante se puede determinar la conductividad midiendo la resistencia del sistema:

$$\kappa \left[\frac{S}{cm}\right] = \frac{k_c}{R} \tag{3}$$

Como la medida de la conductividad exige la medida de la temperatura, actualmente se incorpora al dispositivo de medida de conductividad un termistor NTC (**N**egative **T**emperature **C**oefficient), cuya resistencia decrece al aumentar la temperatura. La temperatura se determina por medida de la resistencia del termistor aplicando el modelo basado en la ecuación de Steinhart-Hart[1] simplificada:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + B\left(\frac{R}{R_0}\right) \tag{4}$$

donde **B** es una constante del orden de 4.000 (en nuestro caso, 3.950), las temperaturas están expresadas en kelvin y R_0 es la resistencia del termistor a la temperatura estándar, T_0 (25ºC = 298,15 K).
En la práctica, la resistencia del termistor se mide de la misma forma que la que proporciona la conductividad: se pone el termistor en serie con otra resistencia conocida y se aplica una diferencia de potencial también conocida, midiendo la caída de potencial en el termistor.

2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo es la construcción de un sistema conductimétrico basado en un microcontrolador Arduino y un sensor mixto de conductividad y temperatura[2,3,4], siguiendo una línea de trabajo iniciada con anterioridad[5,6] y que ya se comenzó con fines didácticos hace más de cuarenta años[7,8].
El sistema así construido se someterá a calibrado con disoluciones estándar y se le dotará de salida de datos tanto a ordenador, mediante cable USB, como a plataformas Android (teléfonos móviles, tabletas), mediante enlace Bluetooth.
Una vez operativo, el dispositivo podrá utilizarse en las medidas de conductividad de la práctica de laboratorio "Balance de materia en régimen no estacionario", permitiendo su tratamiento de datos de forma totalmente informatizado.
Durante el segundo semestre de este curso se pondrá una unidad del nuevo sistema a disposición de los alumnos, para poder valorar la aportación al aprendizaje de esta instalación en comparación con la convencional utilizada actualmente.

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1 Descripción del dispositivo

El dispositivo construido para las medidas conductimétricas está basado en el sensor de electroconductivdad con compensación de temperatura de XNQ Electric Company de bajo coste (13,86 euros). Según el fabricante, la constante de celda es 1,000 cm^{-1} y el sensor de temperatura de tipo NTC posee una resistencia interna de 10 kΩ.
El sensor está controlado por una placa Arduino Uno R3 (3,12 euros), las resistencias y conexiones se hacen sobre una placa de conexiones (Prototyping shield, 1,07 euros) y las comunicaciones se llevan a cabo con una placa Keystudio Bluetooth 4.0 (8,62 euros). Se necesitan, además, dos resistencias de 10 kΩ, una de 1 kΩ y un pulsador-interruptor (utilizado en el calibrado del conductímetro). La placa de conexiones tiene incorporado un diodo luminoso con su resistencia que también intervendrá en la operación. En la Figura 1a se muestra un esquema del circuito, elaborado con Fritzing (fritzing.org). En la Figura 1b

ISBN 978-84-09-14325-2

se muestra el montaje real del sistema.

3.2 Operaciones de medida

La medición de la temperatura se realiza directamente mediante la resistencia del termistor, de la que se toman varios valores (con cinco es suficiente) y se promedian. Este valor (**R**) se suministra a la ecuación simplificada de Steinhart-Hart junto con el valor de la resistencia correspondiente a 25ºC (T = 298,15 K), lo que permite el cálculo de la temperatura del sistema.
La medición de la conductividad puede hacerse como valor de calibrado previo o como medida real, lo que aconseja introducir una bifurcación en el flujo de datos proporcionado por el sensor y que se lleva a cabo mediante el botón-interruptor mencionado anteriormente. Si se presiona el botón, los datos recogidos se envían a una subrutina de calibrado del programa de adquisición de datos. Esta subrutina hace dos medidas de temperatura en un intervalo de 5 segundos para comprobar que la diferencia entre ambas sea inferior a 0,1ºC. Si la diferencia es superior, se repite el ciclo hasta que la temperatura se estabiliza.
Una vez que la temperatura está estable, se realiza la medida de conductividad, se compensa el valor con la temperatura para normalizarlo a 25ºC y se calcula el valor de la constante de celda, k_c, a partir de la asociación de la resistencia externa y la del fluido.

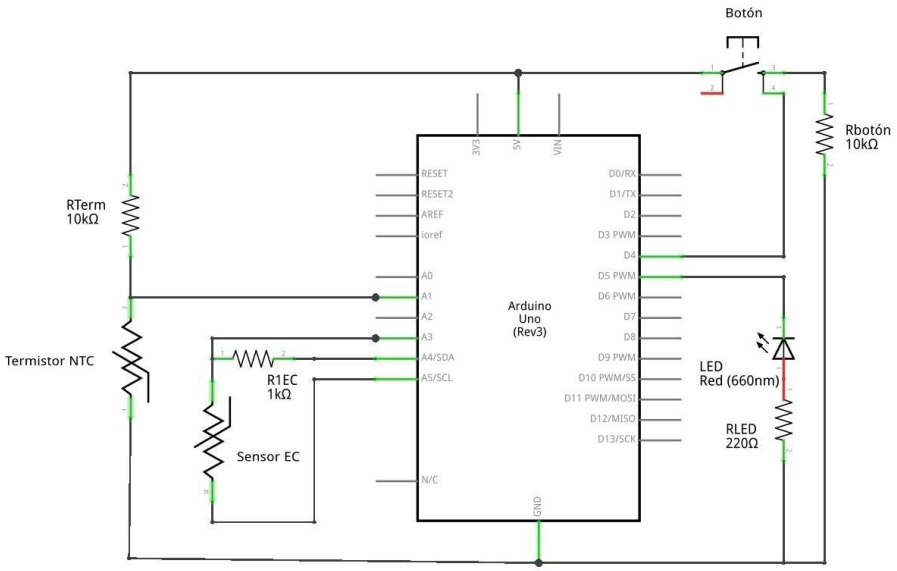

Figura 1a. Esquema del dispositivo.

Aunque se puede utilizar la constante de celda proporcionada por el fabricante (k_c = 1,000 cm^{-1}), el calibrado a partir de una disolución de cloruro potásico 0,01 mol/l patrón, de conductividad 1,415 mS/cm, resulta ser de k_c = 1,120 cm^{-1}.
Una vez calibrado el dispositivo, es decir, determinada la constante de celda, ya pueden realizarse las medidas directas. Estas incluyen las medidas de temperatura y su estabilidad de 0,1ºC y el uso de la constante de célula ya obtenida. La señal de entrada del sensor se convierte en una caída de tensión, que se compara con la de alimentación. Esta caída de tensión se relaciona con la resistencia de la celda y, conocida la constante de celda, con su conductividad, que finalmente se puede normalizar a la temperatura estándar.
Obsérvese que las operaciones ejecutadas de esta forma hacen que la corriente de medida sólo atraviese la disolución durante los pocos instantes (milisegundos) que se tarda en medir, de forma que no haya calentamiento de la disolución provocado por el paso de la corriente eléctrica ni fenómenos de polarización y electrólisis entre los electrodos del sensor. De no hacerse así podría observarse a simple vista la formación de burbujas en el sensor y a apreciarse la subida de temperatura que provoca el paso de corriente, que impediría la estabilidad de la temperatura necesaria para la medida de la conductividad.

ISBN 978-84-09-14325-2

Figura 1b. Montaje del sistema.

3.3 Salida de datos

Además de la salida por el monitor serie habitual, se ha preparado una salida de datos mediante Bluetooth hacia dispositivos Android que permite el funcionamiento sin la necesidad de un ordenador conectado a la placa Arduino. Para hacer esta salida se utiliza la biblioteca SoftwareSerial, que permite desviar los pines RXD y TXD del módulo Bluetooth a las salidas que determinemos, que en nuestro caso son los pines 7 para RX y 8 para TX. De esta forma la salida de monitor serie se envía también al Bluetooth y se puede leer indistintamente mediante cable USB (monitor serie) o de forma inalámbrica.
Para recibir los datos enviados por el módulo Bluetooth se necesita un terminal Android capaz de detectar dispositivos Bluetooth LE (Low Energy) y una aplicación que actúe como terminal. En general, los dispositivos Android recientes tienen esta capacidad. Hemos logrado un buen funcionamiento utilizando la aplicación Serial Bluetooth Terminal, de distribución libre en Play Store. En la primera utilización esta aplicación puede exigir una configuración a la medida ("custom" en la aplicación) tras detectar el dispositivo. En operaciones sucesivas no será necesaria.
Los datos recibidos se almacenan en un archivo de texto cuya localización en las carpetas del terminal Android se puede encontrar en la configuración de la aplicación ("settings", "system", "save folder"), permitiendo ubicarlo en una tarjeta SD.

4. RESULTADOS

4.1 Aplicación a la práctica de laboratorio

Una vez calibrados los sistemas de medida de conductividad y temperatura, se lleva a cabo la aplicación a la práctica de laboratorio "Balance de materia en régimen no estacionario". El objetivo de esta práctica es doble. Por un lado, se trata de determinar la variación de la concentración de un soluto con el tiempo en un tanque de volumen constante al aplicar una corriente de agua. Por otro lado, se procede a comprobar el cumplimiento de la ecuación resultante del tratamiento teórico del caso práctico.
La realización práctica consiste en la medida del caudal de entrada y de la concentración de salida de un tanque (medida como conductividad) en función del tiempo. El fin último es la obtención de la constante de tiempo del sistema, definida como la relación entre el volumen del tanque, V, y el caudal de lavado, Q:

ISBN 978-84-09-14325-2

$$\tau\ [s] = \frac{V}{Q}\ \frac{[m^3]}{\left[\frac{m^3}{s}\right]} \tag{5}$$

4.2 Utilización del conductímetro construido

Se han realizado las medidas de conductividad frente al tiempo partiendo de una disolución de 0,2 mol/l de NaCl que se va diluyendo con agua de abasto hasta alcanzar la conductividad de ésta, mediante el conductímetro construido por nosotros (en adelante, **Xin**), comparando los resultados con los obtenidos mediante la lectura con el conductímetro comercial utilizado hasta ahora (en adelante, **Hansa**). Como puede observarse en la Figura 2, se produce una seria discrepancia entre unos datos y otros, principalmente en el rango por encima de los 5 mS/cm.
Esta discrepancia nos lleva a sospechar que el conductímetro Xin no proporcionaba un comportamiento lineal de los datos. Por ello se llevó a cabo un calibrado del conductímetro utilizando el aparato Hansa como patrón con un conjunto de seis disoluciones de NaCl entre 0,05 y 3 mol/l. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3, donde claramente puede observarse que el conductímetro Xin se desvía de la linealidad, lo que no sucede con el Hansa.

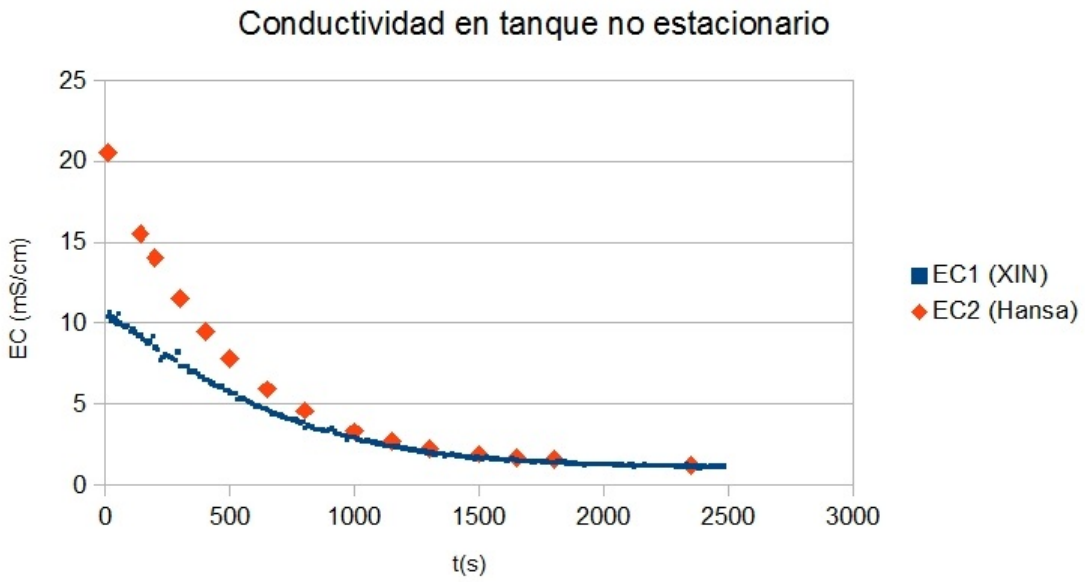

Figura 2. Discrepancia entre ambos conductímetros

Los datos de este calibrado permiten obtener una ecuación de calibrado del conductímetro Xin, "normalizando" sus resultados respecto al sensor comercial. Este operación puede llevarse a cabo en la hoja de cálculo de tratamiento de datos o, lo que es mejor, insertándola en el código Arduino, de forma que la salida de datos del conductímetro proporciona directamente datos normalizados, que resultarán casi idénticos a los del conductímetro Hansa comercial, tal como se muestra en la Figura 4.

4.3 Contextualización del sistema

Una vez diseñado y construido el sistema de medida, será necesaria su implementación en la práctica de laboratorio que se realiza actualmente, con objeto de su evaluación y determinación de las mejoras educativas que aporta. Todavía no se dispone de resultados respecto a mejoras en el aprendizaje de los alumnos, ya que estas prácticas se llevan a cabo durante el segundo semestre. No obstante, se espera que así sea, ya que se aportan los siguientes aspectos relativos a la Ingeniería Química para los alumnos de segundo curso del Grado en Química:

ISBN 978-84-09-14325-2

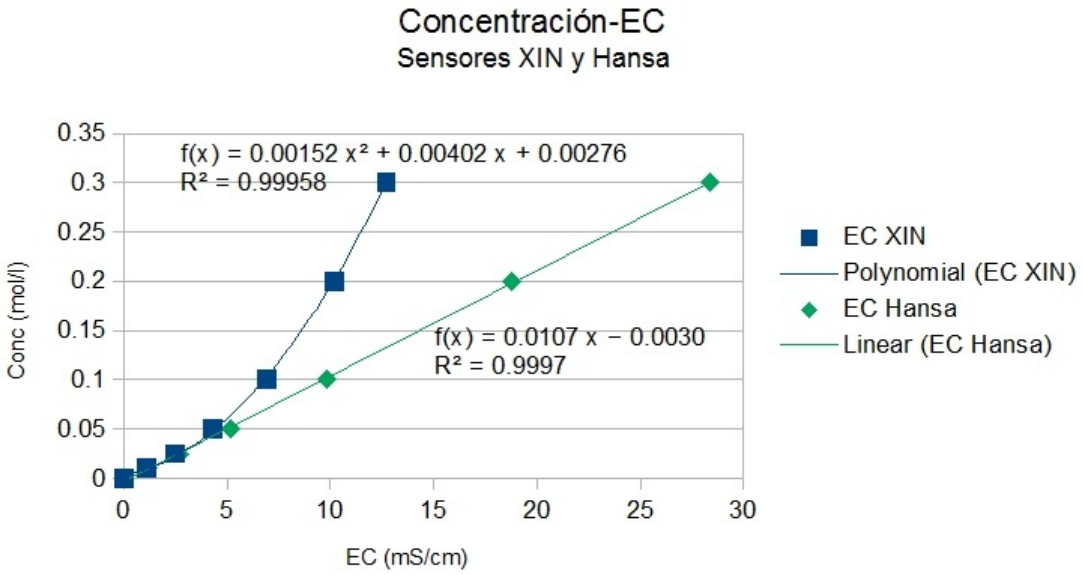

Figura 3. Comparación de ambos conductímetros

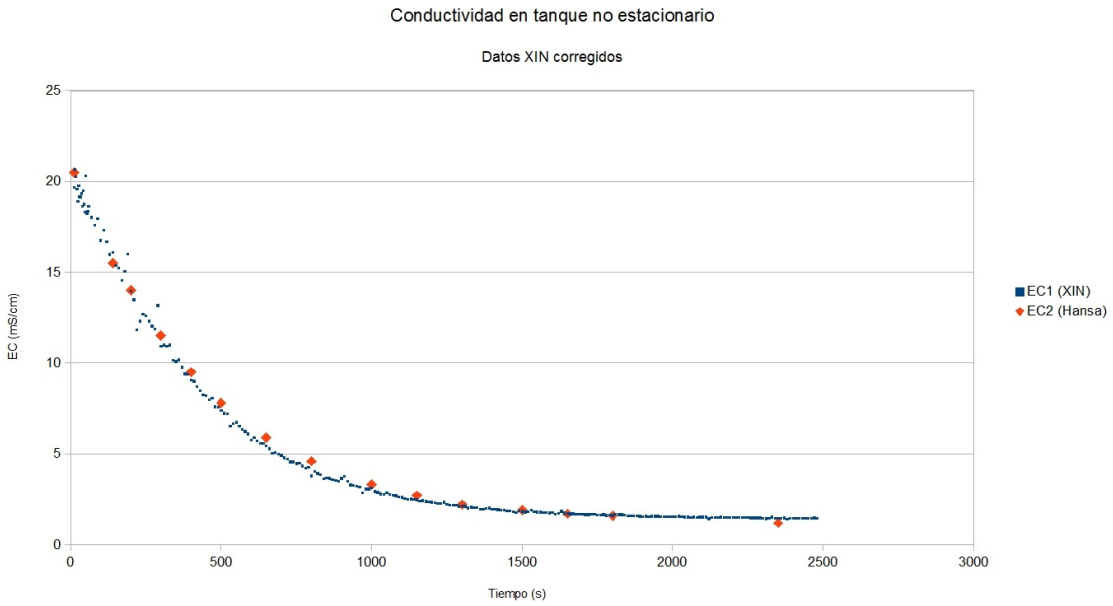

Figura 4. Comportamiento del conductímetro calibrado

- Bajo el punto de vista pedagógico, el conductímetro comercial como aparato de medida es totalmente opaco y como tal es usado en otras disciplinas; no obstante el planteamiento que se propone permite claramente distinguir que la medida real es una diferencia de potencial, que posteriormente se transforma en una resistencia, en una conductividad y finalmente, en una concentración.
- Todo ello permite relacionar las variables que aparecen en las ecuaciones (concentración) con las que se miden experimentalmente y su dependencia del entorno (temperatura).
- En Ingeniería Química frecuentemente se diseñan sensores para satisfacer necesidades concretas, lo que permite ver la conveniencia de la utilización de instrumentos de medida de diseño propio, más cuando esto puede llevarse a cabo

ISBN 978-84-09-14325-2

con la tecnología actual, de muy bajo coste.

- Los balances de materia implican el conocimiento de las propiedades de los fluidos y, por tanto, la importancia de su medida continua frente a las medidas discontinuas que se realizan en otras asignaturas del Grado en Química.
- El calibrado de instrumentación, tanto de laboratorio como de procesos, sigue siendo una técnica imprescindible, que ha de ser considerada en todos los ámbitos experimentales.
- Ayuda a profundizar en la medida y control de variables por software, mediante la digitalización de parámetros de medida continua y su conversión a datos legibles por una hoja de cálculo; además, el período de toma de datos puede ser perfectamente controlado.
- Queda patente la necesidad de representar los datos obtenidos en diferentes escalas (lineal, logarítmica) para obtener parámetros importantes del sistema (constante de tiempo), avanzando con ello en el manejo de hojas de cálculo.

5. CONCLUSIONES

El montaje y puesta a punto de los sistemas de medida de conductividades eléctricas en disoluciones líquidas ha permitido comprobar que actualmente se pueden diseñar y montar prácticas de laboratorio relacionadas con la Ingeniería Química de muy bajo coste (en el caso estudiado, menos de 30 euros). Aunque de momento las especificaciones de estos sensores de bajo coste no abarcan un amplio rango de medidas sin perder la linealidad, la utilización de dispositivos clásicos de laboratorio para su calibrado permite su adecuada utilización a la par que obligan a manejar conceptos (gráficos, calibrados) que se están perdiendo en la práctica habitual de la docencia.

Bajo el punto de vista educacional consideramos que la introducción de tecnologías de medición automática a los sistemas habituales involucrados en la Ingeniería Química abordados en las prácticas de laboratorio debe ayudar a profundizar mejor en la comprensión de los conceptos que se abordan y ejercitan en dichas prácticas.

Todo ello permite vislumbrar un futuro inmediato utilizando modernos elementos de medida de bajo coste que permitan renovar ampliamente el material de prácticas e implicar a los alumnos en el manejo de nuevas tecnologías de adquisición y análisis de datos en sus estudios más básicos.

6. RECONOCIMIENTO

El presente trabajo forma parte del proyecto de innovación educativa “Aplicación de la tecnología Arduino para reforzar los conocimientos en Mecánica de Fluidos”, concedido por el Vicerrectorado de Docencia de la Universidad de La Laguna para el curso 2018-2019.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Steinhart, J.S. y Hart, S.R., “Calibration curves for thermistors”, Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts, 15(4), 497-503 (1968).

[2] Mallon, E. y Beddows, P., “Measuring EC (electrical conductivity) with Arduino”, https://thecavepearlproject.org/2017/08/12/measuring-electrical-conductivity-with-an-arduino-part1-overview/ (octubre 2019).

[3] Ratcliffe, M. “Three dollar EC-ppm meter”, https://hackaday.io/project/7008-fly-wars-a-hackers-solution-to-world-hunger/log/24646-three-dollar-ec-ppm-meter-arduino (octubre 2019).

[4] Smarter RET Program. “Build and Test a Conductivity Probe with Arduino”, Polytechnic Institute of New York University, https://www.teachengineering.org/activities/view/nyu_probe_activity1 (octubre 2019).

[5] Jarabo, F., García, F.J. y Elórtegui, N., “Incorporación de caudalímetros (electrónicos) de bajo coste a prácticas de laboratorio de fluidos”, V Jornadas Iberoamericanas de Innovación Educativa en el Ámbito de las TIC, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (2018).

[6] Jarabo, F. García, F.J. y Marrero, M.C., “Aproximación a la Mecánica de fluidos mediante la ecuación general de conservación e la energía”, en “De la innovación imaginada a los procesos de cambio”, Servicio de Publicaciones, Universidad de La Laguna (2018).

[7] Ayala, A., Jarabo, F., Macías, J.J. y Guinea, D., “Conductímetro portátil”, III Congreso de la Asociación Canaria para

la Enseñanza de las Ciencias, Las Palmas de Gran Canaria (1986).
[8] Macías, J.J., Solá, L., Rodríguez, N. y Jarabo, F., "Termómetro electrónico portátil", III Congreso de la Asociación Canaria para la Enseñanza de las Ciencias, Las Palmas de Gran Canaria (1986).

 ISBN 978-84-09-14325-2