

# Potenciómetro con Comunicación USB sobre LPCXpresso y FreeRTOS

Gustavo Luis Arluna

Axel Lucas Gómez Caamaño

Hernán Matías Trinidad

Departamento de Electrónica  
UTN Facultad Regional Avellaneda  
[gustavoarluna@gmail.com](mailto:gustavoarluna@gmail.com)  
[gomezaxel.lucas@gmail.com](mailto:gomezaxel.lucas@gmail.com)  
[hernantri@gmail.com](mailto:hernantri@gmail.com)

## RESUMEN

Utilizando el microcontrolador ARM de la familia Cortex M3 LPC1769 (NXP), o comúnmente denominado LPCXpresso, se desarrolló un instrumento de medición de tensión y corriente ó potenciómetro utilizando el sistema operativo embebido FreeRTOS. El potenciómetro realiza las mediciones a 3 electrodos.

Las funciones que posee el instrumento son:

- Medir la corriente de una sustancia al inyectar tensión alterna por: barrido cíclico o lineal.
- Adaptar la señal corriente medida para poder graficar y exportar los datos para un posterior análisis.
- Ser comandado por una aplicación para PC por medio de comunicación USB (en Windows 10).

## PALABRAS CLAVE

Potenciómetro, Barrido Lineal, Barrido Cíclico, Voltamperograma, Voltamperometría, Sistema embebido FreeRTOS, Microcontrolador Cortex M3, Comunicación USB.

## INTRODUCCIÓN

El potenciómetro es un dispositivo electrónico utilizado en la mayoría de los experimentos electroquímicos. Es un instrumento de medida capaz de caracterizar la impedancia de una sustancia por medio de la medición de corriente en un electrodo trabajo cuando se inyecta una señal de tensión entre los electrodos auxiliar y de trabajo, y la medición de dicha tensión en el electrodo de referencia.

Mediante la utilización de dicho instrumento un experto puede discernir la existencia o no de una determinada sustancia y hallar su concentración en función a la curva de histéresis medida en Tensión/Corriente. Dicha curva es el resultado producto de la reacción electroquímica sucedida en la sustancia por medio de la interfaz electrodo-solución.

Según el tipo de variables a medir o la señal que actúa sobre el electrodo será el tipo de estudio que se realiza sobre un determinado analito y consecuentemente se obtiene un tipo de información. Entre los casos más relevantes se encuentran la Potenciómetría, Coulombimetría y la Voltamperometría.

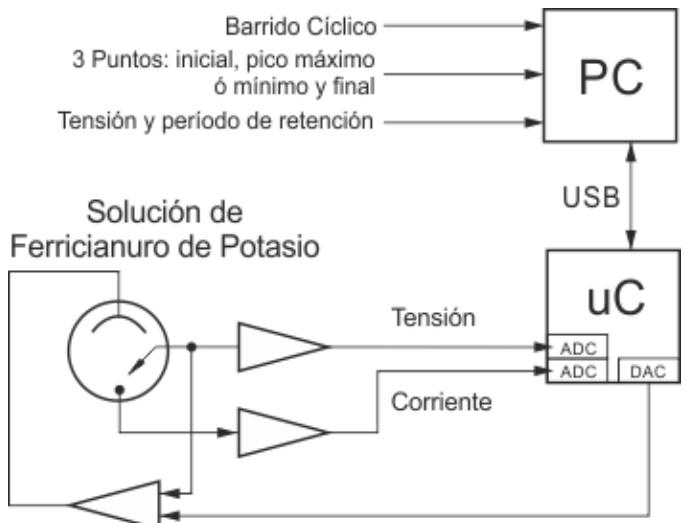


Fig 1. Modelo esquematizado del potenciómetro

El proyecto se focaliza en la Voltamperometría en la que se mide la corriente en función del potencial aplicado, y dentro de la cual se pueden clasificar según el tipo de excitación como Voltamperometría cíclica, de barrido lineal, escalonada, de onda cuadrada, de corriente alterna, entre otros.

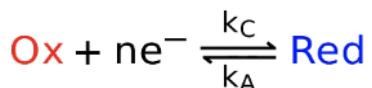
Desde el punto de vista electrónico, se puede considerar al potenciómetro como un generador de señales arbitrarias que permite al usuario realizar distintos análisis, al inyectar al electrodo una señal triangular con determinación por 3 puntos:

punto inicial, pico máximo o mínimo y punto final. Adicionalmente se puede especificar la velocidad de barrido, cantidad de ciclos y el período de retención.

#### MARCO TEÓRICO

El potenciómetro interactúa con un medio acuoso por el cual circulan corrientes iónicas que a través de las reacciones de reducción y oxidación, producidas en las interfaces electrodo-solución, pasan a ser corrientes eléctricas las cuales se deben medir.

Estas reacciones, conocidas como reacciones redox, se dan cuando hay un intercambio de electrones entre dos sustancias o especies químicas. Una de las sustancias químicas se reduce (gana electrones) mientras que la otra se oxida ( pierde electrones). Una de las sustancias interviniéntes corresponde con electrodo que aporta o recibe electrones en la reacción y dará lugar a la corriente eléctrica a medir. La ecuación de equilibrio químico de la reacción está dada por:



Siendo **Ox** el elemento que se oxida, **Red** elemento que se reduce y **ne<sup>-</sup>** el número de electrones que se intercambian en la reacción. Las flechas en ambas direcciones indican que es una reacción reversible dependientes de las constantes de velocidad de semirreacción en sentido catódico *k<sub>C</sub>* y anódico *k<sub>A</sub>*.

La **voltamperometría cíclica** es una técnica electroquímica que consiste en suministrar un potencial a una sustancia, el que varía en forma de rampa, mientras se miden las corrientes producidas durante la reacción. La variación de las corrientes con respecto a la rampa de potencial resulta en un gráfico conocido como voltamperograma. Las curvas presentes en los voltamperogramas son características de las propiedades químicas de la muestra a la cual se le realice la técnica y del material del sensor que entra en contacto con ella.

La señal aplicada tiene forma triangular. El electrodo irá aumentando linealmente su potencial y producirá un aumento en la cantidad de reacciones y de electrones intercambiados, y por lo tanto, de la corriente que se mide. Dicho fenómeno sucederá hasta que el electrodo se “sature” por agotar las

reacciones. A pesar de que se siga aumentando el potencial la corriente tenderá a disminuir.

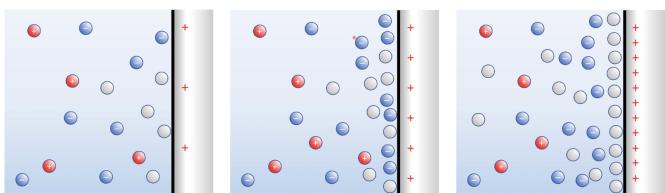


Fig. 2. Proceso de iones en la proximidad del ánodo. Cationes en rojo, aniones en azul y cargas neutras en gris.

Al disminuir el potencial en el electrodo se produce el proceso inverso dando lugar a un ciclo de histéresis, del cual se puede obtener la corriente pico, las pendientes de oxidación-reducción y el potencial estándar de la celda (Fig. 3).

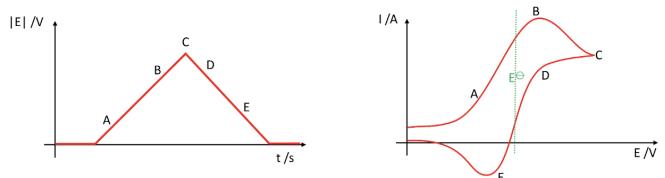


Fig. 3. Curvas de tensión y tensión/corriente aplicada

#### POTENCIOSTATO

El potenciómetro está dotado de un microcontrolador LPCXpresso 1769 y electrónica necesaria (Fig. 4) para la adaptación de señal tanto en la salida (generador de señal por medio del conversor digital-analógico) como en sus entradas de medición de tensión y corriente (conversor digital-analógico).

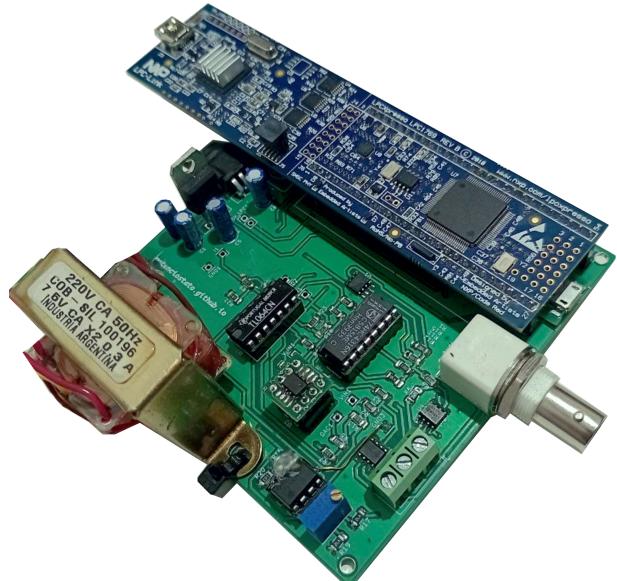


Fig 4. Potenciómetro con microcontrolador montado y contenedor de sustancias con sus respectivos electrodos.

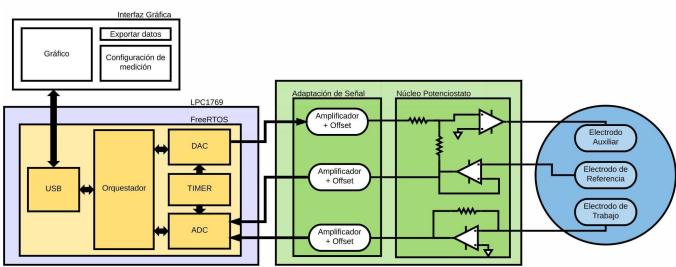


Fig 5. Diagrama en bloques del potenciómetro

Desde la aplicación en PC se inicia la comunicación por USB en la cual se configura al microcontrolador con la medición a realizar. Para iniciar la medición el microcontrolador inicializa las tareas de FreeRTOS, las cuales poseen como mecanismo de sincronismo semáforos y colas, para configurar el DAC y los 2 canales de ADC para dar comienzo a la medición. Una vez iniciada la medición, desde el lado del microcontrolador, se encolan los valores medidos de ADC tensión y corriente para preparar la información a enviar. Al mismo tiempo y en intervalos regulares, la aplicación en PC solicita dichos datos que por medio de un protocolo de comunicación USB con tamaño de trama 20 bytes envía hasta 3 datos/mediciones a la vez con el objetivo de poder graficarlos en la pantalla.

## FUNCIONAMIENTO

Tanto la configuración y el control del instrumento, así como la presentación de los datos requieren que el instrumento esté conectado a la PC mediante un cable USB.

En la aplicación se encuentran dos botones para conectar o desconectar el instrumento. Se configura el tipo de medición a realizar, así como la frecuencia o periodo de la medición, la cantidad de ciclos y la amplitud de la señal. Una vez elegidos los parámetros, se inicia la medición con el botón iniciar medición.

Cuando se inicia la medición el programa se comunica con el LPC enviando un paquete con la configuración definida por el usuario. La recepción del mensaje desde el lado del LPC desbloquea la tarea USB encargada de procesar esta información y desbloquear a las tareas de ADC y DAC para que configuren los respectivos periféricos.

Una vez que ambos periféricos se encuentran listos se da comienzo a la medición. La tarea que controla el DAC empieza a generar la señal mientras que la tarea del ADC inicia a leer los valores de las señales.

La señal triangular que se inyecta es configurada por medio de los tres puntos arbitrarios elegidos y su respectivo período y tensión de retención. Mientras haya datos el programa hará peticiones de datos e irá sumando dichos puntos a la gráfica.

Cuando ya no haya más datos se avisa al programa para que no haga más peticiones y se finaliza la medición, volviendo al estado inicial quedando listo para una nueva medición.

## COMPONENTES

La electrónica analógica (Figs. 6, 7, 8 y 9) se compone de las siguientes etapas:

- Amplificador de la señal generada desde el DAC hacia el electrodo auxiliar.
  - Amplificador transresistencia en electrodo de trabajo
  - Amplificador de ganancia variable utilizando llaves analógicas controladas por LPC
  - Seguidor de tensión en electrodo de referencia.
  - Adaptación de señales de salida de:
    - Amplificador transresistencia al ADC de corriente.
    - Seguidor de tensión al ADC de tensión.
  - Fuente de alimentación

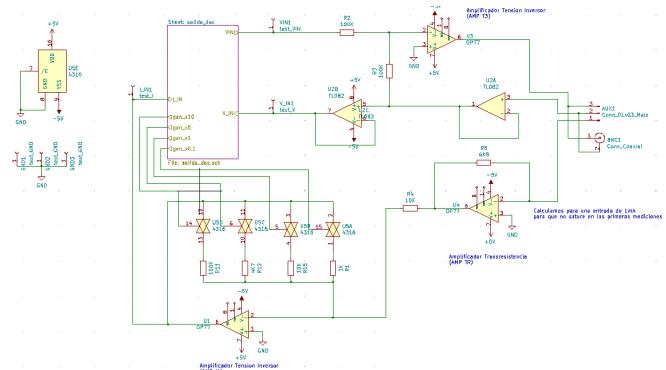


Fig 6. Esquemático etapa de amplificación señal de electrodos

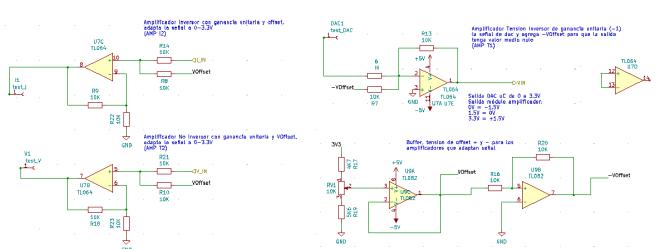


Fig 7. Esquemático etapa de adaptación de señal

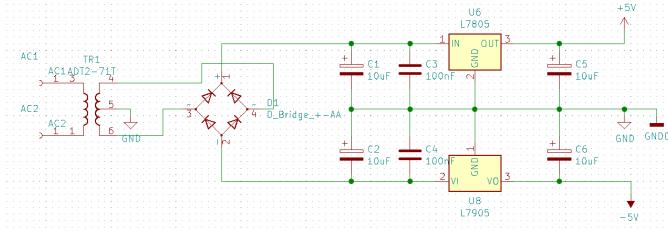


Fig 8. Esquemático del integrado de la fuente de alimentación +5V

Desde el lado de la parte digital, el microcontrolador está conectado por medio de USB al conector externo el cual se conecta con la PC. Asimismo, posee conexión directa con la parte analógica en lo que respecta al DAC y los 2 canales de ADC.

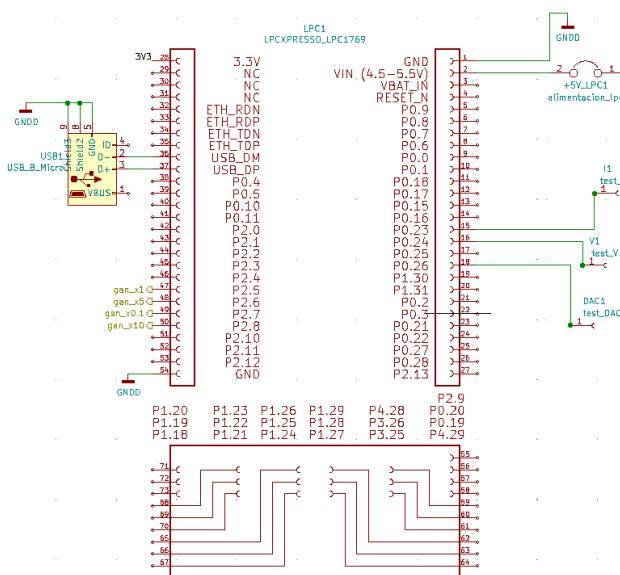


Fig 9. Esquemático del conexionado desde y hacia el LPCXpresso con USB incluido.

#### SISTEMA OPERATIVO

FreeRTOS es un sistema operativo embebido en tiempo real. Se caracteriza por proveer las herramientas básicas de un sistema operativo, como son scheduler, tareas y mecanismos de sincronización. El sistema diseñado consta de 3 Tareas cada una encargada de una función específica, estas son:

- vUSBTask: Coordinación de las tareas restantes en base a los comandos recibidos por usb.
- vDACTask: Recibe la configuración y controla todas las operaciones referidas al DAC
- vADCTask: Recibe la configuración y controla todas las operaciones referidas al ADC

Además de las tareas se utilizan las siguientes rutinas de interrupción.

- USB\_IRQHandler: Interrumpe ante la recepción de un dato por parte del host.
- ADC\_IRQHandler: Interrumpe y lee los valores de ADC para los canales 0 y 1.
- DMA\_IRQHandler: Interrumpe e informa que se terminó el envío de DMA hacia DAC.

Además cuenta con distintos semáforos para sincronización entre tareas y colas para el envío de datos.

#### INTERFAZ DE LA APLICACIÓN EN PC

La interfaz de usuario (Fig. 10) está implementada en Qt Creator y es la encargada de interactuar con el microcontrolador teniendo como parámetros de entrada de la medición:

- Tipo de medición: Barrido Cíclico
- Tres puntos para la señal triangular:
  - Punto inicial
  - Pico máximo ó mínimo
  - Punto final
- Tensión de retención y tiempo de retención
- Velocidad de barrido
- Cantidad de ciclos

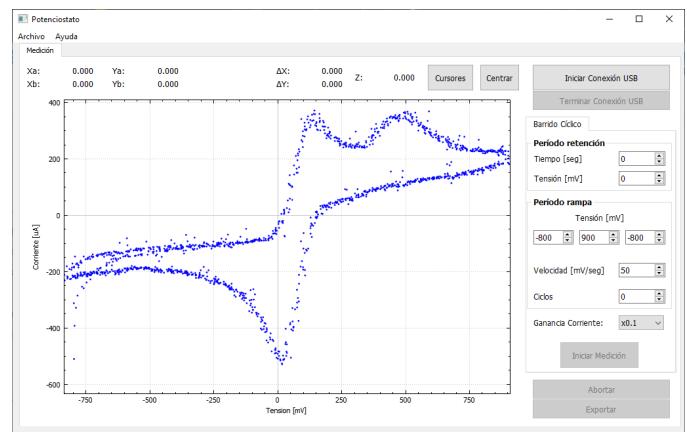


Fig 10. Interfaz de usuario con representación de la medición de Ferricianuro de Potasio por Voltamperometría Cíclica.

La interfaz de usuario posee botones para:

- Iniciar y terminar conexión con el dispositivo
- Iniciar medición
- Abortar la medición
- Exportar los datos de la medición, luego de terminada la misma, en formato csv
- Habilitar el uso de cursores
- Autoescalar o centrar la pantalla según los datos obtenidos

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Las especificaciones técnicas del instrumento son:

- Rango de corriente de medición: 150uA a 15mA
- Sensibilidad de corriente: 2uA (escala x0.1)
- Error de medición 2% de plena escala
- Conversor Analógico Digital (ADC) 12 bits
- Conversor Digital Analógico (DAC) 10 bits
- Amplitud de señal máxima  $\pm 1400\text{mV}$
- Forma de onda triangular determinación por 3 puntos
- Exportar/Importar voltamperograma en CSV
- Tensión de alimentación: 220V
- Certificación eléctrica: IEC 61010:2010 - Requerimientos para equipamiento eléctrico para medición, control y uso en laboratorios
- Requisitos PC y Sistema Operativo:
  - Comunicación USB
  - Sistema operativo: Windows

## REPOSITORIO DE SOFTWARE

El software utilizado por el LPC1769 fue MCUXpresso IDE v11.5.0\_7232 y de la interfaz gráfica realizada Qt Creator 4.15.0 (Community). Todo el código fuente puede encontrarse en la página web del proyecto: <https://potencistato.github.io/>

## REFERENCIAS

- [1] D. A Skoog, D. M. West, F. J. Holler, S. R. Crouch, Fundamentals of Analytical Chemistry (Brooks Cole 2003) .p678.
- [2] R. Villaseñor, F.A. Hernández, Circuitos eléctricos y aplicaciones digitales. (Pearson 2013). pp470-495
- [3] Further Physical Chemistry: Electrochemistry session 10 - video: <https://www.youtube.com/watch?v=LiRqWcgJkb4&t=483s>
- [4] P. Kissinger, T. Heineman, R William, Laboratory techniques in electroanalytical Chemistry 2nd ed (Marcel Dekker NY1996) pp173-191.
- [5] R. Greef, J.Physics E:Sci. Instrum., Vol11,1978.pp1-12.
- [6] R. Holze, Experimental electrochemistry. (Wiley-VCH 2009).pp1-10.
- [7] CheapStat: An Open-Source, “Do-It-Yourself” Potentiostat for Analytical and Educational Applications - web: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0023783>
- [8] Building a Microcontroller Based Potentiostat: A Inexpensive and Versatile Platform for Teaching Electrochemistry and Instrumentation - web: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.5b00961>
- [9] PSOC-Stat: A single chip open source potentiostat based on a Programmable System on a Chip - web: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0201353>
- [10] A USB-controlled potentiostat/galvanostat for thin-film battery characterization - web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067217300317>
- [11] NXP Semiconductors - web: <http://www.nxp.com/>
- [12] FreeRTOS (Real Time Operating System) - web: <http://www.freertos.org/>