

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**SISTEMA PORTÁTIL DE ADQUISICIÓN  
GEOLOCALIZADA DE CONCENTRACIÓN  
DE PLOMO EN RÍOS POR MEDIO DE  
VOLTAMETRÍA**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

Para optar el grado de bachiller en Ingeniería Electrónica

**AUTOR:**

José Luis Pérez Galindo (201520175)

**ASESOR:**

Jimmy Fernando Tarrillo Olano (ORCID: 0000-0001-5140-7984)

Lima - Perú

2021

# Índice general

	Pág.
<b>RESUMEN</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO</b>	<b>10</b>
3.1 VOLTAMETRÍA . . . . .	10
3.1.1 Voltametría de barrido lineal . . . . .	10
3.1.2 Voltametría de onda cuadrada . . . . .	11
3.1.3 Voltametría cíclica . . . . .	12
3.1.4 Voltametría de redisolución anódica . . . . .	13
3.2 CELDA VOLTAMÉTRICA . . . . .	14
3.3 POTENCIOSTATO . . . . .	16
3.4 MICROCONTROLADOR STM32L151 . . . . .	18
3.5 PERIFÉRICOS . . . . .	19
3.5.1 Sistema de Posicionamiento Global . . . . .	19
3.5.1.1 Geolocalización . . . . .	19
3.5.2 Bluetooth . . . . .	21

# Índice de figuras

3.1	Formas de onda para voltametría de barrido lineal. (a) tiempo vs potencial. (b) corriente vs potencial. . . . .	11
3.2	Generación de una señal de excitación para voltametría de onda cuadrada (c) a partir de la suma de una señal en escalera (a) y un tren de pulsos (b). . . . .	12
3.3	Respuesta de corriente ante la excitación de una señal similar a la mostrada en la Fig. 3.2c. . . . .	13
3.4	Forma de onda para voltametría cíclica. . . . .	14
3.5	Voltagrama cíclico. . . . .	15
3.6	Voltametría de redisolución anódica. Forma de onda del potencial en el tiempo (a) y Voltagrama de redisolución (b). . . . .	16
3.7	Diagrama esquemático de una celda voltamétrica. w.e: electrodo de trabajo; r.e: electrodo de referencia; c.e: electrodo auxiliar. . . . .	17
3.8	Diagrama esquemático de un circuito potencióstato. . . . .	17
3.9	Kit de desarrollo STM32L151. . . . .	19
3.10	Ubicación de un punto terrestre a partir de GPS. . . . .	20
3.11	NEO-6 GPS. . . . .	20
3.12	Data en formato NMEA. . . . .	21
3.13	Comparación entre versiones de módulos Bluetooth. . . . .	22
3.14	Módulo bluetooth low energy (BLE). . . . .	22

## **RESUMEN**

La contaminación del agua por metales pesados es un problema que repercute a todo el ecosistema, siendo el plomo uno de los contaminantes con mayor presencia en ríos peruanos. Según la ONU, 1.6 millones de peruanos están expuestos a enfermedades por intoxicación a causa del plomo, lo que provoca una necesidad de equipos de medición que recopilen información de la concentración de plomo existente en los ríos. El presente trabajo de investigación presenta los sistemas de adquisición de concentración de plomo mediante voltametría que han sido diseñados e implementados en los últimos años. El primer capítulo describe la problemática con relación a la contaminación del agua por plomo y realiza una introducción de los diferentes dispositivos electroquímicos que existen para la medición de la concentración de mencionado metal. El segundo capítulo presenta el estado del arte de dispositivos portátiles de adquisición de concentración de plomo usando voltametría. Finalmente, en el tercer capítulo se plantea el marco teórico utilizado para implementar o desarrollar un dispositivo portátil de adquisición de concentración de plomo en agua.

### **PALABRAS CLAVES:**

Sistema de adquisición; concentraciones de plomo; Voltametría; portátil; ppb

## **ABSTRACT**

Water pollution produced by heavy metals is a problem that is affecting the entire ecosystem. In Peruvian rivers, one of the more present pollutants is lead. According to the UN, 1.6 million Peruvians are exposed to diseases due to lead poisoning, which causes a need for measurement equipment that collects information on the lead concentration in rivers. This research work presents the lead concentration acquisition systems through voltammetry that have been designed and implemented in recent years. The first chapter presents the problem regarding water contamination by lead and introduces the different electrochemical devices for measuring the concentration of said metal. The second chapter shows the state of the art of portable lead concentration acquisition devices using voltammetry. Finally, the third chapter presents the theoretical framework used to implement or develop a hand-held device for lead concentration acquisition in water.

### **KEYWORDS:**

Acquisition system; lead concentration; voltammetry; portable

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua es un problema que afecta a todo el ecosistema. Dentro de los contaminantes más frecuentes encontrados en fuentes hídricas naturales están los metales pesados, especialmente, el plomo (Pb), mercurio (Hg), arsénico (As) y cadmio (Cd) [1], los cuales, al ser elementos no-biodegradables y tener la tendencia de reaccionar con micro-organismos vivos o adherirse a ellos, son altamente tóxicos para la salud. En ríos cercanos a zonas de influencia minera hay riesgo de alta contaminación por concentración de metales pesados. En menor medida, están las zonas hídricas donde el agua está contaminada por enriquecimiento natural al atravesar acuíferos formados por rocas que contienen diferentes metales pesados en su composición [2].

El plomo es uno de los metales con más presencia en el mundo. Sus partículas pueden ser encontradas en la corteza terrestre, aire y agua. Dentro de las principales fuentes de contaminación destacan la minería, metalurgia y actividades de fabricación y reciclaje [3]. Según el MINSA, los límites máximos permisibles de plomo en la sangre en niños y adultos son de 10 ug/dl y 20 ug/dl respectivamente [4]. Un estudio realizado por la OMS explica que aproximadamente 1.6 millones de peruanos están expuestos a enfermedades por intoxicación debido a que viven en zonas de influencia minera o cerca a ellas [5]. La cantidad permisible de plomo en recursos hídricos para consumo humano en el Perú es de 0.05 mg/L [6]. Por tal motivo, la detección y medición de concentración de plomo es de gran importancia y es por la misma razón, que al día de hoy, la necesidad de tener equipos portátiles de medición in-situ ha incrementado notoriamente.

Existen diversos equipos de medición de concentración de plomo. Las características que ofrecen dependen, principalmente, de la instrumentación utilizada para la adquisición de datos. Dentro de las técnicas analíticas más utilizadas para hallar la concentración de plomo están las basadas en espectroscopia, tales como absorción atómica (AAS), emisión atómica (AES) y fluorescencia. Técnicas que se caracterizan por su alta precisión y selectividad; pero que para conseguir ello se necesita de equipos especializados (espectrómetros), largos tiempos de análisis y un experto en el tema [7], lo cual dificulta el análisis in-situ en la zona de influencia o al implementarlo de forma portable, como es el caso de espectroscopia de fluorescencia, reduce la capacidad de sus características de forma apreciable. Por otro lado, tenemos la técnica de voltametría, la cual posee características como confiabilidad, alta sensibilidad y selectividad [8]. Sin embargo, para su análisis in-situ en la zona de influencia, esta técnica requiere de un dispositivo de adquisición instrumental, siendo el potencióstato uno de los circuitos más utilizados para esta tarea por su compatibilidad con diferentes tipo de sensores voltamétricos.

Se han desarrollado diferentes soluciones a sistemas de adquisición de concentración de metales pesados basados en voltametría. Gran parte propone una solución efectiva en cuanto a sistemas portátiles de medición de la concentración en valores cercanos a las partes por millón (ppm). En contraste, existen fabricantes que proponen sistemas de adquisición capaces de medir cantidades cercanas a las partes por billón (ppb); sin embargo, la instrumentación utilizada para obtener datos con alta precisión implica que el sistema sea para uso estacionario en laboratorios.

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión de los dispositivos electroquímicos que existen en la actualidad para medir concentración de plomo en agua a niveles de partes por billón (ppb). Para ello, el trabajo se divide en dos partes: Antecedentes, donde se describe los diferentes dispositivos desarrollados por la comunidad ingenieril o por empresas comerciales y, la segunda parte donde se presenta la metodología utilizada para implementar un dispositivo portátil de medición de concentración de plomo. El alcance

del trabajo de investigación consiste en hacer una revisión exhaustiva de los equipos de medición ya existentes, el diseño y desarrollo de un dispositivo de adquisición de concentración de plomo, así como los resultados y conclusiones se presentará en otro trabajo.



## Capítulo 2

### ANTECEDENTES

El estudio del agua es un aspecto muy importante que es tenido en cuenta por diferentes entidades estatales y privadas. En el Perú, para conocer la concentración de plomo en ríos se procede a seguir el Protocolo de Monitoreo de Recursos Hídricos decretado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el cual demanda recursos humanos, uso de equipos especializados de laboratorio y, sobretodo, largos tiempos de espera [9].

Dentro del campo del análisis instrumental electroquímico, se puede encontrar diferentes técnicas y tecnologías para cuantificar la cantidad de metales pesados en agua. En [10] los autores describen los diferentes métodos que existen para el análisis de metales pesados en bajos niveles de concentración en ríos y su constante evolución en el tiempo, destacando la voltametría como un método preciso y de bajo costo instrumental. Del mismo modo, en [8] se manifiesta que la voltametría es uno de los métodos más utilizados para la medición de concentración de plomo por sus características como alta sensibilidad, selectividad y fácil implementación. Los autores de [11] especifican que las técnicas basadas en voltametría como onda cuadrada, cíclica, barrido lineal y redisolución anódica son capaces de determinar cantidades de concentración a niveles cercanos a las partes por billón (ppb). Para realizar diversos experimentos electroanalíticos utilizando técnicas voltamétricas se requiere de un potenciostato, hardware de instrumentación electrónica que mide la corriente del analito en reacción mediante el control de tres electrodos [12].

En el área de investigación existen diferentes propuestas referentes a la implementación de un sistema de adquisición de plomo usando un circuito potenciostato. Los autores de [13] presentan un circuito de uso libre (open source) denominado CheapStat, el cual soporta técnicas como barrido lineal, onda cuadrada, cíclica y redisolución anódica.

El rango de operación de potencial va desde -990 mV a 990 mV y puede detectar corrientes entre 100 nA y 50 uA. El sistema cuenta con un ADC de 12 bits, lo cual limita la medición de niveles bajos de concentración. El dispositivo es altamente referenciado por investigadores y académicos inmersos en la cuantificación de metales pesados en el agua.

En [14] se presenta el diseño de un potencioestado para biosensores electroquímicos. Se utiliza un C8051F005, microcontrolador de 8-bit de Silicon Labs, que cuenta con un ADC y dos DAC, conversores con resolución de 12-bits. Sobre su operación, el rango de potencial va de -2 V a 2 V con una resolución de 1 mV y mide corrientes entre 200 nA y 20 mA. La validación del sistema se realizó mediante voltametría cíclica para la medición de solución de nitrato con una tasa de 100 mV/s y un rango de escaneo de -0.2 V a -1.4 V. Los resultados se muestran en un voltograma (curva uA vs V), donde se evidencia que la solución reacciona en un potencial de -1V y que alcanza corrientes entre 0 uA y 340 uA que representan concentraciones entre 0 y 10000 ppm respectivamente.

Por otro lado, los autores de [15] presentan la implementación de un circuito de adquisición portable para aplicaciones con sensores electroquímicos en base papel. El circuito está basado en el microcontrolador ATmega328P, el cual controla un DAC externo de 12 bits y muestrea la información con un ADC externo de 12 bits. La validación del sistema se realiza con una muestra de ferricianuro de potasio ( $K_3[Fe(CN)_6]$ ) que reacciona con una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con un rango de operación entre -0.8 V y 0.8 V y con una tasa de 50mV/s. Se presenta el voltograma donde se puede observar que corriente de 1 uA a 20 uA se obtiene concentraciones entre 18 ppm y 71 ppm respectivamente. Las investigaciones [14] y [15] detalladas anteriormente presentan una solución para la medición de concentración de metales pesados a partir de su hardware propiamente diseñado, pero son sistemas eficaces para mediciones, solamente, de alta concentración, a niveles de ppm, más no a niveles de ppb. Si bien los describen como sistemas portátiles, estos pierden autonomía al necesitar de un computador externo para presentar los resultados de la data tomada.

En contraste a los sistemas descritos antes, los autores de [16] plantean una solución de alta precisión capaz de medir concentraciones de metales pesados cercanos a partes por billón (ppb). El sistema se comprende de un computador, potenciostato, actuadores y una celda de tres electrodos. Un computador externo controla el potenciostato, válvulas magnéticas y bombas peristálticas para realizar la medición, muestreo y limpieza del metal pesado de interés. DS80C323 es el microcontrolador que establece los valores del DAC y registra los resultados del ADC, de los cuales no se menciona su resolución. Los resultados son transmitidos a la computadora por puerto serie. La técnica utilizada para la validación del sistema es la de redisolución anódica con un rango de operación entre -1.8 V y -1,4 V para fierro y desde -1.4 V a 0.2 V para zinc, cadmio, plomo y cobre. Se obtiene valores de corriente para el plomo entre 0.2 uA y 0.8 uA que indican concentraciones entre los 3 ppb y 18 ppb respectivamente. La precisión, estabilidad y robustez del sistema se debe a la instrumentación utilizada, lo que le permite llegar a medir niveles de concentración cercanos a las partes por billón; sin embargo, es la misma instrumentación, también, la que imposibilita que el dispositivo sea usado en análisis de campo.

Respecto al área comercial, podemos encontrar una gran diversidad de dispositivos de adquisición compatibles a sensores voltamétricos. Por ejemplo, existen potenciostatos portátiles como EmStat3 [17] y Zive PP1e [18]. El primero tiene rangos de corriente de 1nA a 100mA y el segundo de 1nA a 100A. Ambos portátiles y de uso en campo; sin embargo, son equipos que carecen de selectividad por ser equipos multipropósito y de autonomía, pues se necesita de un computador externo para apreciar los resultados y análisis de la prueba tomada. Por otro lado, encontramos potenciostatos más robustos, de alta precisión, como los que propone Gamry con la serie 1000E [19] o Amelchem con el equipo 2553P [20]; sin embargo, su mayor desventaja es el déficit de análisis in-situ en la zona de influencia, pues su aplicación es netamente para laboratorios.

Las propuestas y/o dispositivos referenciados líneas atrás necesitan de un computador conectado al circuito para poder observar la cantidad de concentración y la representación gráfica de la corriente frente a la variación del potencial de escaneo. Los autores de [21] observan esta necesidad y proponen un sistema de adquisición remota de plomo en agua usando voltimetría por redisolución anódica. La propuesta se centra en dos estaciones, una remota y una base, las cuales están conectadas punto-punto mediante tecnología Xbee. La estación remota, basada en la plataforma CheapStat [13], mide la concentración de plomo y envía la data a un Raspberry Pi 3 (estación base) que está alejado 1.5 km. La data es guardada en una base de datos y enviada a la nube para que los usuarios interesados puedan observar la concentración desde cualquier ubicación.

Los autores de [22] presentan un sistema de detección de concentración de metales con comunicación inalámbrica. El sistema se basa en un microcontrolador RFduino, el cual contiene un procesador ARM de 32 bits, se comunica a través de I2C con el DAC y ADC con resoluciones de 10 bit, lo que le permite medir concentraciones a niveles de ppm. Utiliza tecnología Bluetooth Low energy, el cual permite comunicarse de forma inalámbrica con un dispositivo móvil que grafica el voltagrama de la reacción. Las dos investigaciones referenciadas recientemente proponen sistemas eficientes que brindan una mejor presentación de resultados. Si bien [21] no presenta un voltagrama de la reacción, soluciona el problema de medición en zonas de difícil acceso geográfico. Por otro lado, [22] presenta una solución que se orienta más a la medición de campo, pues, a través de un smartphone presenta el voltagrama de la reacción y la concentración del metal de interés.

## Capítulo 3

# MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se detalla el método seleccionado y las principales técnicas utilizadas para la detección de plomo. Así mismo, se describe el funcionamiento de una celda voltamétrica y de cada uno de los electrodos que lo componen. También, se especifica las características del microcontrolador a usar y de los periféricos definidos para el desarrollo de la tesis.

### 3.1 VOLTAMETRÍA

La voltametría es un método que se basa en la medición de la corriente que se produce en una celda voltamétrica en función del potencial aplicado. Las técnicas más utilizadas en voltametría para la medición de concentración de plomo son: Voltametría por barrido lineal, de onda cuadrada, cíclica y redisolución anódica.

#### 3.1.1 Voltametría de barrido lineal

La voltametría de barrido lineal (LSV-Lineal sweep voltammetry) es una de las técnicas más comunes y utilizadas en voltametría para el estudio de reacciones redox de componentes orgánicos e inorgánicos [23].

En voltametría de barrido lineal, el potencial dado al electrodo de trabajo cambia de forma lineal con el tiempo, ver Fig. 3.1(a). Empezando con un potencial  $E_i$ , donde no existe reacción, hasta llegar a  $E$ , donde ocurre la reducción (potenciales negativos) u oxidación (para potenciales positivos). De la curva, se obtiene la ecuación dada en 3.1,

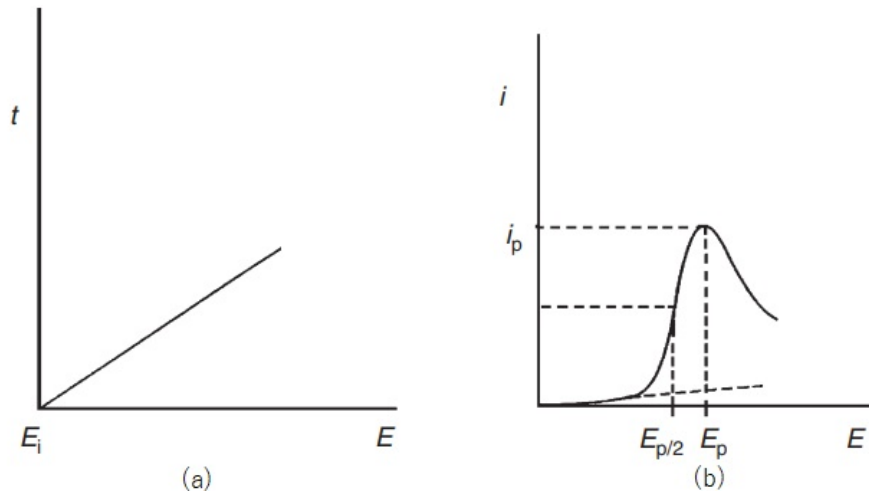


FIGURA 3.1: Formas de onda para voltametría de barrido lineal. (a) tiempo vs potencial. (b) corriente vs potencial. Referenciado de [23].

donde el signo depende de la dirección del potencial (positivo para barrido anódico y negativo para barrido catódico).

$$Et = Ei \pm vt \tag{3.1}$$

La forma de un voltagrama (resultado de una curva corriente vs potencial) de un experimento por barrido lineal se muestra en la Fig. 3.1(b). Se muestra la corriente pico  $i_p$ , su potencial (pico) correspondiente  $E_p$ , el potencial medio-pico  $E_p/2$  que corresponde a  $i_p/2$ . La corriente pico  $i_p$  es el parámetro que brinda información acerca de la concentración del metal a medir [23].

### 3.1.2 Voltametría de onda cuadrada

La voltametría de onda cuadrada se caracteriza por su alta velocidad y sensibilidad. Esta técnica se obtiene al interponer un tren de pulsos (Fig. 3.2b) sobre una señal como la que se muestra en (Fig. 3.2a), dando como resultado una onda cuadrada como en la Fig. 3.2c. La velocidad de muestreo está dada por la ecuación 3.2. Los valores de trabajo para

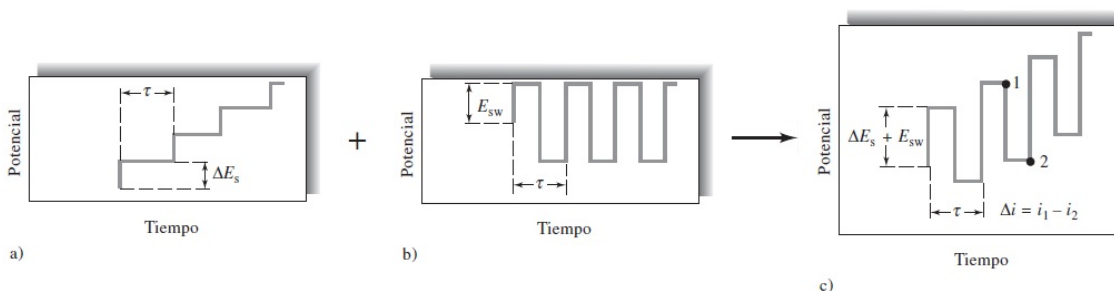


FIGURA 3.2: Generación de una señal de excitación para voltametría de onda cuadrada (c) a partir de la suma de una señal en escalera (a) y un tren de pulsos (b). Referenciado de [12].

$\Delta E_s$  y  $2E_{sw}$  son, comúnmente, 10 mV y 50 mV. Al trabajar a frecuencias cercanas a 200 Hz, la velocidad de escaneo alcanzaría un valor de 2 V/s, barriendo un 1 V en 0.5 s [24].

$$v = f\Delta E_s \quad (3.2)$$

La forma del voltograma producido por onda cuadrada se muestra en la Fig. 3.3. El valor de  $\Delta i$  representa la cantidad de concentración del elemento analizado, esta se obtiene a partir de la diferencia entre la corriente medida en el punto 1 y 2 (ver Fig. 3.2c). La técnica tiene un límite de detección de 3 ppb.

### 3.1.3 Voltametría cíclica

La voltametría cíclica consiste en escanear el potencial de un electrodo de trabajo usando una forma de onda triangular (ver Fig. 3.4). Se puede utilizar un único o múltiples ciclos. Un ciclo se comprende de un barrido lineal de forma directa (forward scan) y un barrido lineal inverso (reverse scan).

Durante el barrido, el potenciostato mide la corriente del potencial aplicado. El barrido lineal directo provoca una onda catódica con corrientes positivas y el barrido inverso, una onda anódica con corrientes negativas (ver Fig. 3.5). A diferencia de las demás

técnicas, el voltagrama cíclico es una función complicada y dependiente del tiempo de una gran cantidad de parámetros físicos y químicos [23].

### 3.1.4 Voltametría de redisolución anódica

La voltametría de redisolución anódica es una de las técnicas voltamétricas más sensibles. La gran ventaja de esta técnica es la preconcentración del material a analizar, pues de esta manera se evita las perturbaciones o impurezas residuales hacia la corriente voltamétrica [25].

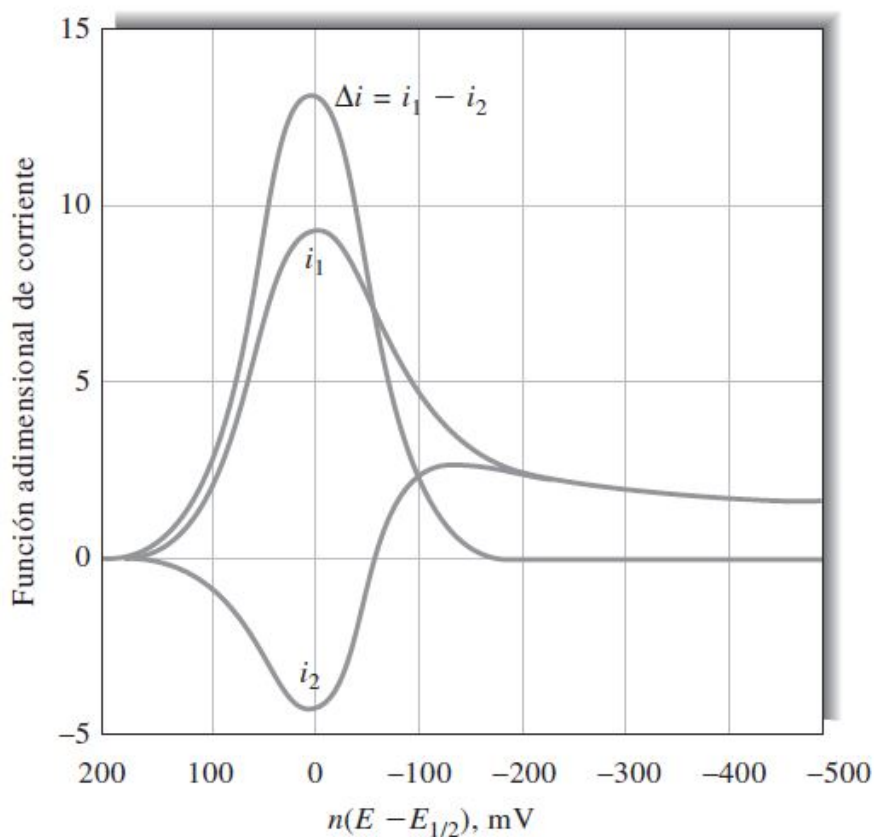


FIGURA 3.3: Respuesta de corriente ante la excitación de una señal similar a la mostrada en la Fig. 3.2c. Referenciado de [12].



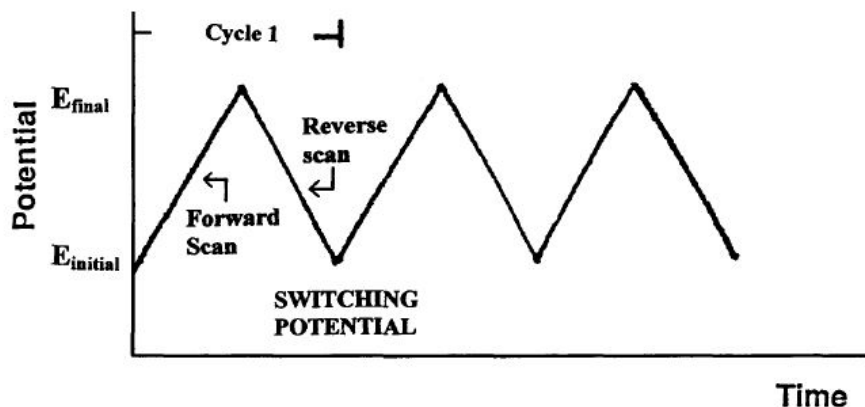


FIGURA 3.4: Forma de onda para voltametría cíclica. Referenciado de [24].

La voltametría de redisolución anódica (Anodic stripping voltammetry - ASV) es conformado por dos principales etapas: Acumulación y redisolución (ver Fig. 3.6a). En la primera etapa, el analito de interés se deposita en el electrodo de trabajo y la oxidación ocurren en la etapa de redisolución y se manifiesta como un pico de corriente a un potencial dado mientras se realiza el barrido (ver Fig. 3.6b) [25].

Las etapas mencionadas anteriormente se dividen en cuatro pasos más específicos. El primero es la limpieza, donde se mantiene un potencial oxidante mayor al del analito para eliminarlo del electrodo de trabajo. Como segundo paso, el potencial se reduce lo suficiente para depositar el analito en el electrodo. Durante estos pasos se mantiene una agitación constante. Para el tercer paso, la agitación se detiene y el electrodo se mantiene a potenciales más bajos para que el analito se distribuya uniformemente y, en el último paso, se oxida el analito, el cual, en el proceso, emite electrones que se miden como corriente [26].

### 3.2 CELDA VOLTAMÉTRICA

Una celda de tres electrodos es lo más usado en voltametría para análisis electroquímicos. Los electrodos son denominados de la siguiente manera: electrodo de trabajo,

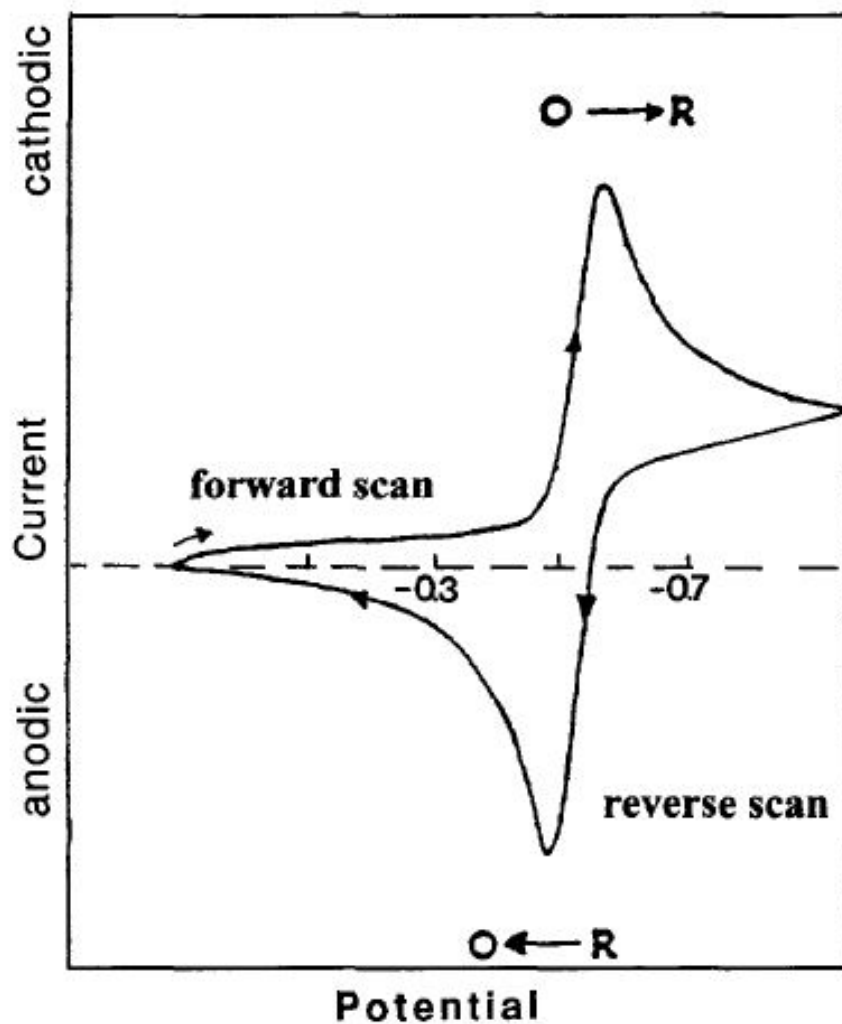


FIGURA 3.5: Voltograma cíclico. Referenciado de [24].

de referencia, auxiliar o contra-electrodo (ver Fig. 3.7). El primero, electrodo de trabajo, es donde se produce la reacción de interés con el analito, el electrodo de referencia proporciona un potencial constante con el cual se compara el potencial del electrodo de trabajo [24]. Mientras que el electrodo auxiliar o contraelectrodo, al aplicarle un potencial, compensa la reacción redox que sucede en el electrodo de trabajo [26]. La inyección de N<sub>2</sub> tiene como tarea desplazar las partículas de oxígeno para tener una medición más exacta.

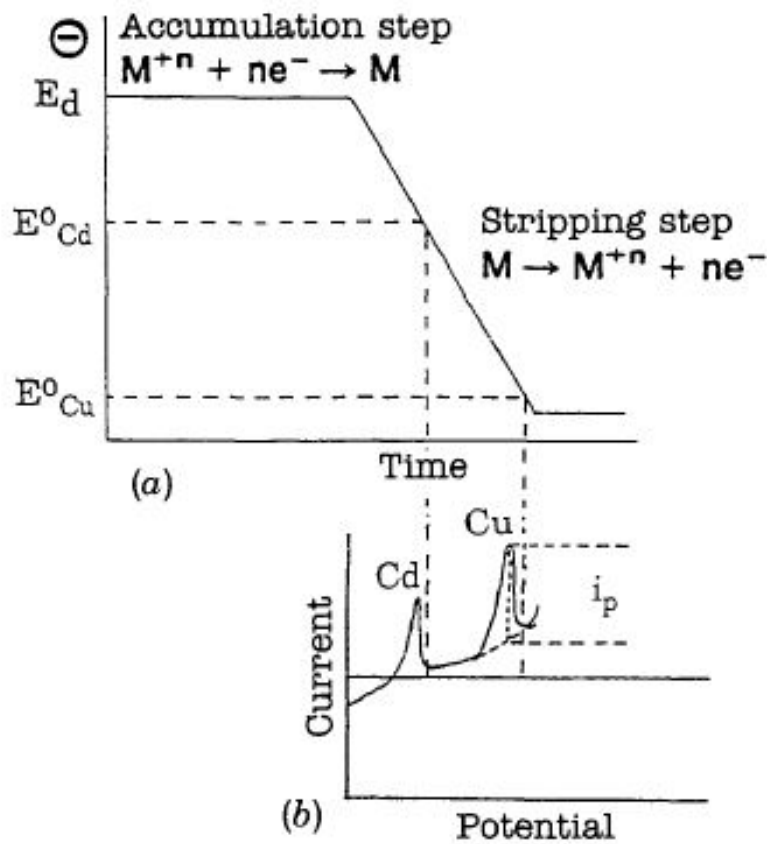


FIGURA 3.6: Voltametría de redisolución anódica. Forma de onda del potencial en el tiempo (a) y Voltagrama de redisolución (b). Referenciado de [24].

### 3.3 POTENCIOSTATO

En la Fig. 3.8 podemos observar el diagrama esquemático de un circuito potencioestado clásico, el cual, en términos sencillos, está diseñado para sensor el diferencial de potencial entre el electrodo de trabajo WE y el electrodo de referencia RE. Este circuito está compuesto por un bloque generador de voltaje, un amplificador de control (A), un electrómetro (B), un inversor I/V (C) y un bloque de adquisición de data.

El bloque generador crea una señal requerida por el usuario, ya sea por ejemplo lineal, rampa, onda sinusoidal, triangular, la cual será enviada al amplificador de control.

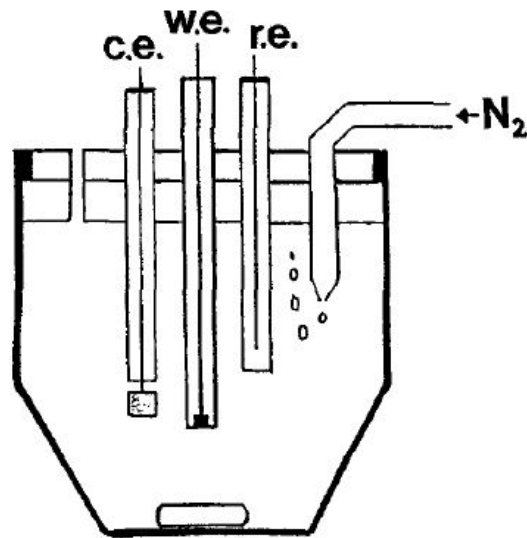


FIGURA 3.7: Diagrama esquemático de una celda voltamétrica. w.e: electrodo de trabajo; r.e: electrodo de referencia; c.e: electrodo auxiliar. Referenciado de [24].

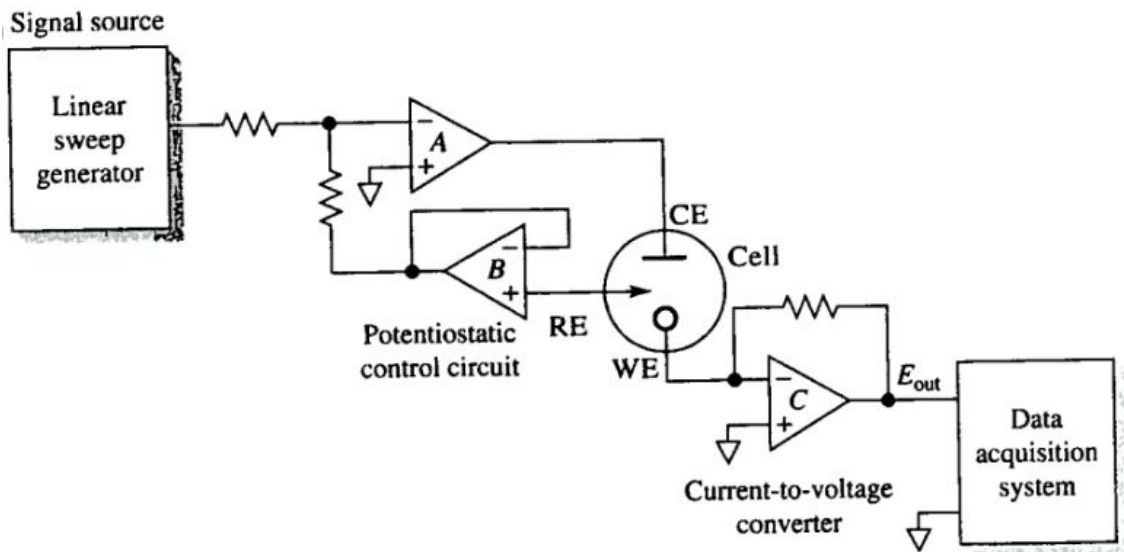


FIGURA 3.8: Diagrama esquemático de un circuito potenciostato. Referenciado de [12].

Este amplificador (A) aplica la señal a la celda voltamperométrica y ajusta su amplitud para que corresponda al valor deseado por el usuario.

La diferencia de potencial entre el electrodo de referencia (RE) y el electrodo de trabajo (WE) es medida por el electrómetro. La señal medida es enviada de vuelta al

amplificador de control donde se compara con el valor del voltaje deseado. Idealmente este amplificador debe tener una corriente de entrada igual a 0 e impedancia infinita, pues la corriente que puede fluir por el electrodo de referencia puede cambiar su potencial, por eso en la práctica los amplificadores utilizados para el electrómetro de un potenciómetro tienen corrientes de entrada cercanos a cero.

El flujo de corriente que pasa por la celda electroquímica se mide en el convertidor I/V (C). Esto se realiza gracias a un amplificador de transimpedancia mediante una resistencia. La señal es enviada a un sistema de adquisición de datos.

El bloque generador y el sistema de adquisición en este caso pueden reemplazarse por convertidores DAC y ADC respectivamente. El funcionamiento difiere dependiendo del tipo de conversión y resolución. La teoría de funcionamiento de los convertidores se encuentra en [27] y las características dependen del fabricante.

### **3.4 MICROCONTROLADOR STM32L151**

La serie de microcontroladores STM32L del fabricante STMicroelectronics incluye procesadores ARM Cortex-M3 que brinda alta flexibilidad para realizar todo tipo de aplicaciones embebidas. El microcontrolador STM32L4X2 se caracteriza por su bajo consumo energético, pues puede ser alimentado con voltajes entre 1.65 V y 3.6 V. La corriente en modo Low Power llega a 9  $\mu$ A. Por otro lado, el microcontrolador cuenta con 6 Timers y tiene interfaces de comunicación SPI, I2C y UART. Contiene, también, convertidores ADC y DAC de 12 bits de resolución y una frecuencia de trabajo máximo de 32 MHz [28].



FIGURA 3.9: Kit de desarrollo STM32L151. Referenciado de [28].

## 3.5 PERIFÉRICOS

### 3.5.1 Sistema de Posicionamiento Global

El sistema de posicionamiento global (GPS) es un sistema de localización que a través de ordenadores y una constelación de 30 satélites determina, por diferentes técnicas, la latitud, longitud y altitud de un dispositivo o equipo en la tierra.

#### 3.5.1.1. Geolocalización

La geolocalización es la identificación de un punto geográfico en el mundo a través de coordenadas geográficas como latitud, longitud, altitud. Para ubicar un punto en la tierra a través de un módulo GPS se necesitan como mínimo tres satélites (ver Fig. 3.9), los cuales transmiten información sobre su posición y hora. El receptor mide el tiempo en que tarde en llegar una señal de radio desde un satélite ya identificado y calcula cuan lejos está de cada satélite. Al saber la distancia y ubicación de los tres satélites se puede determinar la ubicación del receptor mediante una triangulación

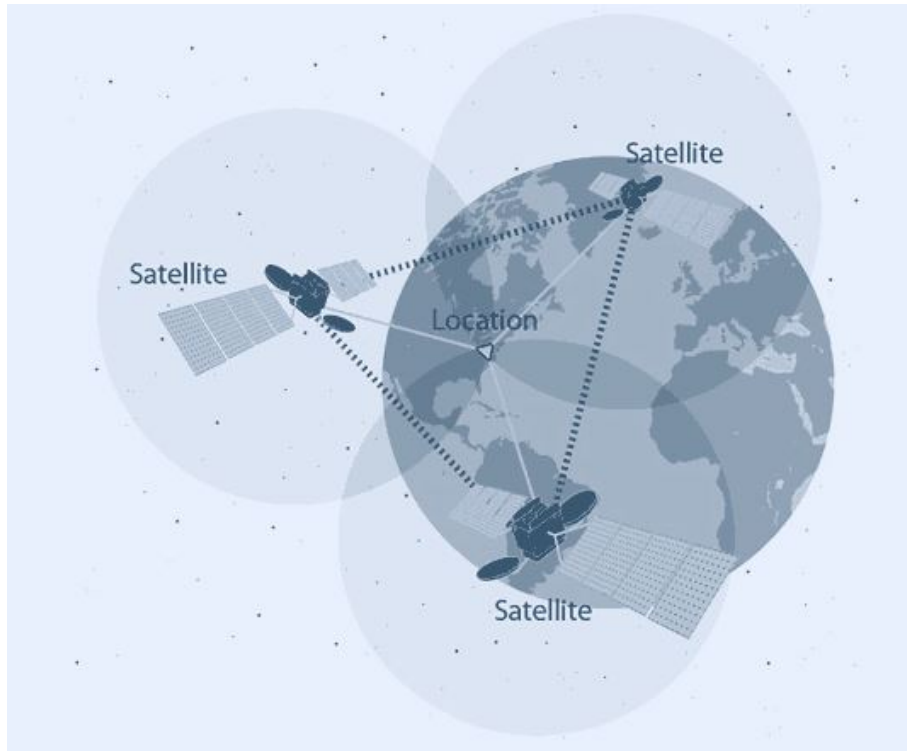


FIGURA 3.10: Ubicación de un punto terrestre a partir de GPS. Referenciado de [29].

Existen diferentes módulos GPS programables en el mercado. Uno de los fabricantes más conocidos es Ublox, quien ofrece módulos GPS de diferente calidad y precio. Uno de los módulos más conocidos es el módulo NEO-6 (ver Fig. 10), que es usado para fines educativos y de investigación. Sus características se presentan en [30].



FIGURA 3.11: NEO-6 GPS. Referenciado de [29].

La Asociación Nacional de Electrónica Marina (NMEA por sus siglas en inglés) [31] es una organización comercial estadounidense que establece algunos estándares de comunicación referidos a aplicaciones marinas, de aviación y GPS. Los módulos GPS programables presentan la data en formato NMEA 0183, la cual se presenta en la Fig. 3.11.

Table 1-11 contains the values for the following example:

\$GPRMC, 161229.487,A,3723.2475,N,12158.3416,W,0.13,309.62,120598, ,\*10

Table 1-11 RMC Data Format

Name	Example	Units	Description
Message ID	\$GPRMC		RMC protocol header
UTC Time	161229.487		hhmmss.sss
Status <sup>1</sup>	A		A=data valid or V=data not valid
Latitude	3723.2475		ddmm.mmmm
N/S Indicator	N		N=north or S=south
Longitude	12158.3416		dddmm.mmmm
E/W Indicator	W		E=east or W=west
Speed Over Ground	0.13	knots	
Course Over Ground	309.62	degrees	True
Date	120598		ddmmyy
Magnetic Variation <sup>2</sup>		degrees	E=east or W=west
Mode	A		A=Autonomous, D=DGPS, E=DR
Checksum	*10		
<CR> <LF>			End of message termination

FIGURA 3.12: Data en formato NMEA. Referenciado de [31].

### 3.5.2 Bluetooth

El bluetooth es una tecnología utilizada para redes inalámbricas de área personal (WPAN) que posibilita la transmisión de datos entre diferentes dispositivos mediante radiofrecuencia en la banda libre de 2.4 GHz. Existen diferentes versiones de bluetooth, los cuales pueden ser utilizados dependiendo a la aplicación. La última versión tiene una



velocidad de transmisión de 1.4 Mbps, superando a su antecesor con 800 Kbps. La Fig. 3.12 presenta una comparación de las características que presenta cada versión.

Feature	Bluetooth Classic	Bluetooth 4.x	Bluetooth 5
Radio Frequency (MHz)	2400 to 2483.5	2400 to 2483.5	2400 to 2483.5
Distance/Range (m)	Up to 100	Up to 100	Up to 200
Medium Access Technique	Frequency Hopping	Frequency Hopping	Frequency Hopping
Nominal Data Rate (Mbps)	1-3	1	2
Latency (ms)	<100	<6	<3
Network Topology	Piconet, Scatternet	Star-bus	Star-bus, Mesh before the end of the 2017
Multi-hop Solution	Scatternet	Not currently supported	Not currently supported
Profile Concept	Yes	Yes	Yes
Nodes/Active Slaves	7	Unlimited	Unlimited
Message Size (bytes)	Up to 358	31	255
Government Regulation	Worldwide	Worldwide	Worldwide
Certification Body	Bluetooth SIG	Bluetooth SIG	Bluetooth SIG

FIGURA 3.13: Comparación entre versiones de módulos Bluetooth. Referenciado de [32].

Existen diversos fabricantes orientados a la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE). Uno de los más destacados es el RN4020 de la empresa Microchip. Sus características más resaltantes pueden ser leídas en [33].



FIGURA 3.14: Módulo bluetooth low energy (BLE). Referenciado de [33].

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Umar, S. N. H., Bakar, E. A., Kamaruddin, N. M., and Uchiyama, N., “A low cost potentiostat device for monitoring aqueous solution,” *MATEC Web Conf.*, vol. 217, p. 04001, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821704001>
- [2] P. B. Tchounwou, C. G. Yedjou, A. K. Patlolla, and D. J. Sutton, “Heavy metal toxicity and the environment.” *Experientia supplementum*, vol. 101, pp. 133–64, 2012.
- [3] Organización Mundial de la Salud. (2016) Intoxicación por plomo y salud. Nota descriptiva. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- [4] Ministerio de Salud del Perú. (2017) Manual de atención de personas expuestas a plomo RM 400-2017. [Online]. Available: <http://bvs.minsa.gob.pe/local/dgsp/264.DGSP238.pdf>
- [5] Organización Mundial de la Salud, “Boletín volumen 90,” pp. 869–944, 2012.
- [6] Ministerio de Salud del Perú. (2017) Estándares Nacionales de Calidad Ambiental de Agua DS N°004-2017-MINAM. [Online]. Available: [http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/ds\\_002\\_2008\\_eca\\_agua.pdf](http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/ds_002_2008_eca_agua.pdf)
- [7] G. Zhao and G. Liu, “A portable electrochemical system for the on-site detection of heavy metals in farmland soil based on electrochemical sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 14, pp. 5645–5655, July 2018.

- [8] T. Arévalo-Ramírez, C. C. Torres, A. C. Rosero, and P. Espinoza-Montero, “Low cost potentiostat: Criteria and considerations for its design and construction,” in *2016 IEEE ANDESCON*, Oct 2016, pp. 1–4.
- [9] Autoridad Nacional del Agua - MINAM, “Protocolo de monitoreo de calidad de los recursos hídricos. autoridad nacional del agua - dgcrh,” 2017.
- [10] A. Misra and S. Verghese, “Techniques and technologies available for quantification of heavy metals found in water and sediment,” vol. 3, pp. 45–59, 01 2016.
- [11] B. Bansod, T. Kumar, R. Thakur, S. Rana, and I. Singh, “A review on various electrochemical techniques for heavy metal ions detection with different sensing platforms,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 94, 03 2017.
- [12] D. Skoog, F. James, and S. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*. CENGAGE Learning, 2007.
- [13] A. Rowe, A. Bonham, R. White, M. Zimmer, R. Yadgar, T. Hobza, J. Honea, I. Ben-Yaacov, and K. Plaxco, “Cheapstat: An open-source, “do-it-yourself” potentiostat for analytical and educational applications,” *PloS one*, vol. 6, p. e23783, 09 2011.
- [14] C. Huang, H. Huang, and R. Yuan, “Design of a portable mini potentiostat for electrochemical biosensors,” in *2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 2017, pp. 200–203.
- [15] S. Chhorn and A. Teeramongkonrasmee, “A portable usb-controlled potentiostat for paper-based electrochemical applications,” *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pp. 321–324, 2018.
- [16] S. Zou, P. Xu, W. Xu, and Y. Fan, “An environmental automatic monitoring system for heavy metals,” in *2007 IEEE International Conference on Control and Automation*, May 2007, pp. 798–801.

- [17] PalmSens. (2016) Emstat potentiostat. [Online]. Available: <https://www.palmsens.com/shared/content/uploads/2016/11/EmStat-series-description.pdf>
- [18] ZiveLAB. (2011) Zive PP1e Portable Electrochemical Workstation. [Online]. Available: <http://www.zivelab.com/info.php?id=prodportpp1>
- [19] Gamry Instrument. (2019) Interface 1010E. [Online]. Available: <https://www.gamry.com/potentiostats/interface-1010e-potentiostat/>
- [20] Amelchem. (2019) 2553 Potentiostat-Galvanostat High Voltage. [Online]. Available: <https://www.amelchem.com/2553-potentiostat-galvanostat-high-voltage/>
- [21] F. Lama and J. Tarrillo, "Remote acquisition of lead in water using anodic stripping voltammetry method," in *2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Aug 2018, pp. 1–4.
- [22] A. Ainla, M. Mousavi, M.-N. Tsaloglou, J. Redston, J. Bell, M. Fernández-Abedul, and G. Whitesides, "Open-source potentiostat for wireless electrochemical detection with smartphones," *Analytical Chemistry*, vol. 90, 04 2018.
- [23] G. Bontempelli and R. Toniolo, "Electrochemical: Linear sweep and cyclic voltammetry," pp. 1–12, 2009.
- [24] J. Wang, *Analytical Electrochemistry*. Wiley-Vch, 2000.
- [25] A. Bard and L. Faulkner, *Electrochemical Methods - Fundamentals and Applications*. Wiley, 2001.
- [26] D. Harris, *Quantitative Chemical Analysis*. W. H. Freeman, 2010.
- [27] Analog Devices. (2017) Analog Devices Book - Chapter 6: Converters. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Basic-Linear-Design/Chapter6.pdf>

- [28] STMicroelectronics. (2016) STM32L151 Ultra-low-power 32-bit MCU ARM - based Cortex -M3. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l151vb.pdf>
- [29] Ublox. (2017) GPS, Essentials of Satellite Navigation - Compendium. [Online]. Available: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium\\_Book\\_%28GPS-X-02007%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium_Book_%28GPS-X-02007%29.pdf)
- [30] Ublox. (2017) NEO-6, GPS Modules Datasheet. [Online]. Available: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6\\_DataSheet\\_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf)
- [31] National Marine Electronics Associations. (2017) NMEA Reference Manual. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual1.pdf>
- [32] G. Pau, M. Collotta, and V. Maniscalco, "Bluetooth 5 energy management through a fuzzy-pso solution for mobile devices of internet of things," July 2017, pp. 1–22.
- [33] Microchips, "RN4020, Bluetooth Low Energy Module. Datasheet," 2015.