



Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería

ISSN: 0718-3291

facing@uta.cl

Universidad de Tarapacá

Chile

Arrieta A, Álvaro A.; Tarazona C., Rosa L.

Sistema multicanal con instrumentación virtual para una lengua electrónica

Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 22, núm. 3, septiembre, 2014, pp. 338-350

Universidad de Tarapacá

Arica, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77231339005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Sistema multicanal con instrumentación virtual para una lengua electrónica

Multichannel system with virtual instrumentation for an electronic tongue

Álvaro A. Arrieta A.¹ Rosa L. Tarazona C.²

Recibido 14 de marzo de 2012, aceptado 5 de marzo de 2014

Received: March 14, 2012 Accepted: March 5, 2014

RESUMEN

Se desarrolló un sistema multipotenciostato para una lengua electrónica utilizando la instrumentación virtual para el control, adquisición y manipulación de los datos generados y obtenidos en un proceso electroquímico basado en la técnica de voltametría cíclica. Se desarrolló un *software* de aplicación con Labview 2009 ® y se utilizaron los módulos de adquisición de datos NI 9263 (módulo de entrada de corriente analógica de ocho canales), NI 9203 (módulo de entrada de voltaje analógico de cuatro canales) y el chasis CompactDAQ USB 9174 de National Instruments ®. Se implementó el circuito básico del multipotenciostato con amplificadores operacionales OP77 y se diseñó una fuente regulada de ± 5 V para la alimentación de los operacionales. Los electrodos utilizados en las pruebas fueron desarrollados en el laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería. Adicionalmente, el sistema implementado se utilizó para la discriminación y clasificación de muestras de café de tipo comercial en la región. Este tipo de desarrollos tecnológicos basados en instrumentación virtual no han sido reportados en la literatura, lo que convierte a esta investigación en un aporte novedoso en el campo de las lenguas electrónicas.

Palabras clave: Adquisición de datos, instrumentación virtual, multipotenciostato, voltametría cíclica, lengua electrónica.

ABSTRACT

A multipotentiostat system for an electronic tongue by using virtual instrumentation for the control, acquisition and manipulation of the data generated and obtained in an electrochemical process based on the cyclic voltammetry technique was developed. A Labview 2009 ® application software was also developed. The NI 9263 data acquisition modules were used (eight-channel analogue current entrance module), NI 9203 (four-channel analogue current input module) and the CompactDAQ usb 9174 chasis of National Instruments ®. The basic circuit of the multipotentiostat with OP77 operational amplifiers was implemented. A ± 5 V regulated source was designed to supply the operational amplifiers. The electrodes used to carry out the different tests were developed at Universidad Pontificia Bolivariana - Montería sectional. Furthermore, the implemented system was used to discriminate and classify samples of commercial coffee in the region. This type of technological development, based on virtual instrumentation, has not been reported in the literature, thus, this research contributes greatly in the field of electronic tongues.

Keywords: Data acquisition, virtual instrumentation, multipotentiostat, cyclic voltammetry, electronic tongue.

¹ Desarrollo y aplicación de nuevos materiales – DANM. Ciencia Básica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Pontificia Bolivariana Montería. Kilómetro 8, vía Cereté. Córdoba, Colombia. E-mail: alvaro.arrieta@upb.edu.co; alvaroangel.arrieta@gmail.com

² Grupo de investigaciones en electrónica – GIE. Facultad de Ingeniería Electrónica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Pontificia Bolivariana Montería. Kilómetro 8, vía Cereté. Córdoba, Colombia. E-mail: rosa.tarazona@upb.edu.co

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de instrumentos de medición utilizando nuevas técnicas y tecnología de punta cada vez es más innovador. Ejemplo de estos dispositivos son la nariz electrónica, que utiliza sensores químicos capaces de detectar gases y aromas [1-3] y la lengua electrónica [3-6], o sensor de gusto [7], instrumento analítico basada en la combinación de una matriz de sensores, que presentarán alteraciones de algunas de sus propiedades, esta alteración se puede relacionar con los compuestos químicos específicos que la han producido y permiten identificarlos y cuantificarlos [8].

La lengua electrónica, mediante la utilización de diferentes técnicas electroquímicas, se ha transformado en un equipo de análisis cualitativo y cuantitativo de soluciones complejas que pueden llegar a clasificar distintos sabores, detectar productos que alteren la calidad del alimento, productos contaminantes, impurezas y sustancias tóxicas [9-10]. Su estructura está conformada por tres componentes básicos: la matriz de sensores, el equipo de emisión y recepción de señales y el algoritmo apropiado que lleva a cabo la identificación de la señal obtenida [11].

Los sensores son uno de los componentes más importantes de las lenguas electrónicas, por ello son un área de investigación importante en este campo del saber. El principal criterio de aplicación y desarrollo de una matriz de sensores para una lengua electrónica es su selectividad cruzada y alta sensibilidad. La selectividad cruzada puede ser entendida como la capacidad que tiene un sensor o material sensible de responder de manera reproducible a un número de compuestos diferentes de una solución [12-14].

En la actualidad han surgido varios grupos a nivel internacional que han enfocado sus esfuerzos al desarrollo de lenguas electrónicas utilizando como base las medidas electroquímicas [15-17].

Recientes estudios en los polímeros conductores, como el desarrollado por Parra, Arrieta, Fernández-Escudero, García, Apetrei, Rodríguez y De Saja [18], llaman la atención no solo por el interés científico, sino también por la variedad de posibles aplicaciones como discriminación y clasificación de muestras de café [19], vinos [18-20], cerveza [21] entre otros.

Uno de los polímeros conductores más estudiados es el polipirrol, debido a su buena conductividad eléctrica, estabilidad del medio ambiente, buena solubilidad, propiedades redox y la relativa facilidad de oxidación del monómero [22].

Entre las técnicas electroquímicas utilizadas en una lengua electrónica se encuentran la potenciometría [4, 22-23], la amperometría [24, 25] y la voltametría [5, 18, 26-27]. El uso de la voltametría presenta varias ventajas como mayor sensibilidad, versatilidad, sencillez, robustez y es menos influenciada por las perturbaciones eléctricas y por lo tanto tendrá una señal con mayor inmunidad al ruido, y como desventaja está la arquitectura de la celda [25, 28].

En la técnica voltamétrica se aplica un potencial (V) a un electrodo y se hace un seguimiento de la corriente (I) resultante, que fluye mediante una celda electroquímica. Frecuentemente el potencial aplicado es variado o la corriente se controla en un intervalo de tiempo (t), como una rampa lineal, una onda cuadrada, etc. Por lo tanto, la técnica se puede describir como una función de V, I y t, observándose en un gráfico resultante corriente-potencial llamado voltamograma [29].

Otra parte importante de una lengua electrónica está representada por otros elementos como la instrumentación para adquirir la señal [13], para ello es indispensable contar con un sistema de medición que proporcione voltaje y adquiera corriente. Se emplean instrumentos comerciales llamados potenciostatos, modificados o desarrollados en laboratorios que siguen, claro está, los modelos comerciales donde las mediciones electroquímicas se llevaron a cabo con el potenciostato galvanostato comercial EG&G PARC serie 263 A [10,20].

Una de las principales virtudes de desarrollar el sistema de medida es que permite tener más control sobre las prestaciones del instrumento y manejar mejor el acoplamiento con la red de sensores y el *software* de control y tratamiento de datos. Una forma de llevar a cabo este objetivo es utilizar nuevas tecnologías como la instrumentación virtual, que además de adquirir la señal, mezcla la interfaz de usuario, funciones de análisis y procesamiento de señales, códigos eficientes para el almacenamiento de datos y la comunicación con otros equipos que permiten diseñar un dispositivo versátil, y de fácil uso [18,30].

En el presente trabajo se muestran los resultados de la implementación de un sistema de medición multipotenciostato manejado desde un computador, que utiliza la combinación de un *hardware* y un *software* para realizar el control y medición de las variables de voltaje, generado de la técnica voltamétrica utilizada, y corriente, adquirida en la reacción química, respectivamente.

Para el desarrollo del *software* de aplicación se escogió la programación en Labview 2009®, que utiliza aplicaciones conocidas como Instrumentos Virtuales “VI” (del inglés *Virtual Instruments*) [31], para manipular las variables y registrar los voltamogramas requeridos según los electrodos de trabajo utilizados.

La técnica electroquímica utilizada fue la voltametría cíclica, en un rango de barrido entre -2 V y +2 V y para la transmisión y recepción de los datos se emplearon los módulos de adquisición NI 9203, 9263 y 9247.

MATERIALES Y MÉTODOS

El potenciostato es un instrumento electrónico de monitoreo electroquímico capaz de controlar la diferencia de potencial y medir la corriente entre electrodos, que se encuentran dentro de una celda electroquímica, funciona manteniendo el potencial de un electrodo de trabajo a un nivel constante respecto del potencial de un electrodo de referencia, mediante el ajuste de la corriente en un electrodo auxiliar. El dispositivo que utilizan generalmente estos instrumentos son los amplificadores operacionales [29].

El multipotenciostato a diferencia del potenciostato es capaz de controlar más de un electrodo de trabajo, permitiendo al instrumento presentar una mayor eficiencia en las medidas.

Las etapas contempladas para el diseño del sistema implementado fueron el circuito que conforma el multipotenciostato, el *software* diseñado para la adquisición de datos, manipulación de las tarjetas de adquisición de datos (DAQ) y la interfaz con el usuario.

Circuito del multipotenciostato y etapa de adquisición de datos

En la Figura 1 se presenta el diagrama esquemático del sistema multipotenciostato diseñado.

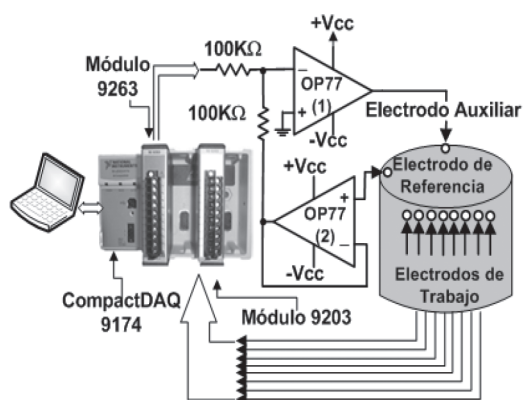


Figura 1. Circuito multipotenciostato implementado.

Como se muestra en la Figura 1, mediante una salida analógica del módulo NI 9263 es llevado el voltaje de polarización de la técnica voltamétrica hacia el circuito multipotenciostato. Este voltaje es generado desde el computador, mediante un programa diseñado en Labview 2009®, y entregado a la DAQ por el módulo CompactDAQ USB 9174.

El módulo de adquisición de datos NI 9263 consta de cuatro canales de salida analógica de 100 kS/s, con un rango de voltaje de ± 10 V, cada canal tiene un conversor digital analógico con una resolución de 16 bits [32].

El circuito multipotenciostato fue implementado con amplificadores operacionales, A.O, ya que las variables a controlar y medir (voltaje y corriente) son variables análogas, y estos dispositivos son los más adecuados para este tipo de señales gracias a las características y prestaciones que presentan, como una impedancia de entrada alta y una impedancia de salida baja, entre otras.

Los amplificadores operacionales utilizados fueron los OP77, amplificadores de ultrabajo *offset* de voltaje, con una impedancia de entrada de 45 MΩ, una razón de rechazo de modo común CMRR de 120 dB y una velocidad de respuesta *slew rate* de 0,3 V/μs [33], parámetros más representativos a la hora de escoger los A.O para este tipo de diseño.

El amplificador OP77 (2) (ver Figura 1) proporciona la diferencia de voltaje entre el electrodo de referencia y cada uno de los electrodos de trabajo y la lleva al amplificador OP77 (1), tomando la información y comparándola con el voltaje de entrada para ajustar

el voltaje del electrodo auxiliar. A su vez, en este último electrodo se genera una corriente que llega al electrodo de trabajo logrando que el potencial entre el electrodo de referencia y el de trabajo se igualen al potencial de entrada.

Gracias a las características de impedancia de entrada infinita e impedancia de salida casi nula de la configuración de seguidor de voltaje del OP77 (2) se evita que la corriente que empieza a circular en la celda electroquímica lo haga por medio del electrodo de referencia y lo pueda polarizar ocasionando inestabilidad entre el potencial del electrodo de referencia y el electrodo de trabajo.

La corriente producida en la reacción de la celda electroquímica, que es proporcional a la concentración de la sustancia, es adquirida por las entradas análogas de corriente del módulo NI 9203 y llevada al PC por el módulo *CompactDAQ* 9174. Con el voltaje generado de la técnica de voltametría cíclica y la corriente detectada, el *software* de aplicación diseñado genera las respectivas gráficas de los voltamogramas para cada electrodo de trabajo.

El módulo NI 9203 DAQ contiene ocho canales de entrada analógica con rangos programables de ± 20 mA, cuyas señales de entrada son almacenadas, acondicionadas y muestreadas por un convertor análogo digital (ADC) de 16 bits de resolución y una velocidad de muestreo de 200 kS/s [34].

Gracias a las prestaciones y características eléctricas de los módulos NI 9203 y NI 9263 y del chasis *CompactDAQ* USB 9174 [35] se realizó el correcto acoplamiento de las señales entre el computador y la circuitería del sistema multicanal sin necesidad de utilizar circuitos externos como microcontroladores, convertidores de señal o atenuadores.

Para los amplificadores operacionales OP77 fue necesario diseñar una fuente de polarización de ± 5 V a 400 mA. Se utilizaron condensadores de 4700 μ F cuya función es eliminar el voltaje de rizado a la salida del puente rectificador y mantener el voltaje constante a la entrada del regulador.

También, se utilizaron condensadores de 220 μ F *Low ESR* (del inglés, *Equivalent Series Resistance*) de baja impedancia, capaces de responder más rápido a picos de corriente y exigencia de los A.O;

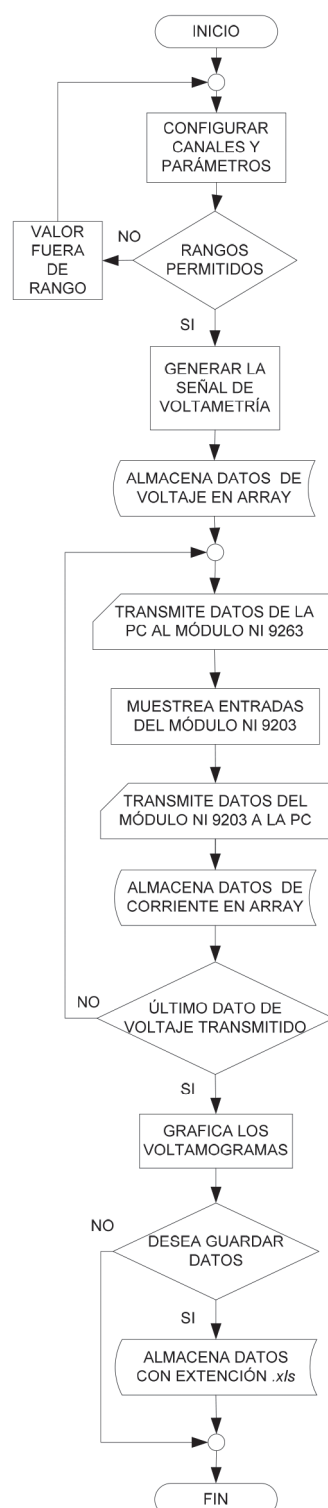


Figura 2. Diagrama de flujo sistema multicanal.

condensadores cerámicos NP0 (de coeficiente de temperatura negativo, positivo, cero) especiales para eliminar el ruido producido por el regulador de voltaje debido a su baja ESR y evitar cualquier oscilación de alta frecuencia.

Además, reguladores de voltaje lineales 7805 y 7905 con salida de voltaje fija +5 V y -5 V, respectivamente, escogidos por su facilidad de uso, buenas características de rechazo al ruido de alimentación (PSRR) y protección de corto circuito.

En la circuitería del multipotenciostato para las configuraciones de los amplificadores operacionales se utilizaron resistencias de 100 k Ω de película metálica con tolerancia al 1 %.

Instrumentación virtual

Para la generación, almacenamiento, manipulación, procesamiento y presentación de las variables manejadas se desarrolló un código utilizando la instrumentación virtual del *software* Labview 2009®.

Se creó una HMI (del inglés, *Human Machine Interface*) para que el usuario configure los parámetros necesarios en el experimento del análisis electroquímico y pueda visualizar los voltamogramas de las señales de interés.

En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo general del programa diseñado.

En la Figura 3 se muestra la interfaz de usuario diseñada para la aplicación.

En la interfaz se establecen controles, parámetros y registros. Los parámetros son los valores de los potenciales en que se dará el análisis electroquímico: potencial de equilibrio (E_o), potencial inicial (E_i), potencial final (E_f), número de ciclos que se refiere a cuántas veces se repite la forma de onda generada de la voltametría cíclica, tiempo de equilibrio que es el tiempo de espera para que el potencial E_o se estabilice y en el cual inicializa el experimento.

Otros parámetros importantes son la velocidad de barrido o pendiente de la rampa dada en voltios por unidad de tiempo (V/s), el número de pasos o escalones que se dan por voltio que tiene unidades de pasos por segundo y una base de datos para el electrodo de referencia con su respectivo potencial.

En la Tabla 1 se presentan los rangos máximos y mínimos para cada uno de los parámetros, el usuario al ingresar un rango fuera de los establecidos el programa automáticamente le muestra una ventana de error y no le permite seguir hasta que establezcan los parámetros dentro del rango permitido.

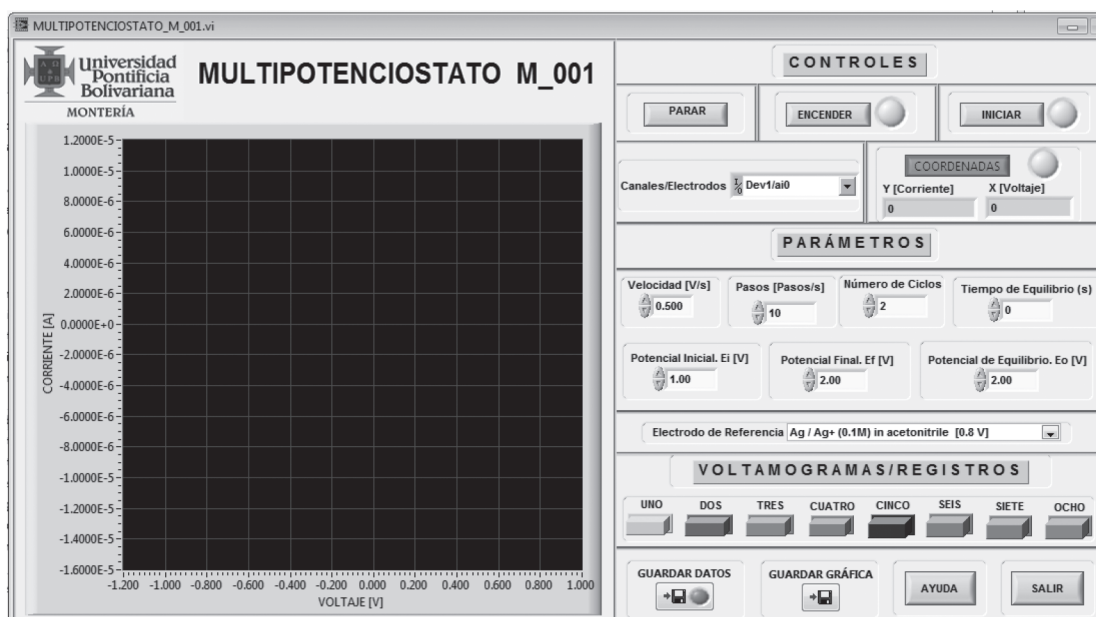


Figura 3. Interfaz diseñada para el sistema multicanal.

Tabla 1. Límites de los parámetros.

Parámetros iniciales	Mín	Máx
Ei [V]	2	-2
Ef [V]	2	-2
Eo [V]	Debe estar entre Ei y Ef	
Velocidad de barrido [V/s]	0,001	2
Número de pasos por voltio [Pasos/s]	10	500
Tiempo de equilibrio [s]	0	300
Número de ciclos	1	50

La parte del código que controla los mensajes de error se implementó con una máquina de estado utilizando estructuras tipo *case* con opciones de selección de casos.

En la Figura 4 se muestra parte del código de la máquina de estado diseñada.

En la Figura 5 se muestra parte de diagrama de flujo que se utilizó para implementar el código que realiza la forma de onda voltamétrica necesaria para el análisis electroquímico. La técnica utilizada fue la voltametría cíclica.

En la interfaz de usuario también se muestran los controles que se refieren al encendido, paro, inicialización del experimento y la opción de escoger la cantidad de canales o electrodos de trabajo con que se quiere realizar el análisis electroquímico.

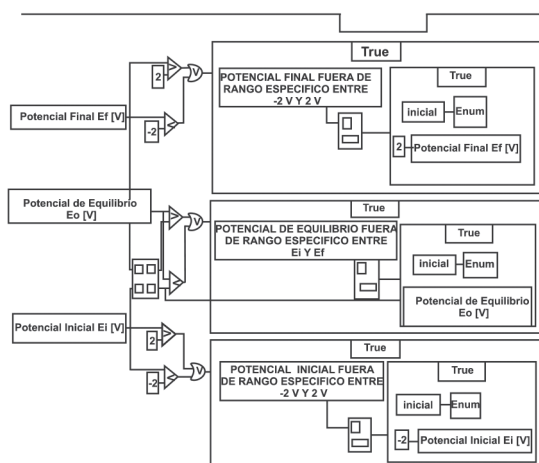


Figura 4. Parte del código con máquina de estado utilizado para mostrar pantallazo de errores.

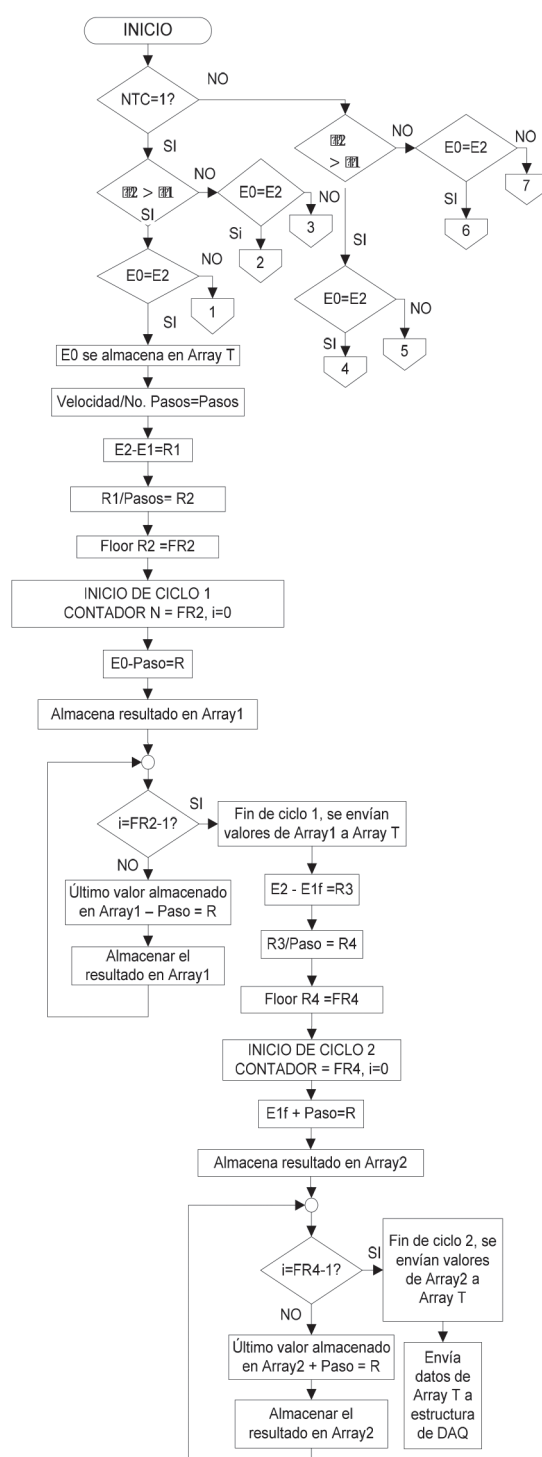


Figura 5. Parte del diagrama de flujo para generar la onda de la técnica voltamétrica utilizada.

Además, el usuario puede habilitar las coordenadas de un punto de la curva en la pantalla de la gráfica para determinar un valor específico.

Otras opciones que se presentan son los registros, donde el usuario puede guardar la gráfica obtenida y los datos en formato Excel (.xls). Además de poder escoger qué voltamogramas quiere visualizar dependiendo del número de electrodos de trabajo asignados, cada uno con un color determinado para poder distinguirlos. Mediante un botón, el usuario puede habilitar la opción de ayuda, donde se visualiza las instrucciones de manejo y cuidado del instrumento. En el momento en que el usuario quiera salir del programa después de utilizar el *software* de aplicación lo puede hacer mediante el botón SALIR, cerrándose en su totalidad la aplicación, para ello se utilizó la estructura *event*.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La primera parte del código diseñado fue la generación de la forma de onda de la técnica de voltametría cíclica, para ello se utilizaron las estructuras *case*, *for*, *flat sequence structure*, además de diferentes funciones matemáticas y booleanas. En la Figura 6 se muestra la forma de onda simulada.

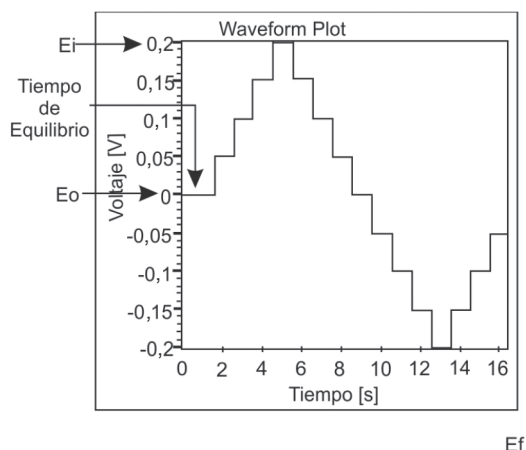


Figura 6. Onda voltamétrica cíclica.

Una vez obtenido el resultado requerido se procedió a implementar el VI para la comunicación con los módulos DAQ NI 9203 y 9263, inicialmente esta tarea se llevó a cabo utilizando un solo canal de medida de cada módulo para tener mejor control sobre el experimento y poder localizar y corregir mejor los errores en el programa.

Inicialmente se implementó un código con los VI DAQ Assistant, subVI diseñados específicamente para esta tarea. Cuando se realizó una prueba con todo el *software* diseñado se presentaron una serie de errores tanto en generación de la onda de voltaje como en la forma de onda de la corriente detectada. Ambas variables fueron monitoreadas, la onda de voltaje generada con un osciloscopio y la forma de onda de corriente con ayuda de un *waveform charts*. En ellas se presentaban retardos de tiempo y formas de onda inconsistentes a las que se esperaban. Además, se graficaba el voltaje versus la corriente para poder observar si el voltamograma tenía una forma de onda típica a la técnica utilizada, esto no generó los resultados esperados.

En la Figura 7 se muestra la forma de onda del voltamograma obtenido con los VI DAQ Assistant y en la Figura 8 una onda típica con el tipo de técnica utilizada.

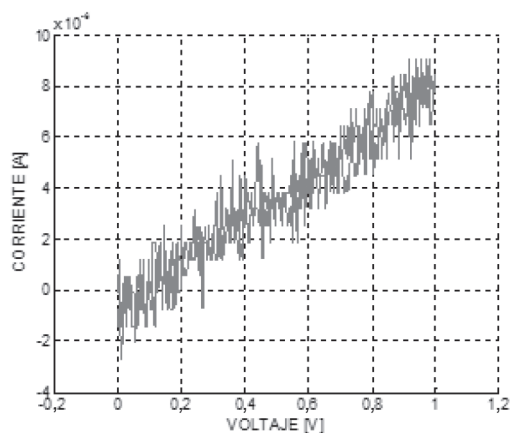


Figura 7. Voltamograma obtenidos con el VI DAQ Assistant.

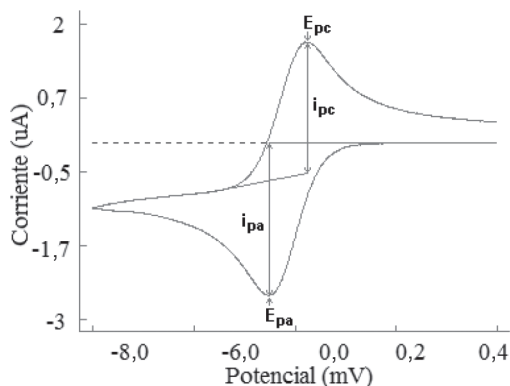


Figura 8. Gráfica de voltametría cíclica, típica del ferrocianuro de potasio.

Después de analizar los resultados obtenidos se notó que la utilización de los subVI DAQ Assistant con todo el programa requería una considerable capacidad de procesamiento por parte de la CPU del PC.

Esta clase de subVI trabajan con un código cerrado y estandarizado, del que no siempre se necesita utilizar todas sus funciones, además el Labview® trabaja con una programación orientada a *software*, porque utiliza instrumentos virtuales, por lo tanto también requiere una determinada capacidad de procesamiento por parte de la CPU. Todo esto contribuyó para que la adquisición de datos no fuera la esperada.

Una vez encontrado y analizado el error, se optó por trabajar la parte del *software* de adquisición con subVI a bajo nivel, es decir, creando el subVI de adquisición apropiado para este caso específico. Para ello se utilizaron los subVI de comunicación DAQmx Create Virtual Channel, DAQmx Start Task, DAQmx Clear Task, DAQmx Read, DAQmx Write en conjunto con otras estructuras y funciones que permitieron llevar a cabo la tarea requerida de forma satisfactoria.

Parte del código se muestra en las Figuras 9 y 10.

Para la realización de las pruebas se utilizó electrodos de platino diseñados en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería y una sustancia con una señal voltamétrica conocida (ferrocianuro de potasio), el que tiene unas propiedades *redox* bien caracterizadas en la literatura, para poder así comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

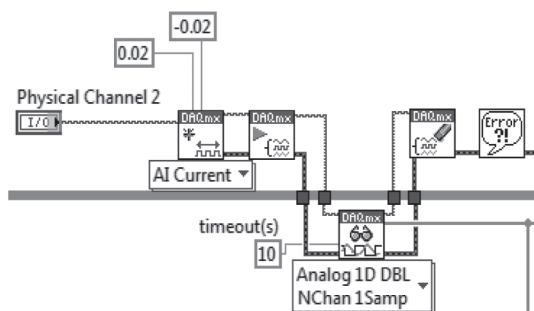


Figura 9. Parte de la estructura de la comunicación con la DAQ NI 9203.

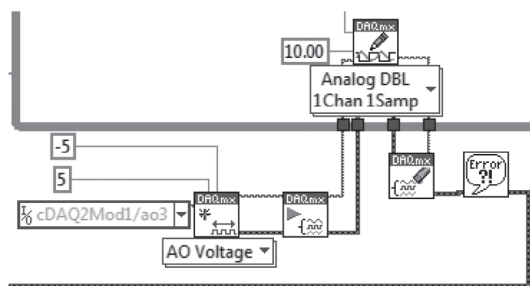


Figura 10. Parte de la estructura de la comunicación con la DAQ NI 9263.

La preparación de los sensores fue realizada en dos geometrías distintas, denominadas cilíndrica y de disco, para evaluar las características electroquímicas de los sensores resultantes, su estabilidad y reproducibilidad. Los sustratos de platino, tanto cilíndrico como de disco, se prepararon a partir de un hilo de platino de 1 mm de diámetro y 7 mm de longitud, soldado a un alambre de cobre de 12 cm de longitud.

Para los sustratos cilíndricos, el hilo de platino soldado al alambre de cobre se introdujo en una punta de micropipeta de 1.000 μL , de manera que sobresalieran 3 mm del hilo de platino; la punta de micropipeta fue sellada con calor para fijar el hilo de platino. En los sustratos de disco el montaje se hizo en un tubo de vidrio de 2 mm de diámetro interno y 5 cm de longitud; en este caso se embebió el hilo de platino, previamente soldado al alambre de cobre, de tal manera que la superficie de platino dejó expuesta su área circular; luego se selló con masilla epoxi Nural 21 y finalmente se dejó secar en una estufa durante 5 horas a 70 °C. De esta manera se obtienen sustratos cilíndricos y de disco, con áreas útiles de 10,21 mm^2 y 0,78 mm^2 , respectivamente (ver Figura 11).

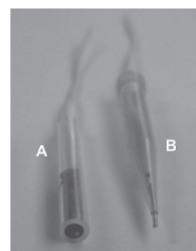


Figura 11. Sustratos de platino empleados en la elaboración de sensores poliméricos; A. De disco; B. Cilíndrico.

Los resultados de la señal voltamétrica típica de la sustancia de prueba se muestran en la Figura 12, en ella se visualiza la variación de la corriente de la celda respecto del voltaje aplicado. Además, se puede observar los picos de oxidación y reducción de la solución con un determinado potencial aplicado.

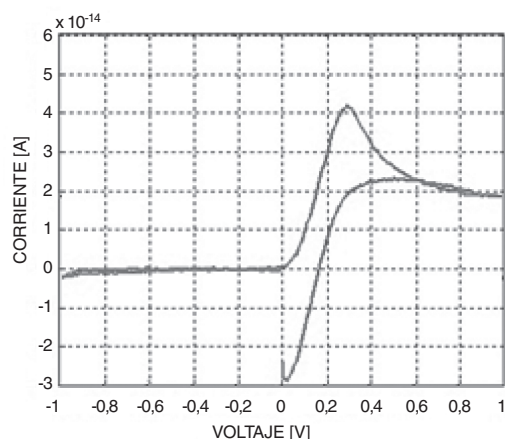


Figura 12. Voltamograma de un sensor utilizando ferrocianuro de potasio.

Los resultados fueron comparados, utilizando la misma sustancia, con los datos arrojados por el potenciostato comercial PARSTAT 2263, de propiedad de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería, estandarizado en el mercado mundial y que cumple con todas las especificaciones de este tipo de equipos, como exactitud, precisión, rango de corriente, rango de voltaje, entre otras, indicando el correcto funcionamiento del multipotenciostato diseñado.

Al analizar los datos obtenidos, se observa que al suministrar una señal de voltaje de valor negativo se tiene una señal de corriente de valor negativo, de igual forma al entregar a la celda una señal de voltaje con magnitud positiva se obtiene una señal de corriente con magnitud positiva, cumpliendo de esta forma la ley de Ohm.

Por otra parte, en la medición de procesos que involucran reacciones electroquímicas de óxido-reducción, la impedancia interna de la celda varía respecto del voltaje aplicado, por tanto la impedancia deja de ser un parámetro constante y pasa a ser variable, es así como se logran ver variaciones no lineales de la corriente respecto del voltaje en los datos obtenidos en la segunda prueba (ver Figura 12).

En la siguiente etapa se utilizó más de dos canales para que el dispositivo realice medidas simultáneas con la matriz de sensores. En la Figura 13 se muestran las gráficas de los voltamogramas logrados.

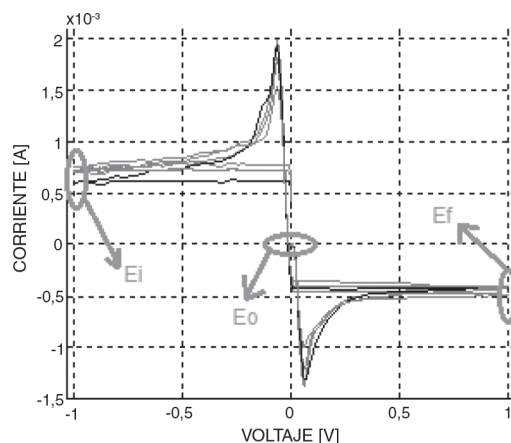


Figura 13. Voltamograma con varios canales activos.

Las últimas pruebas realizadas fueron con cinco diferentes muestras comerciales de café: la Bastilla, Córdoba, Almendra Tropical, Sello Rojo y Café Universal, teniendo en cuenta la norma NTC 3566 (preparación de muestras para uso en análisis sensorial), con el objetivo de evaluar la capacidad del sistema para discriminar muestras de distinta marca comercial.

La red de sensores que se trabajó fue elaborada en los laboratorios de la UPB a partir de electropolimerización de pirrol con diferentes agentes dopantes. Todos los sensores se generaron por cronoamperometría en una solución acuosa de pirrol (0,2 mol L⁻¹) y se utilizaron diferentes agentes dopantes en cada uno de los sensores (todos a 0,1 mol L⁻¹): ácido fosfotungstico, hexacianoferrato de potasio (II), sal sódica de ácido antraquinona-1,5 disulfónico, ferrocianuro de potasio (III), sal sódica de ácido dodecibencensulfónico y p-toluensulfonato de sodio.

Para la electropolimerización se utilizó una celda convencional de tres electrodos; un electrodo de referencia de Ag/AgCl (saturado), una lámina de platino como electrodo auxiliar y como sustratos (electrodo de trabajo), para la polimerización se empleó electrodos de disco.

Las muestras de café fueron medidas de forma aleatoria con el dispositivo multicanal. Una vez

preparadas las muestras se procedió a realizar las medidas a temperatura ambiente, en un rango de potencial de -1,0 V a 0,5 V con una velocidad de barrido de 100 mV/s.

Para cada medida fue necesario realizar inicialmente 10 voltamperogramas para estabilizar las señales y luego se colectaron las medidas para alimentar el sistema de tratamiento de datos. A cada muestra se le realizaron ocho medidas para probar la repetitividad del método.

Las condiciones de polimerización son resumidas en la Tabla 2, y en la Figura 14 se muestra, como ejemplo, la respuesta de los sensores frente a diferentes muestras de café Córdoba. La variedad de respuesta de los sensores evidencia la alta selectividad cruzada de la red. Se demostró el buen funcionamiento del sistema multicanal diseñado. De esta manera, los datos suministrados por las señales electroquímicas de la red de sensores pueden ser utilizados para diferenciar y clasificar las muestras de café sin necesidad de analizar sus componentes particulares

Tabla 2. Condiciones de polimerización de la red de sensores de polipirrol.

Sensor Acónimo	Concentración Py/Dopante	Epolimerizado	T _{polimerizado} (s)
PPy/SO ₄	0,2 M/0,05 M	0,8 V	50
PPy/HCF	0,2 M/0,1 M	0,8 V	25
PPy/AQDS	0,2 M/0,1 M	0,8 V	50
PPy/FCN	0,2 M/0,1 M	0,8 V	20
PPy/DBS	0,2 M/0,1 M	0,8 V	50
PPy/PTS	0,2 M/0,1 M	0,8 V	50

El sistema trabaja con diferentes cantidades de sensores que van desde uno hasta un máximo de ocho, con esta cantidad de canales es suficiente para que el dispositivo registre señales típicas de una lengua electrónica que en la actualidad cuando se trabajan con señales voltamétricas se utilizan por lo general 6 sensores.

CONCLUSIONES

El multipotenciostato diseñado demostró la efectividad en la aplicación llevada a cabo, utilizando

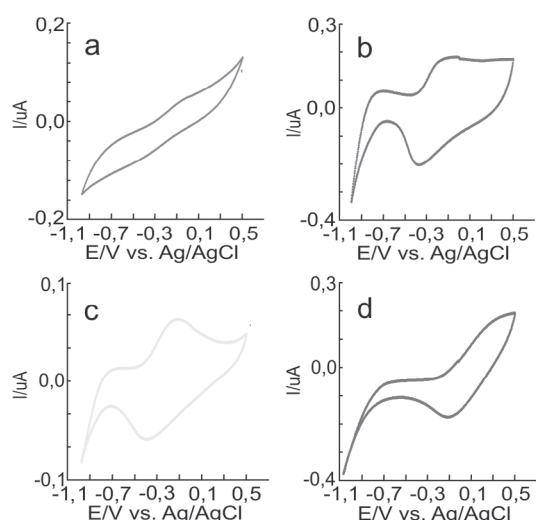


Figura 14. Voltamograma registrados con el sistema multicanal diseñado a diferentes muestras de café Córdoba: a) PPy/AQDS, b) PPy/DBS, c) PPy/PWA y d) PPy/PTS.

la técnica electroquímica de voltametría cíclica. En él se establecieron parámetros puntuales de potenciales aplicados a las sustancias utilizadas, lo que permite tener más control sobre las prestaciones del dispositivo y manejar mejor el acoplamiento con la matriz de sensores y el *software* de control y tratamiento de datos. De esta forma puede llegar a tener un mayor impacto en los diferentes procesos industriales, debido al desarrollo científico y tecnológico que está alcanzando esta clase de sistemas de medida.

Tomando como referencia los resultados obtenidos (ver Figura 13) se pueden destacar los intervalos de suministro de potenciales a la celda electrolítica (E_o, E_i y E_f), la velocidad y número de pasos aplicados, debido a que el usuario puede definirlos en cada prueba para el estudio de casos específicos, esto influye directamente en el análisis del experimento.

La utilización de la instrumentación virtual mediante el *software* Labview ® facilita y permite una mejor programación de la interfaz de usuario llevando a cabo la tarea solicitada, en este caso, la interfaz de la lengua electrónica, de una forma más concreta y versátil, así como la correcta manipulación de los módulos de adquisición de datos primordiales para la manipulación de las variables empleadas en el análisis electroquímico.

Las ventajas de utilizar módulos especializados, como los NI 9203, 9263 y 9174, son su prestación de servicios de adquisición de señales y acoplamiento con periféricos, en este caso el sistema básico del multipotenciostato y el PC, al permitirse conectar directamente y manipular mediante la instrumentación virtual las señales necesarias sin utilizar circuitos extra como convertidores análogos digitales (ADC), digital análogo (DAC), microcontroladores o circuitos de acoplamiento como convertidores de voltaje a corriente, corriente a voltaje o sumadores restadores.

El sistema multicanal diseñado fue enfrentado a diferentes muestras de café (de diferentes marcas), registrando señales que se convierten en una huella dactilar de cada una de las muestras debido a que cada sensor proporciona una curva característica que puede ser utilizada para llevar a cabo la discriminación de dichas muestras. Demostrando así el funcionamiento correcto del instrumento diseñado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero brindado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación-Colciencias y la Universidad Pontificia Bolivariana-Montería.

REFERENCIAS

- [1] K. Persaud and G. Dodd. "Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose". *Nature*. Vol. 229, pp. 352-355. 1982.
- [2] J. Gardner, H. Shin, E. Hines and C. Dow. "An electronic nose system for monitoring the quality of potable water". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 69, pp. 336-341. 2000.
- [3] C. Natale, A. Macagnano, E. Martinelli, R. Paolesse, E. Proietti and A. D'Amico. "The evaluation of quality of post-harvest oranges and apples by means of an electronic nose". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 78, pp. 26-31. 2001.
- [4] L. Lvova, S. Shin, A. Legin, Yu. Vlasov, J. Soo, G. Sig and H. Nam. "All-solid-state electronic tongue and its application for beverage analysis". *Analytica Chimica Acta*. Vol. 468, pp. 303-314. 2002.
- [5] F. Winkvist, P. Wide and I. Lundströma. "An electronic tongue based on voltammetry". *Analytica Chimica Acta*. Vol. 357, pp. 21-31. 1997.
- [6] F. Winkvist, I. Lundström and P. Wide. "The combination of an electronic tongue and an electronic nose". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 58, pp. 512-517. 1999.
- [7] K. Toko. "Taste sensor with global selectivity". *Materials Science and Engineering: C*. Vol. 4, pp. 69-82. 1996.
- [8] A. Requena y L. Balibrea. "Traídas. Nuevas lecturas en ciencia y tecnología". Netbiblo, S.L. España. 2008.
- [9] Yu. Vlasov, A. Legin and A. Rudnitskaya. "Electronic tongues and their analytical application". *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. Vol. 373, pp. 136-146. 2002.
- [10] V. Parra, Á. Arrieta, J. Fernández-Escudero, M. Rodríguez-Méndez and J. De Saja. "Electronic tongue based on chemically modified electrodes and voltammetry for the detection of adulterations in wines". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 118, pp. 448-453. 2006.
- [11] S. Tian, S. Deng and Z. Chen. "Multifrequency large amplitude pulse voltammetry: A novel electrochemical method for electronic tongue". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 123, pp. 1049-1056. 2007.
- [12] C. Jiménez, F. Muñoz, A. Bratov y C. Domínguez. "Lenguas electrónicas: sensores químicos aplicados a la medida del sabor y al control de calidad de los alimentos". I Encuentro Internacional Ciencias Sensoriales y de la Percepción. Instituto de Microelectrónica de Barcelona. Barcelona, España. 2002.
- [13] Yu. Vlasov, A. Legin and A. Rudnitskaya. "Electronic Tongue: Chemical Sensor Systems for Analysis of Aquatic Media". *Russian Journal of General Chemistry*. Vol. 78, pp. 2532-2544. 2007.
- [14] Yu. Vlasov and A. Legin. "Non-selective chemical sensors in analytical chemistry: from "electronic nose" to "electronic tongue"". *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*. Vol. 361, pp. 255-260. 1998.
- [15] L. Pigani, G. Foca, K. Ionescu, V. Martina, A. Ulrici, F. Terzi, M. Vignali, C. Zanardi and R. Seeber. "Amperometric sensors based on

- poly (3,4-ethylenedioxythiophene)-modified electrodes: Discrimination of white wines". *Analytica Chimica Acta*. Vol. 614, pp. 213-222. 2008.
- [16] A. Riul Jr., H. de Sousa, R. Malmegrim, D. dos Santos Jr., A. Carvalho, F. Fonseca, O. Oliveira Jr. and L. Mattoso. "Wine classification by taste sensors made from ultra-thin films and using neural networks". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 98, pp. 77-82. 2004.
- [17] K. Beullens, P. Mészáros, S. Vermeir, D. Kirsanov, A. Legin, S. Buysens, N. Cap, B. Nicolaï and J. Lammertyn. "Analysis of tomato taste using two types of electronic tongues". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 131, pp. 10-17. 2008.
- [18] V. Parra, Á. Arrieta, J. Fernández-Escudero, H. García, C. Apetrei, M. Rodríguez and J. De Saja. "E-tongue based on a hybrid array of voltammetric sensors based on phthalocyanines, perylene derivatives and conducting polymers: Discrimination capability towards red wines elaborated with different varieties of grapes". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 115, pp. 54-61. 2005.
- [19] A. Arrieta y K. Osorio. "Sensores electroquímicos de *polipirrol* como unidades sensibles de una lengua electrónica para el análisis de café". XXIX Congreso latinoamericano de química. Cartagena Colombia. 2010.
- [20] V. Parra, Á. Arrieta, J. Fernández-Escudero, M. Íñiguez, J. De Saja and M. Rodríguez-Méndez. "Monitoring of the ageing of red wines in oak barrels by means of and hybrid electronic tongue". *Analytica Chimica Acta*. Vol. 563, pp. 229-237. 2006.
- [21] A. Rudnitskaya, E. Polshin, D. Kirsanov and J. Lammertyn. "Instrumental measurement of beer taste attributes using an electronic tongue". *Analytica Chimica Acta*. Vol. 646, pp. 111-118. 2009.
- [22] A. Arrieta and R. Tarazona. "Study of kinetic formation and the electrochemical behavior of polypyrrole films". *Journal of the Chilean Chemical Society*. Vol. 54, pp. 1568-1573. 2008.
- [23] K. Toko. "Electronic Sensing of Tastes". *Electroanalysis*. Vol. 10, pp. 657-669. 1998.
- [24] G. Verrelli, L. Francioso, R. Paolesse, P. Siciliano, C. Di Natale, A. D'Amico and A. Logrieco. "Development of silicon-based potentiometric sensors: Towards a miniaturized electronic tongue". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 123, pp. 191-197. 2007.
- [25] M. Pividori. "Nuevos genosensores amperométricos, diseño y construcción". Memoria para optar al grado de doctor en Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Barcelona. 2002. Fecha de consulta: 20 de abril de 2010. URL: <http://ddd.uab.cat/pub/tesis/2002/tdx-1122104-173753/msp1de4.pdf>
- [26] J. González. "Técnicas y métodos de laboratorio clínico". 2ª Edición. Manson S.A. Barcelona, España. 2005.
- [27] P. Ivarsson, Y. Kikkawa, F. Winqvist, Ch. Krantz-Rülcker, N. Höjer, K. Hayashi, K. Toko and I. Lundströma. "Comparison of a voltammetric electronic tongue and a lipid membrane taste sensor". *Analytica Chimica Acta*. Vol. 449, pp. 59-68. 2001.
- [28] C. Krantz-Rülcker, M. Stenberg, F. Winqvist and I. Lundström. "Electronic tongues for environmental monitoring based on sensor arrays and pattern recognition: a review". *Analytica Chimica Acta*. Vol. 426, pp. 217-226. 2001.
- [29] S. Kounave. "Voltammetric Techniques". En: Frank Settle, ed. *Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry*. United States of America: Prentice Hall. Ch 37, pp. 709-725. 1997.
- [30] J. Lopes. "Desenvolvimento de sistemas portáteis de monitoramento eletroquímico". Msc. Escola Politécnica da Universidad de São Paulo. 2007. Fecha de consulta: 25 de mayo de 2010. URL: <http://pandora.cisc.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-06072007-161054/publico/Dissertacaorevisaocatalog.pdf>
- [31] J. Lajara and J. Pelegrí. "LabVIEW Entorno gráfico de programación". Marcombo. Barcelona, España. 2007.
- [32] National Instruments Datasheet. "Operating Instructions and Specifications NI 9263". National Instruments Corp. February, 2009.
- [33] Analog Devices. "Next Generation OP07 Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier, OP77". Date of visit: April 27,

2010. URL: <http://www.datasheetcatalog.com/>
- [34] National Instruments Datasheet. "Operating Instructions and Specifications NI 9203". National Instruments Corp. February, 2008. National Instruments Datasheet, "User Guide and Specifications NI cDAQ-9178/9174". National Instruments Corp. 2009.
- [35] National Instruments Datasheet. "User Guide and Specifications NI cDAQ-9178/9174". National Instruments Corp. October, 2009.