



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
TRABAJO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE:

“INGENIERO EN ELECTRÓNICA DIGITAL Y TELECOMUNICACIONES”

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN POTENCIOSTATO AUTOMÁTICO
PARA EL LABORATORIO ICM.**

AUTOR/ A: Diego Ramiro Iza Toapanta

TUTOR/ A: Ing David Cando, Mg

AÑO: 2016

| | |
|--|---|
| Carrera: | ELECTRÓNICA DIGITAL Y TELECOMUNICACIONES |
| Autor/a del TT: | DIEGO RAMIRO IZA TOAPANTA |
| Tema del TT: | DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN POTENCIOSTATO AUTOMÁTICO PARA EL LABORATORIO ICM. |
| Articulación con la Línea de Investigación Institucional: | DESARROLLO Y AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIONES |
| Sublínea de Investigación Institucional: | DESARROLLO DE SISTEMAS Y DISPOSITIVOS PARA LA MEJORA EN PROCESOS INDUSTRIALES |
| Fecha de presentación del plan: | |

RESUMEN

Mediante el presente trabajo se muestra el diseño, construcción y pruebas de funcionamiento de un equipo de laboratorio electroquímico llamado potencióstato de tres electrodos, el cual permite aplicar diferentes voltajes y medir las corrientes generadas por el material bajo estudio. Para cumplir con los objetivos se inició con la investigación sobre la teoría de corrosión, técnicas de electroquímica y funcionamiento del potencióstato.

A continuación, se utilizó los diferentes métodos de investigación de acuerdo a las etapas que se presentaron, como es el diseño, que cumple con especificaciones técnicas de la norma ASTM, dicha norma establece puntos y procedimientos que se cumplieron; por último, se estructuró el diseño del potencióstato y su construcción con elementos electrónicos de alta precisión. Como resultados se mostrarán las pruebas de las variables eléctricas con el método de comparación directa para certificar el desempeño del equipo desarrollado.

Como conclusión se elabora un equipo con resolución de 16 bits efectivos, este cuenta con un programa de fácil uso y amigable al usuario por medio del cual se iniciará la prueba electroquímica y una vez terminada la prueba los resultados se mostrarán en un archivo almacenado en el directorio del computador para su estudio posterior.

DESCRIPTORES:

Potencióstato

Diseño

Control

Programación

ABSTRAC

The present work shows the design, construction and functional testing of an electrochemical laboratory equipment called potentiostat of three electrode, which allows applying voltages and currents applied to measure a material under study. To meet the goals began with research on the theory of corrosion electrochemistry techniques and operation of a potentiostat.

Then different research methods were used according to the steps presented, as is the design, which meets Technical specifications of ASTM, this standard establishes points and procedures were fulfilled; finally, the design and construction potentiostat with high precision elements should be structured. Results are displayed as tests of electrical variables with the direct comparison method to certify the performance of the equipment developed.

As a conclusion a team with effective resolution 16-bits is made, this has a program easy to use, user friendly, through which the electrochemical test will be started and once the test is finished the results will be displayed in a file stored in the Computer directory for further study.

DESCRIPTORS:

Potentiostat

Design

Control

Programming

| | |
|--|-------------|
| RESUMEN..... | II |
| ABSTRAC | IV |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | X |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Problema | 1 |
| 1.3. Objetivo general | 1 |
| 1.4. Objetivos específicos | 1 |
| 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y METODOLÓGICA..... | 3 |
| 2.1. Corrosión..... | 3 |
| 2.2. Corrosión Electroquímica | 4 |
| 2.3. El potencióstato | 5 |
| 2.3.1. Celda Electroquímica | 6 |
| 2.3.2. Funcionamiento básico del potencióstato. | 7 |
| 2.4. Técnica electroquímica | 8 |
| 2.5. Voltametría | 9 |
| 2.6. Características técnicas de un potencióstato..... | 10 |
| 2.7. Tarjeta Arduino | 11 |
| 2.7.1. Hardware | 11 |
| 2.7.2. Software. | 12 |

| | |
|--|-----------|
| 2.8. Bus I2C | 13 |
| 2.9. Labview | 14 |
| 2.10. Amplificador Operacional..... | 15 |
| 2.11. Sistemas de control | 17 |
| 2.11.1. Sistema de control de lazo cerrado | 18 |
| 2.12. Metodología de Investigación..... | 18 |
| 2.12.1. Fase de Investigación | 18 |
| 2.12.2. Fase de presentación de resultados..... | 19 |
| 3. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS | 20 |
| 3.1. Desarrollo del hardware..... | 20 |
| 3.1.1. Etapas del potenciómetro..... | 20 |
| 3.1.2. Procesador (Arduino Uno) | 21 |
| 3.1.3. Conversión Analógico Digital / Digital Analógico..... | 21 |
| 3.1.4. Circuito Potenciostático..... | 22 |
| 3.1.4.1. Controlador de voltaje | 22 |
| 3.1.4.2. Medición de corriente..... | 26 |
| 3.2. Diseño Electrónico | 27 |
| 3.2.1. Fabricación de las placas..... | 30 |
| 3.3. Desarrollo del software | 32 |
| 3.3.1. Sistema de control..... | 32 |
| 3.3.2. Ventajas..... | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4. Pruebas | 35 |
| 3.4.1. Procedimeinto de calibracion de las entradas analogas | 35 |
| 3.4.2. Dummy cell | 38 |
| 3.5. Presupuesto | 40 |
| 3.5.1. Resumen de Costos | 42 |
| CONCLUSIONES..... | 45 |
| RECOMENDACIONES | 46 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 47 |
| ANEXOS..... | 49 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura: 1 a) Proceso de Absorción b) Desorción Iónica. | 4 |
| Figura: 2 Esquemático Básico potenciostato de tres electrodos. | 6 |
| Figura: 3 Electrodo usado en la celda. | 7 |
| Figura: 4 Etapas de funcionamiento del potenciostato | 8 |
| Figura: 5 Curvas típicas de la Voltametría. | 9 |
| Figura: 6 Diagrama conexión I2C Arduino – Esclavo genérico. | 13 |
| Figura: 7 Logo Labview..... | 14 |
| Figura: 8 Símbolo amplificador operacional. | 15 |
| Figura: 9 Configuración seguidor de tensión..... | 16 |
| Figura: 10 Amplificador inversor. | 17 |
| Figura: 11 Estructura de Sistema de control Automático..... | 17 |
| Figura: 12 Sistema de lazo Cerrado..... | 18 |
| Figura: 13 Diagrama de módulos seleccionados. | 20 |
| Figura: 14 Arduino Uno..... | 21 |
| Figura: 15 Analog Shield. | 22 |
| Figura: 16 Circuito controlador de potencial AE-RE. | 23 |
| Figura: 17 Circuito controlador de potencial AE-RE. | 25 |
| Figura: 18 Circuito de transimpedancia básico. | 26 |
| Figura: 19 Circuito de conversión V-I. | 27 |
| Figura: 20 Esquemático de tarjeta de acoplamiento..... | 29 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura: 21 | Perforación en la placa..... | 30 |
| Figura: 22 | Ubicación de elementos de superficie en la placa. | 31 |
| Figura: 23 | Ubicación de las placas del potencióstato..... | 31 |
| Figura: 24 | Diagrama de bloque lazo cerrado..... | 32 |
| Figura: 25 | Visualización de entradas analógicas con el equipo patrón..... | 33 |
| Figura: 26 | Pantalla de desarrollo de las pruebas para electroquímicas..... | 34 |
| Figura: 27 | Integración de señales desde el potencióstato y la computadora. | 35 |
| Figura: 28 | Curva de calibración del canal 0 entrada y salida voltaje. | 38 |
| Figura: 29 | Recta de salida dummy cell. | 39 |
| Figura: 30 | Curvas de recuperación de capital por cada propuesta..... | 44 |
| Figura: 31 | Placa en dos dimensiones. | 49 |
| Figura: 32 | PCB derecho para impresión en espejo. | 50 |
| Figura: 33 | PCB cara posterior en impresión directa. | 51 |
| Figura: 34 | Manejo de lectura de datos en labview..... | 51 |
| Figura: 35 | Manejo de lectura de datos de salida de lectura en labview..... | 52 |
| Figura: 36 | Data sheet LMP7721..... | 55 |

DICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Características mínimas del potenciómetro..... | 11 |
| Tabla 2 Características I2C..... | 13 |
| Tabla 3: Verificación de entrada analógica (error). | 36 |
| Tabla 4: Resultado de calibración del canal 0 (V)..... | 37 |
| Tabla 5: Lecturas de salida con dummy cell..... | 39 |
| Tabla 6: Listado de elementos utilizados-importados. | 40 |
| Tabla 7: Listado de elementos utilizados comprados Localmente..... | 41 |
| Tabla 8: Horas hombre utilizadas. | 41 |
| Tabla 9: Resumen total de gastos del proyecto. | 42 |
| Tabla 10: Análisis económico..... | 43 |
| Tabla 11 Características Arduino | 49 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La compañía ICM-Laboratory S.A. ubicada en la ciudad de Quito Ecuador, realiza procedimientos de calibración y ensayos con instrumentos de alta precisión y resolución, con capacidad metrológica en múltiples áreas de la industria. Una de estas áreas es el desarrollo de pruebas electroquímicas. Para esto se requiere de un instrumento conocido como potencióstato.

Las especificaciones técnicas requeridas del equipo y la norma aplicada en el laboratorio como es la NTE ISO/IEC 17025, conllevan a la adquisición del mismo.

Dentro del mercado nacional, el potencióstato no está disponible para realizar una compra local, por lo que es necesario importarlo. Al precio se deben sumar gastos de importación, aduanas, salvaguardas, entre otros; lo que produce un incremento importante en el costo final del equipo.

1.2. Problema

Con el avance tecnológico en la química es necesario obtener resultados de alta confiabilidad en los diferentes análisis electroquímicos. El potencióstato deberá tener un proceso automático durante la ejecución de las pruebas y el almacenamiento de los diferentes resultados, con una precisión y resolución razonable de los mismos. Estas características demandan un alto costo, por esta razón este equipo no está al alcance del Laboratorio ICM.

Para solucionar el problema se plantearon los siguientes objetivos.

1.3. Objetivo general

Elaborar un potencióstato con características digitales y de razonable precisión que entregue sus resultados directamente a un computador, esto producirá una mayor eficiencia y respaldo en el laboratorio ICM.

1.4. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema electrónico analógico digital para obtener datos Electro químicos y procesarlos.

- Construir el sistema electrónico del Potenciostato.
- Implementar un software para el proceso automático del potenciostato.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y METODOLÓGICA

El presente informe está enfocado a la parte electrónica, pero en vista que el equipo tiene un propósito electroquímico, se expondrán conceptos y términos básicos de electroquímica para entender el tema que se desarrolla en este documento. De ésta forma, se ha estructurado los diferentes ítems de acuerdo a un orden que va desde conceptos generales hasta llegar términos específico necesarios para este proyecto.

2.1. Corrosión

El alcance del término “corrosión” tiene por concepto y aplicación muy extensa, este trabajo se enfocará a los problemas de la corrosión metálica, es decir; corrosión electroquímica. Este tipo de corrosión produce los medios electrolíticos en contacto con metales, como son la mayoría de soluciones químicas disueltas en agua.

La corrosión es un fenómeno espontáneo e inevitable, cuya causa fundamental es la disminución de la energía libre del sistema o energía de Gibbs (G). La producción de casi todos los metales, involucra un aporte de energía o calor al sistema, y como resultado, el metal acabado tiene un estado de energía mayor al inicial; por consiguiente, una tendencia a retornar espontáneamente a su estado natural cuando son expuestos al ambiente. Es por esto, que la composición química del producto de corrosión, es a menudo, prácticamente la misma que la del mineral del cual se ha extraído el metal (JAIRO, 2012, pág. 14).

Basado en lo expuesto por Jairo, se puede decir que la corrosión es el desprendimiento o pérdida de material por la reacción química o electroquímica del ambiente al cual tiene contacto directo dicho material. Este proceso corrosivo puede ser lo más evidente o minucioso de acuerdo al tipo de material el cual este constituido, pero está presente en todos los elementos conocidos por el hombre; el más conocido es el que se produce en los metales; este material es el caso más problemático debido a que las estructuras de edificios, equipos y maquinarias son construidos de metal, además existen diferentes áreas de investigación dedicados a minimizar el efecto de la corrosión.

2.2. Corrosión Electroquímica

Existen diferentes métodos para corroer un material, este proceso corrosivo está limitado al ambiente donde se encuentre inmerso, un material expuesto a la intemperie con condiciones moderadas requiere de un tiempo más largo. Se produce una aceleración en la degradación del material si este se encuentra inmerso en un medio acuoso, dicho metal pierde material rápidamente. (Renato Salazar, 2003)

Al sumergir los electrodos de prueba en una solución o medio acuoso, uno de estos se polariza, la parte interna del material es más negativo por los electrones libres y su parte externa positiva por los iones atraídos, pero estas cargas se mantienen balanceadas y no distorsionan la neutralidad eléctrica de los átomos de la superficie en el elemento en contacto con el medio, se ionizan y permanecen en su lugar sin moverse del metal por atracción electrostática (absorción) (Renato Salazar, 2003). Como se indica en la figura 1a. A pesar de esto algunos iones tienden a alejarse de la superficie del metal y fusionarse en la solución formando una nueva solución, esto se denomina desorción; si esto sucede, el metal comienza a perder masa, es decir sufre los efectos de la corrosión, esto generará pequeños huecos en su superficie (figura 1b).

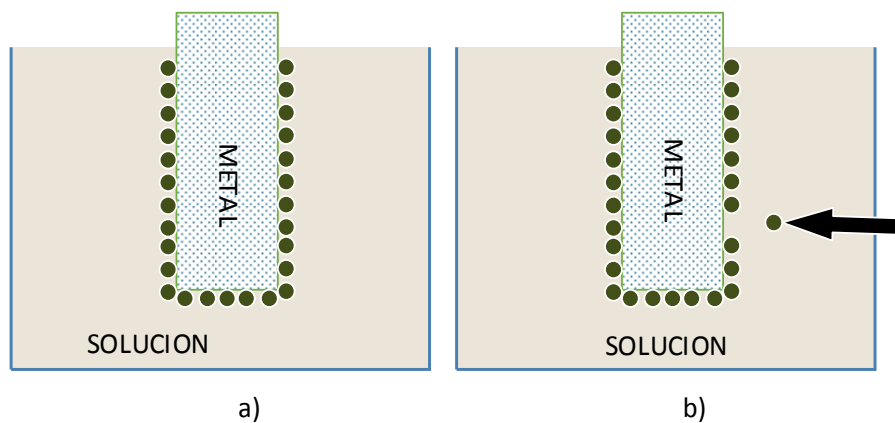


Figura: 1 a) Proceso de Absorción b) Desorción Iónica.

Fuente: (Diego Gomez, 2011)

El elemento que recepta los electrones se le denomina cátodo y el elemento que sede electrones toma el nombre de ánodo. Como breve resumen, la corrosión es un proceso que contiene reacciones electroquímicas de oxidación y reducción, de allí que se utiliza estos fenómenos electroquímicos ya conocidos para analizar la corrosión en diferentes materiales, medios y desarrollar técnicas de estudio en esta área.

2.3. El potencióstato

Un potencióstato es un equipo muy utilizado para diferentes análisis electroquímicos, es un dispositivo conformado por la parte electrónica (potencióstato) y la celda electroquímica formada por electrodos.

Aun cuando los instrumentos para medir voltaje y corriente existen desde hace más de un siglo, no fue sino hasta 1942 que Hickling introdujo el concepto de potencióstato, el cual incluye un sistema electrónico para controlar por medio de bulbos, resistencias y capacitores. (Esteban, Sergio, Armando, & Marcos, 1997, pág. 23)

Lo expresado por Esteban da un inicio a una carrera de mejora continua en el tiempo del potencióstato, en la época actual, con elementos electrónicos de precisión, tamaño reducido, alimentación y consumo de energía muy baja permiten diseñar e implementar equipos portátiles adicional a esto con la comunicación bidireccional a un computador se desarrollan potencióstato automáticos, al unir todo esto facilita las pruebas electroquímicas con rapidez, calidad y confiabilidad.

La parte periférica del potencióstato es la celda electroquímica que cuenta con tres electrodos como son:

- Electrodo de trabajo (WE, siglas en inglés)
- Electrodo de referencia (RE, siglas en inglés).
- Electrodo auxiliar (CE, siglas en ingles).

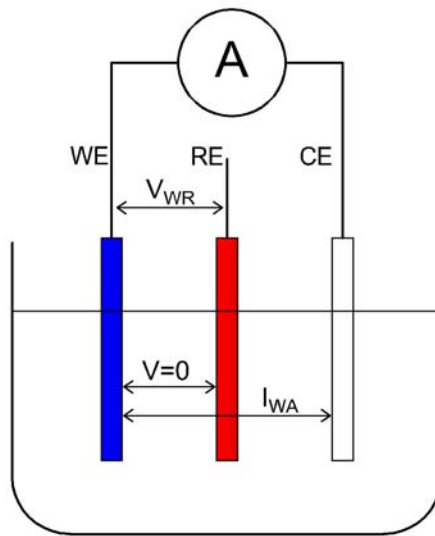


Figura: 2 Esquemático Básico potencióstato de tres electrodos.

Fuente: (Diego Gomez, 2011)

Donde

V_{WR} = voltaje entre el electrodo de trabajo y electrodo de referencia

I_{wa} = corriente entre el electrodo trabajo y el electrodo auxiliar.

2.3.1. Celda Electroquímica

La mejor descripción sobre la celda electroquímica es la Hernandez, que afirma:

“Una celda electroquímica es un sistema que consiste en electrodos introducidos en uno o dos electrolitos, en los que ocurren reacciones químicas de oxidación reducción, capaces de utilizar o generar corriente eléctrica. Las celdas electroquímicas que generan corriente se denominan Galvánicas, mientras que aquellas que necesitan una fuente externa de energía para producir la reacción química, se conocen como Electrolíticas” (Hernandez, 2013, pág. 43).

En la figura 3 se muestran los tres electrodos que componen una celda electroquímica. El líquido en el recipiente es el electrolito o medio acuoso, en un extremo de cada electrodo

existe un terminal donde se sujetará una pinza proveniente del potencióstato esto cerrará el circuito y se medirá o generará el diferencial de potencial entre ellos.

Para las pruebas electroquímicas se utilizará una celda con tres electrodos, los cuales se describe a continuación, el electrodo de trabajo (WE) constituido de grafito, un electrodo de referencia (RE) de Ag/AgCl y por un tercero que cierra el circuito eléctrico, denominado contra-electrodo (CE) su material conductor es de oro.



Figura: 3 Electrodos usados en la celda.

Fuente: Autor

2.3.2. Funcionamiento básico del potencióstato.

El potencióstato está formado por dos etapas primordiales, la primera controlará el diferencial de potencial generado a través del electrodo de referencia y de trabajo, sin polarizar el electrodo de referencia, la segunda etapa medirá la corriente que circula por el electrodo de trabajo (Sanchez, 2004, pág. 12).

Los primeros potencióstatos funcionaban de forma manual y por medio de un potenciómetro se cambia los valores de voltaje de entrada al potencióstato y un acople de

circuitos amplificadores se controlaban las etapas anteriormente mencionadas. Su principio de funcionamiento es la ley de Ohm.

En la actualidad se obtiene resultados directos de las diferentes técnicas electroquímicas hacia una computadora, este proceso tiene una serie de etapas, que se muestran en la figura 4. La técnica más común es la Voltametría y la que se desarrollará en este trabajo.

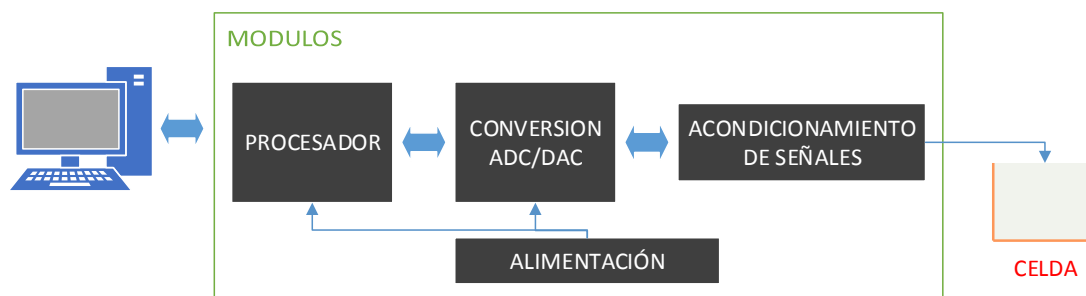


Figura: 4 Etapas de funcionamiento del potenciostato

Fuente: Autor

2.4. Técnica electroquímica

En la mayoría de los laboratorios químicos hacen uso del procedimiento electroquímico, por su bajo costo, facilidad de uso y simplicidad. Hay diferentes técnicas en función de la magnitud que se vaya a elegir. Álvarez Indica que cuando se realiza la medición de corriente, se llama amperometría; si se utiliza la variable de potencial, se conoce como potenciometría, y si se analiza cómo varían las propiedades conductivas del medio, se denomina conductometría. (Álvarez, 2014)

En este proyecto se utilizará el procedimiento volta - amperométrico, la magnitud a medir es la corriente generada en la celda y controlar el voltaje suministrado por el potenciostato. Los múltiplos o submúltiplos de cada variable tienen una importancia en el diseño del circuito, la resolución que se manejará son los microamperios, este parámetro es determinante a la hora de diseñar el sistema electrónico.

2.5. Voltametría

La Voltametría realiza un barrido de potencial (potencial de escaneo), de acuerdo a los diferentes patrones seleccionados previo a la prueba, para el presente trabajo se utilizará la Voltametría cíclica que es uno del más utilizado en el campo de la electroquímica. (Elena, 1995) Afirma “Este método también se lo conoce como "espectroscopía electroquímica" debido a que los voltamogramas que se obtienen son característicos y dan información inequívoca de las propiedades electroquímicas individuales de los sistemas redox.”.

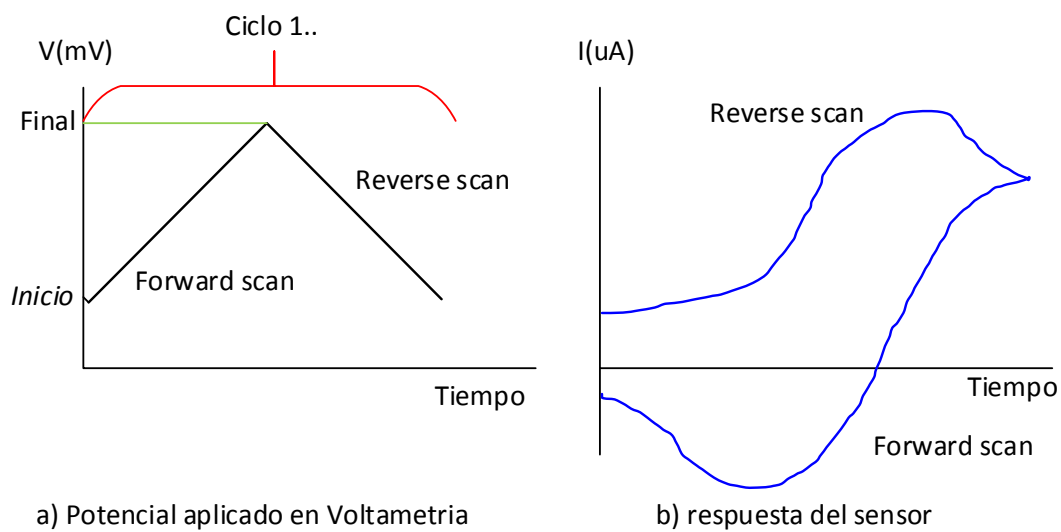


Figura: 5 Curvas típicas de la Voltametría.

Fuente: (Elena, 1995)

En la figura 5 se indica el voltaje de ingreso controlado del potenciostato y la respuesta en corriente del mismo, para una mejor explicación se toma un ciclo como se muestra en la figura 5a y su respuesta en la figura 5b. La forma de voltaje (onda diente de sierra) consta de dos etapas, la rampa de subida (Forward Scan) y la rampa de bajada (Reverse scan) completan un ciclo y se repetirá el número de veces que se desee, este ciclo puede tener diferentes puntos a fijar como son frecuencia (tiempo en realizar un ciclo), puntos de inicio y final (voltaje de fijo tanto de inicio y fin).

La respuesta a este potencial aplicado se muestra en la figura 5b, es el resultado combinado de Forward y Reverse scan.

2.6. Características técnicas de un potencioestado

Para la implementación del potencioestado se trabajó diferentes etapas, con la finalidad de obtener un equipo de precisión, una de estas es la definición de los requerimientos técnicos mínimos y para esto se tomó como referencia la norma ASTM G5-94 Estándar Reference Test Method for Making Potentiostatic Anodic Polarization Measurements.

Este Método consta de una serie de parámetros básicos, pero el más crítico es el “barrido de potencial (sweep rate 5.11.3), cuyo valor mínimo es de 0,6V/h ($\pm 5\%$), es te valor al convertir a segundos, da como resultado aproximadamente 166,66 $\mu\text{V/s}$ ” (ASTM, 2002, pág. 84). Tambien llamado como valor máximo del incremento de tensión (VLSB). Como se indica en la siguiente expresión.

$$V_{LSB} = \frac{V_{Full Escala}}{2^n} = \frac{(5 - (-5))}{2^{16}} = 0,00015258 V \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

V_{LSB} = valor mínimo de incremento de tensión.

$V_{Full Escala}$ = Escala máxima (valor máximo – valor mínimo).

2^n = n valor de resolución en bits para la conversión (DAC/ADC).

El desarrollo de esta ecuación arroja un resultado de 152,58 μV que al compararlo con la recomendación está dentro de los parámetros aceptables.

Para cumplir estos requerimientos se presenta las siguientes características técnicas de un potencioestado

Tabla 1: Características mínimas del potencióstato.

| ESPECIFICACIONES FÍSICAS | |
|------------------------------|--------------------|
| Potencial | ± 5 V |
| Corriente | ± 250 mA |
| Configuración electrodos | 3 |
| Impedancia | 10^{12} Ω |
| Voltaje mínimo de incremento | 100 μ V |
| Corriente Input Bias | ≤ 50 pA |

Fuente: (ASTM, 2002)

2.7. Tarjeta Arduino

“Arduino es de hardware y software libre, compuesto por un microcontrolador y elementos electrónicos que combinados facilitan los proyectos multidisciplinarios” (Carletti, 2016).

2.7.1. Hardware.

Posee un microcontrolador primario Atmel de 8 bits y que forma parte de la mayoría de tarjetas Arduino desarrolladas al momento, su función principal es realizar los procesos lógicos y matemáticos, además se encarga de interactuar con elementos finales como actuadores, sensores y tarjetas con funciones específicas llamadas Shield.

Para comunicarse con los diferentes elementos externos la tarjeta Arduino tiene entradas y salidas analógicas, digitales, sin la necesidad de alterar su diseño original, el rango de funcionamiento de estos canales es de 0-5 V. Para mantener un mejor desempeño se apoya en procesadores de menor jerarquía, pero de igual importancia y prioridad, como el Atmega168, Atmega328, Atmega1280 y el Atmega8, ya que estos son lo más utilizados por sus bajos costos y gran flexibilidad para implementar una diversidad de diseños. (Diego Gomez, 2011)

Arduino cuenta con un puerto USB, lo que permite una comunicación bidireccional con la computadora. En el computador es donde se desarrollará la programación con los

“comandos” de Arduino, el resultado es la integración entre las placas propias de Arduino o de otras marcas y también con elementos externos, e incluso, puede operar como un dispositivo más dentro de una red de comunicación (esclavo). Además, Arduino requiere de una fuente de alimentación externa, por lo que también se ha incorporado un conector DC Jack hembra para el ingreso de alimentación desde una fuente externa, el voltaje recomendado es de 7 a 12 Vdc.

2.7.2. Software.

Arduino software (IDE) se puede ejecutar en diferentes plataformas operativas como Windows, Macintosh, y Linux. Wiring es el lenguaje de programación de Arduino, fundamentado en la plataforma de desarrollo llamada Processing y principalmente en la programación C/C++. (Hock-Chuan, 2015)

La estructura de programación de Arduino está diseñada para ser amigable con el usuario, ya sea principiante o experto. Se compone básicamente de dos funciones principales. Estas son primordiales para que se compile el programa desarrollado y son las siguientes.

```
void setup() { estamentos; }
```

```
void loop() { estamentos; }
```

La función setup() se compilara una sola vez cuando el procesador se inicializa. Su trabajo es fijar los modos de funcionamiento de los pines de entrada y salida, o el puerto serie. La función setup no debe ser excluida en el programa aunque no haya declaración que ejecutar. (Hock-Chuan, 2015)

La función loop() como su nombre lo indica realiza un barrido cíclico sin fin, lo que permite al programa responder en tiempo real a todos los cambios internos o externos de la tarjeta. (Hock-Chuan, 2015)

La interacción con sensores, tarjetas externas en su mayoría son compatibles con Arduino y su software es de uso libre, los elementos periféricos tienen un código ya desarrollado por una comunidad de programadores y se los encuentra como librerías adicionales que serán instaladas en el programa para ser utilizada.

2.8. Bus I2C.

Una breve explicación de I2C es la de (Carletti, 2016) el cual afirma que “es una comunicación estándar que facilita la comunicación entre microcontroladores, memorias y otros dispositivos con cierto nivel de inteligencia, sólo requiere de dos líneas de señal y un común o más”.

Para establecer el control del potenciómetro digital y la placa Arduino es necesaria una comunicación de dos vías que es una de las cualidades de la interfaz I2C.

Tabla 2 Características I2C

| CARACTERÍSTICAS I2C | |
|-----------------------|-----------|
| Hilos de comunicación | 2 |
| Tipo de reloj | Asíncrono |
| Numero de bits | 7 |
| Administrador de bus | Master |
| Máximo de esclavos | 128 |

Fuente: (Carletti, 2016)

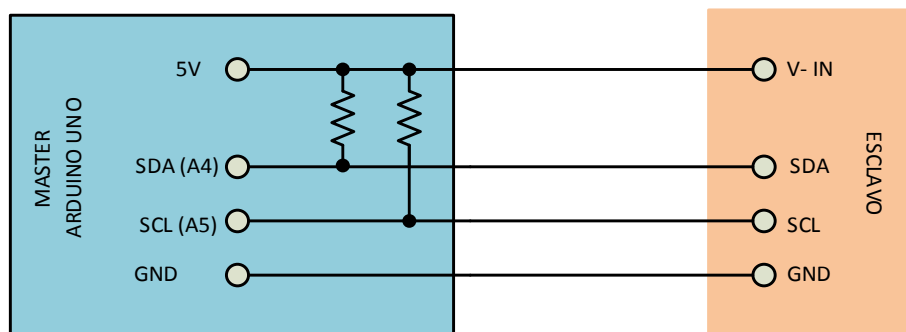


Figura: 6 Diagrama conexión I2C Arduino – Esclavo genérico.

Fuente: (Carletti, 2016)

SCL (System Clock) es la línea de los pulsos de reloj que sincronizan el sistema

SDA (System Data) es la línea por la que se mueven los datos entre dispositivos.

2.9. Labview

LabVIEW es un entorno de desarrollo integrado y diseñado específicamente para ingenieros y científicos que desarrollan sistemas de medidas y control. Con un lenguaje de programación gráfica nativo, IP integrado para análisis de datos y procesamiento de señales y una arquitectura abierta que permite la integración de cualquier dispositivo de hardware y cualquier enfoque de software (labview, 2016).

El software que se utilizará para la interfaz del potenciómetro es el programa llamado Labview, a continuación se mencionara algunas características básicas de este.

El software más utilizado se basa en la plataforma java este tiene una estructura en código, líneas de texto, comandos lo cual representa un problema a la hora de programar. Labview posee un entorno de programación gráfica o lenguaje G, permite crear programas basados en diagramas de bloques, Su entorno es amigable y una ventaja de este programa es ver el flujo de los datos tanto a la salida como entrada de cada bloque en tiempo real.

Sus herramientas de programación facilitan la comunicación bidireccional por el puerto serial, gracias a esto posee un amplio campo de trabajo con diferentes elementos electrónicos.

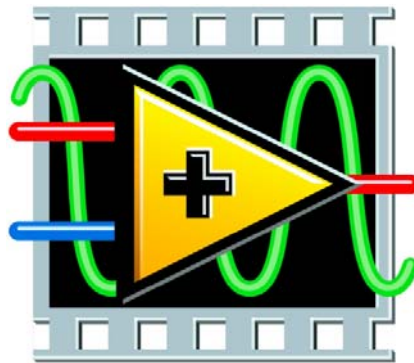


Figura: 7 Logo Labview.

Fuente: (labview, 2016)

2.10. Amplificador Operacional

Un amplificador operacional, o amp-op, es un amplificador diferencial de muy alta ganancia con alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida. Los usos típicos del amplificador operacional son proporcionar cambios en la amplitud del voltaje (amplitud y polaridad) (Boylestad, 2009, pág. 594).

Para el desarrollo de circuitos en la electrónica del potenciómetro se efectúa a través de amplificadores operacionales. Se estudiará brevemente este tema para entender su funcionamiento y circuitos utilizados.

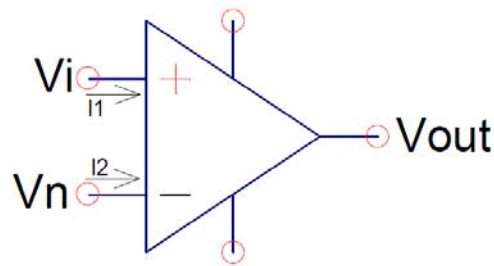


Figura: 8 Símbolo amplificador operacional.

Fuente: (Boylestad, 2009).

Las características básicas de un amplificador operacional son las siguientes:

- Corriente de entrada tanto en la entrada No inversora (I_1) y la inversora (I_2) es cero, esto debido a la gran impedancia entre ambas entradas del amplificador.

$$I_1 = I_2 = 0 \quad \text{Ec. 2.1}$$

- En consecuencia el diferencia de potencial entre ambas entradas No inversora (V_n) y la inversora (V_i) es cero.

$$V_1 - V_2 = I \times Z_i \quad \text{Ec. 2.2.}$$

- Como concepto de amplificador operacional la impedancia de entrada es extremadamente alta (Z_i) y la corriente es cero su resultado es el siguiente.

$$V_1 - V_2 = 0 \quad \text{Ec. 2.3.}$$

$$V_1 = V_2 \quad \text{Ec. 2.4.}$$

Las configuraciones de circuitos utilizados más comunes son: el seguidor de tensión, inversor y conversor de intensidad a voltaje

El seguidor de tensión o separador está conformado por un inversor con una resistencia $R_1 = \infty$ y una $R_2 = 0$, como lo muestra en la figura 9.

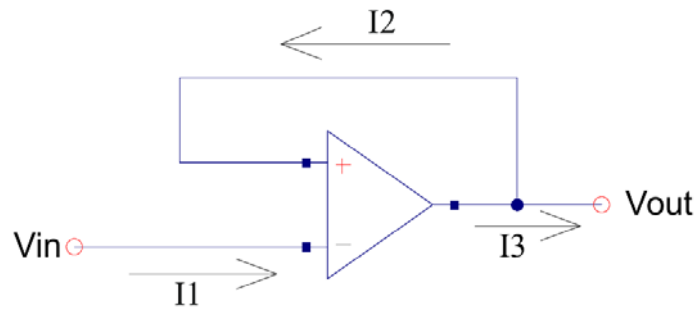


Figura: 9 Configuración seguidor de tensión.

Fuente: (Boylestad, 2009)

Desarrollado el circuito se obtiene la siguiente expresión:

$$V_{in} = V_{out} \quad \text{Ec. 2.5.}$$

La siguiente es la configuración Amplificador Inversor como se indica en la figura 10.

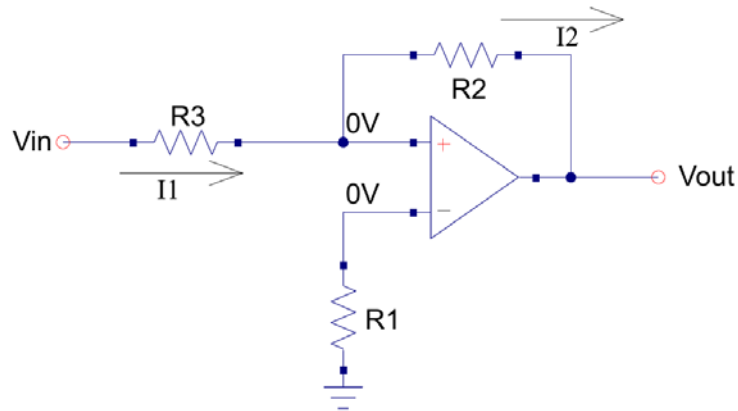


Figura: 10 Amplificador inversor.

Fuente: (Boylestad, 2009)

Al encontrar V_{out} del circuito de la figura 10 se establece la siguiente ecuación.

$$V_{out} = -V_{in} \times \frac{R_2}{R_3} \quad \text{Ec. 2.6}$$

2.11. Sistemas de control

La estructura de sistema de control cuenta con entradas, procesos, salidas como se indica en la figura 11.

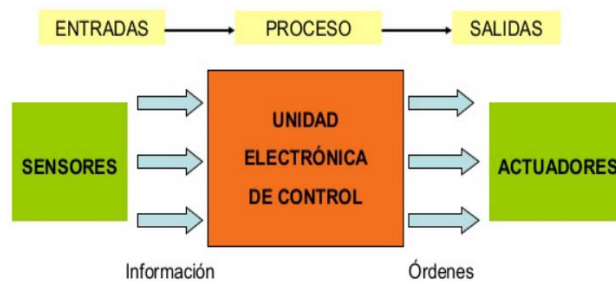


Figura: 11 Estructura de Sistema de control Automático.

Fuente: (García, sf)

Las arquitecturas de control son algunas, para este trabajo se menciona solo el de control de lazo cerrado.

2.11.1. Sistema de control de lazo cerrado

Produce una realimentación al sistema como se muestra en la figura 4, la salida vuelve al principio para que analice una posible diferencia y en una segunda opción la misma se ajusta hasta que el error es 0. (LÓPEZ, MORAO, & CEDEÑO, 2014)

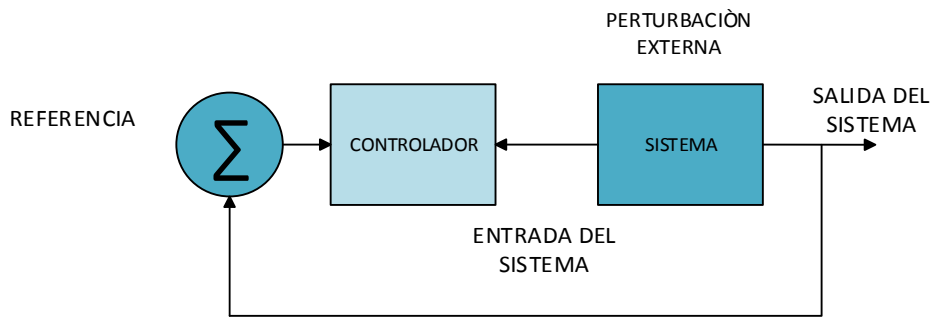


Figura: 12 Sistema de lazo Cerrado.

Fuente: (García, sf)

2.12. Metodología de Investigación

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó los siguientes métodos Inductivos, deductivos, experimentales basados en los procedimientos que se expondrán a continuación

El análisis de diversos trabajos, tuvo como pasos iniciales desde lo general a lo específico y al realizar una comparativa con los conocimientos adquiridos durante la carrera, se logró afirmar los conocimientos y definir las etapas primordiales del proyecto.

Se realiza un análisis de los diversos circuitos o diseños recomendados por múltiples autores, se elaboró un diseño adecuado y se desarrolla de manera experimental el circuito electrónico mostrado en la etapa de resultados.

2.12.1. Fase de Investigación

En la etapa de la investigación sobre el potencióstato se utilizará el método histórico lógico, el estudio parte desde sus inicios, sus avances en el tiempo y desarrollar una comprensión empírica sobre su funcionamiento, el resultado muestra un orden racional del funcionamiento y sus partes que lo integran.

El método Inductivo deductivo permitirá dar una estructura con un orden lógico que inicia desde lo general a lo particular, al desarrollar este método se organizó la fundamentación teórica, el presente resultado parte desde los conceptos generales de química y concluye con elementos básicos de electrónica.

2.12.2. Fase de presentación de resultados

Para esta fase se utilizará el método Inductivo deductivo para la estructuración del informe

El método de la observación permitirá registrar los diversos resultados en las diferentes etapas como es el desarrollo del hardware, se identificará sus partes más esenciales del Arduino, Analog Shield, para aprovechar sus características físicas y técnicas.

El método de la Experimentación permitirá determinar los comportamientos tanto de la Placa Arduino, Analog Shield y en especial la del circuito de acoplamiento, de tal forma que se podrá encontrar fallas y realizar los ajustes necesarios.

El método de la medición se lo empleo en la etapa de pruebas, debido a que se requiere comparaciones de las señales entregadas desde el potenciómetro, para el desarrollo de este ciclo se comparará las lecturas de voltaje y corriente de la tarjeta de acoplamiento con idénticas magnitudes generadas desde el multicalibrador (Fluke 754), estos resultados serán reflejados en el programa desarrollado para el potenciómetro, se corrige los diferentes errores generados en los puntos testeados.

3. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

En esta sección se abordará la selección, diseño e implementación de las etapas del sistema del potencióstato. Se iniciará con la etapa del procesador, luego se expondrá la conversión de señales tanto analógicas como digitales, el desarrollo del circuito para controlar la celda electroquímica y por último la integración de estos datos al computador.

3.1. Desarrollo del hardware

3.1.1. Etapas del potencióstato

Para la implementación del potencióstato y conforme la fase de investigación del capítulo anterior (figura 4) se ha seleccionado los siguientes módulos internos como se lo muestra en la figura 13.

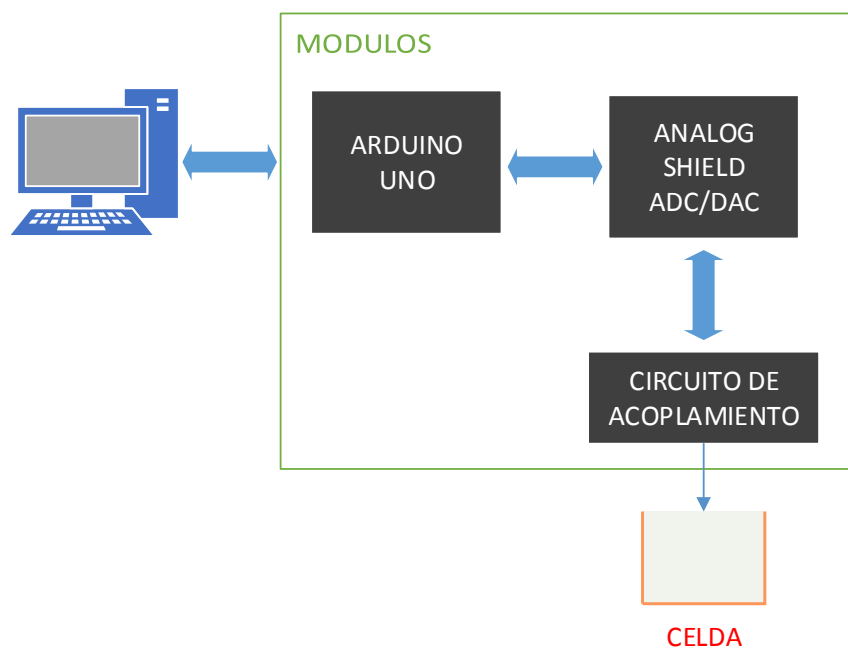


Figura: 13 Diagrama de módulos seleccionados.

Fuente: Autor

Cada elemento seleccionados en la figura 11 se lo describirá a detalle en la a partir del punto 3.1.2 Procesador

3.1.2. Procesador (Arduino Uno)

Para esta etapa se seleccionó la placa Arduino Uno, ya que sus características técnicas son las adecuadas para la tarjeta Analog Shield es decir son compatibles.

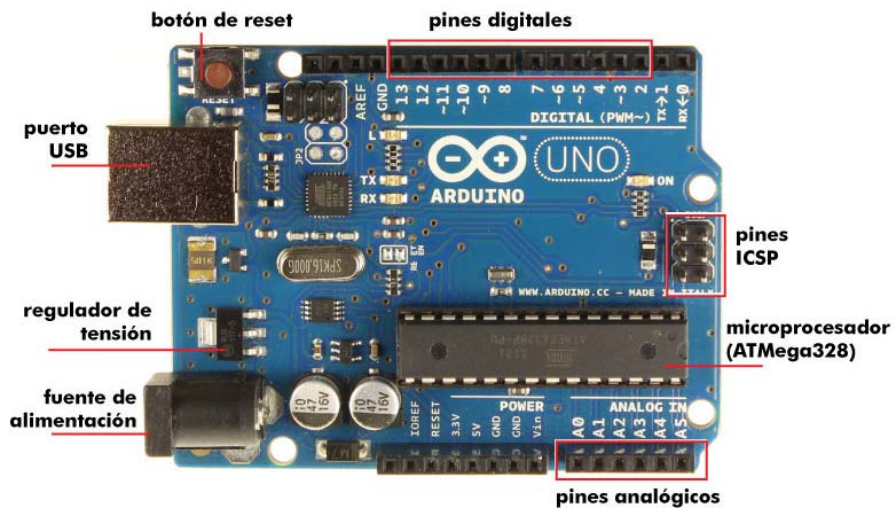


Figura: 14 Arduino Uno.

Fuente: (Hock-Chuan, 2015)

3.1.3. Conversión Analógico Digital / Digital Analógico

Para cumplir con el requerimiento conforme la norma ASTM G5, se requiere un conversor analógico digital (ADC) y digital analógico (DAC) de resolución no menor a 16 bits.

Elemento seleccionado para esta etapa es la tarjeta Analog Shield que cumple con las características mencionadas y se acopla con la tarjeta Arduino Uno, esta placa fue diseñada por la compañía Texas Instruments en colaboración con la Universidad de Stanford, su software y hardware es de libre uso.

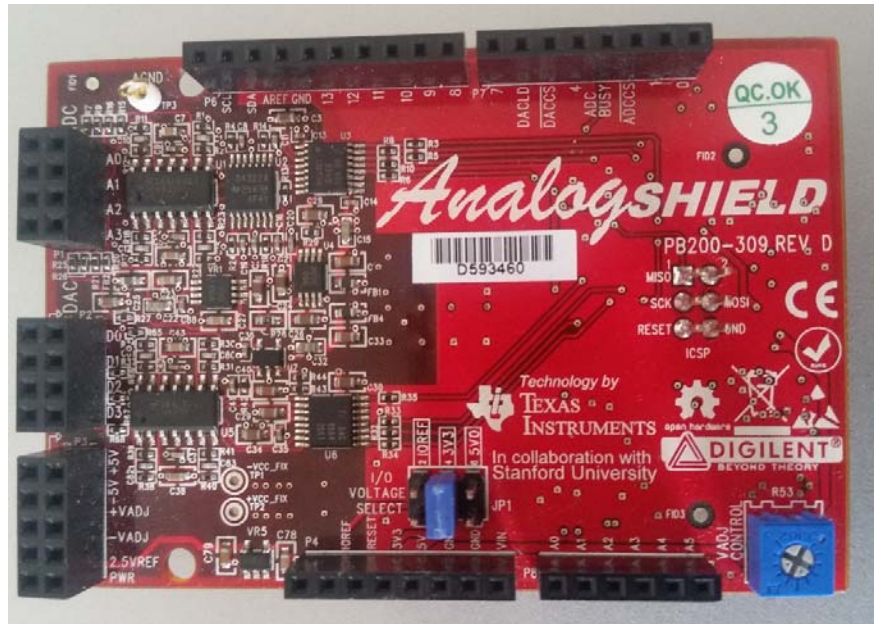


Figura: 15 Analog Shield.

Fuente: (Esposito, 2014)

3.1.4. Circuito Potenciostático

Este circuito de acople entre la tarjeta Analog Shield y celda, posee amplificadores operacionales de diferentes características, como resultado se tiene dos etapas secundarias que son: el controlador de voltaje y medición de corriente.

3.1.4.1. Controlador de voltaje

La finalidad de esta etapa es, controlar y mantener constante la diferencia de potencial existente entre el electrodo de trabajo y referencia.

A continuación se desarrollaran los conceptos y formulas mostradas en el capítulo anterior para justificar la selección de los elementos.

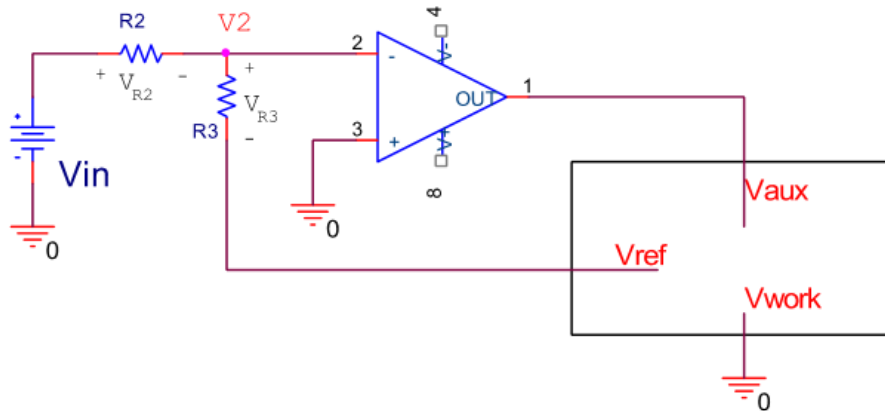


Figura: 16 Circuito controlador de potencial AE-RE.

Fuente: Autor

Esta etapa está conformada por dos amplificadores operacionales, un amplificador forma el circuito seguidor de tensión, el desarrollo de este circuito da como resultado la siguiente ecuación.

$$V_{in} = V_{out}$$

Al analizar el circuito que se muestra en la figura 16, donde se indica que el V_{ref} está en cortocircuito; debido a la inserción en la solución con el V_{aux} , con esta aclaración se puede aplicar la siguiente ecuación para calcular V_1 .

$$V_1 = \frac{R_3}{R_2+R_3} V_{IN} + \frac{R_2}{R_3+R_2} V_{REF} \quad \text{EC. 3.1}$$

Las características de un amplificador operacional indicadas anteriormente EC. 2.1 indican que el voltaje en la entrada No inversora e inversora es el mismo, en la figura 14 se muestra la entrada no inversora conectada a tierra, se demuestra que $V_2 = 0$.

$$0 = \frac{R_3}{R_2+R_3} V_{IN} + \frac{R_2}{R_3+R_2} V_{REF} \quad \text{EC. 3.2}$$

$$\frac{R_3}{R_2+R_3} V_{IN} = -\frac{R_2}{R_3+R_2} V_{REF} \quad \text{EC. 3.3}$$

$$\frac{1}{2}V_{IN} = -\frac{1}{2}V_{REF} \quad \text{EC. 3.4}$$

$$V_{IN} = -V_{REF} \quad \text{EC. 3.5}$$

Con el desarrollo de esta ecuación se logar determinar que $V_{ref} = -V_{in}$, para evitar una distinta caída de voltaje en V_1 y sea la misma corriente que circule en R_2 y R_3 . Para que esta ecuación se cumpla las resistencias deben tener igual valor.

El voltaje a ingresar por V_{in} tiene un rango de 0 a 5V, al variar el voltaje de entrada también cambia la corriente, debido a que la comprobación de esta variable lo realizará en módulo de medición y está en el orden de los micro amperios, se colocará resistencias de un valor 100 K Ω .

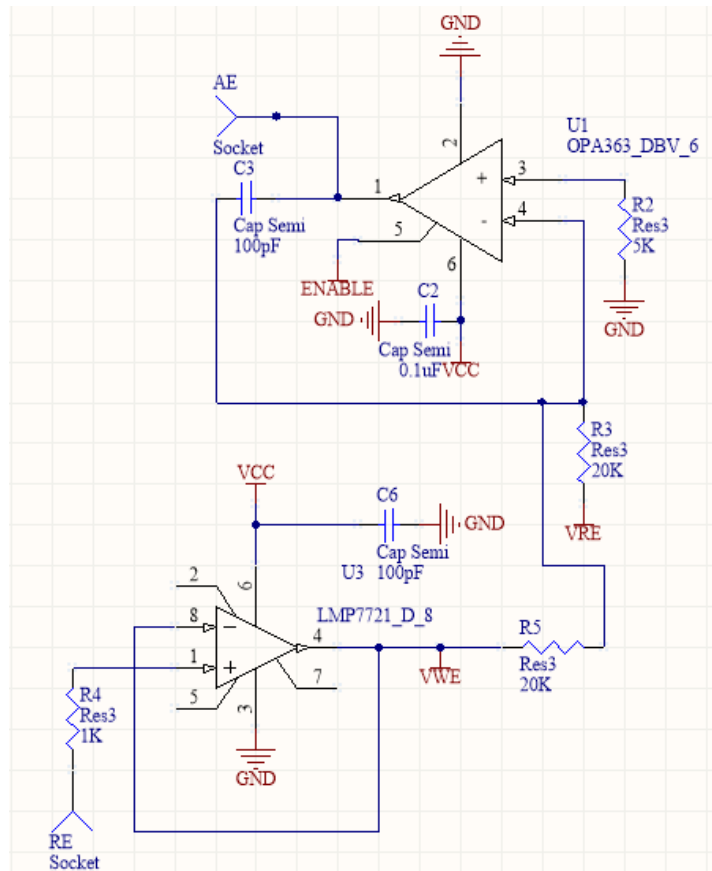


Figura: 17 Circuito controlador de potencial AE-RE.

Fuente: Autor.

Para la implementación de esta etapa secundaria (figura 17) es necesario el uso de dos amplificadores operacionales.

El seguidor de voltaje está compuesto por el amplificador operacional LMP7721 que cumple con las siguientes características.

- Corriente bias 20 fA
- Impedancia de entrada alta
- Recomendación por el fabricante Texas Instruments para fabricación de potencióstatos
- Rail to rail en la entrada y salida

Para la configuración del Controlador de voltaje (figura 17) se eligió el amplificador operacional OPA 363 por las siguientes razones

- Modo shut down (enable)
- Rail to rail en la entrada y salida
- Slew rate 5v/us
- Rail to rail en la entrada y salida

El modo shut down es una ventaja, pues permite habilitar el amplificador operacional cuando se lo requiera, de esta manera se evita colocar relés auxiliares.

3.1.4.2. Medición de corriente

Esta etapa se basa en el circuito conocido como Amplificador de transimpedancia, en la figura 16 se muestra su diseño. Esta etapa consiste en un aplicador operacional con una resistencia en la realimentación, de modo que la salida del operacional es una tensión proporcional a la corriente de entrada. La ganancia viene dada por la resistencia de la realimentación, por lo que al variar la misma, aumenta el rango dinámico del sistema.

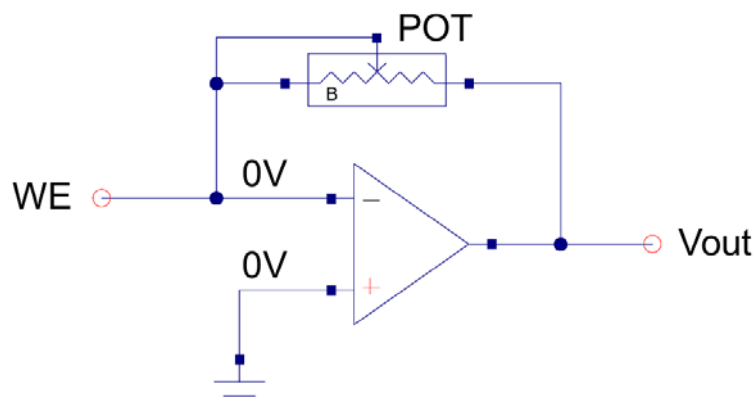


Figura: 18 Circuito de transimpedancia básico.

Fuente: Autor.

Para la conversión intensidad voltaje se utiliza la fórmula de la ley de Ohm, el rango de corriente es los microamperios, un rango de voltaje de 0 a 5V.

$$I_{min} = \frac{V_{max}}{R_{Max}}$$

Para la selección del potenciómetro se tomaron las siguientes consideraciones.

Las resistencias para el Pull-Up son de 4.7kΩ. Arduino posee esta comunicación I2C en sus dos terminales analógicos A4 (SDA) y A5 (SCL).

El tipo de resistencia variable seleccionada para este diseño es un potenciómetro digital. Es el AD5241 y tiene las siguientes características

- Comunicación I2C
- Rango de resistencia máxima 1MΩ (mayor rango en el mercado)
- 256 posiciones

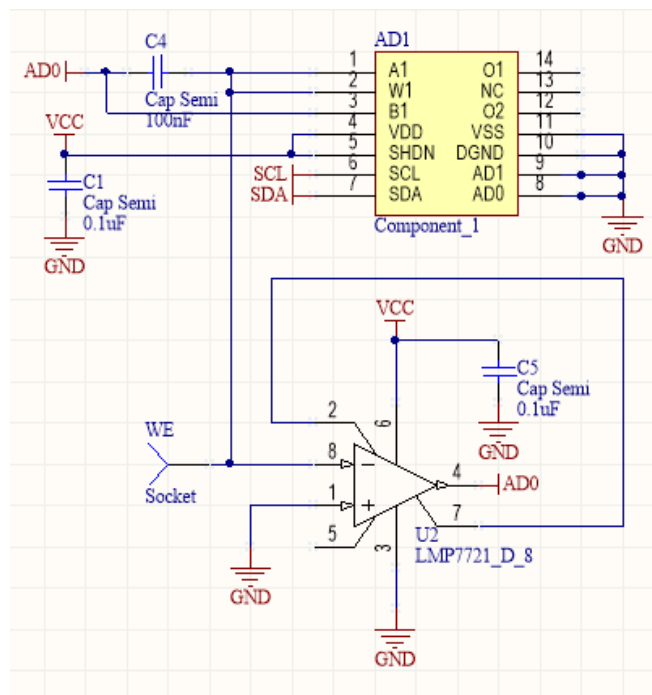


Figura: 19 Circuito de conversión V-I.

Fuente: Autor.

3.2. Diseño Electrónico

Para el diseño de la placa de circuito impreso se toman en cuenta los siguientes aspectos:

- Todos los elementos electrónicos son de montaje superficial
- La placa de circuito impreso es de doble lado, las dimensiones y pines de conexión serán dimensionados para la placa Analog Shield.

- El diseño tiene como finalidad ser desmontable por razones técnicas de mantenimiento o reparación.

Para el desarrollo de los diagramas esquemáticos y placa de circuito impreso se utilizó el programa Altium versión 15, en el transcurso de la etapa de diseño electrónico se crearon librerías para cada integrado que se utilizó, ya que los elementos requeridos no se encuentran en la base de datos.

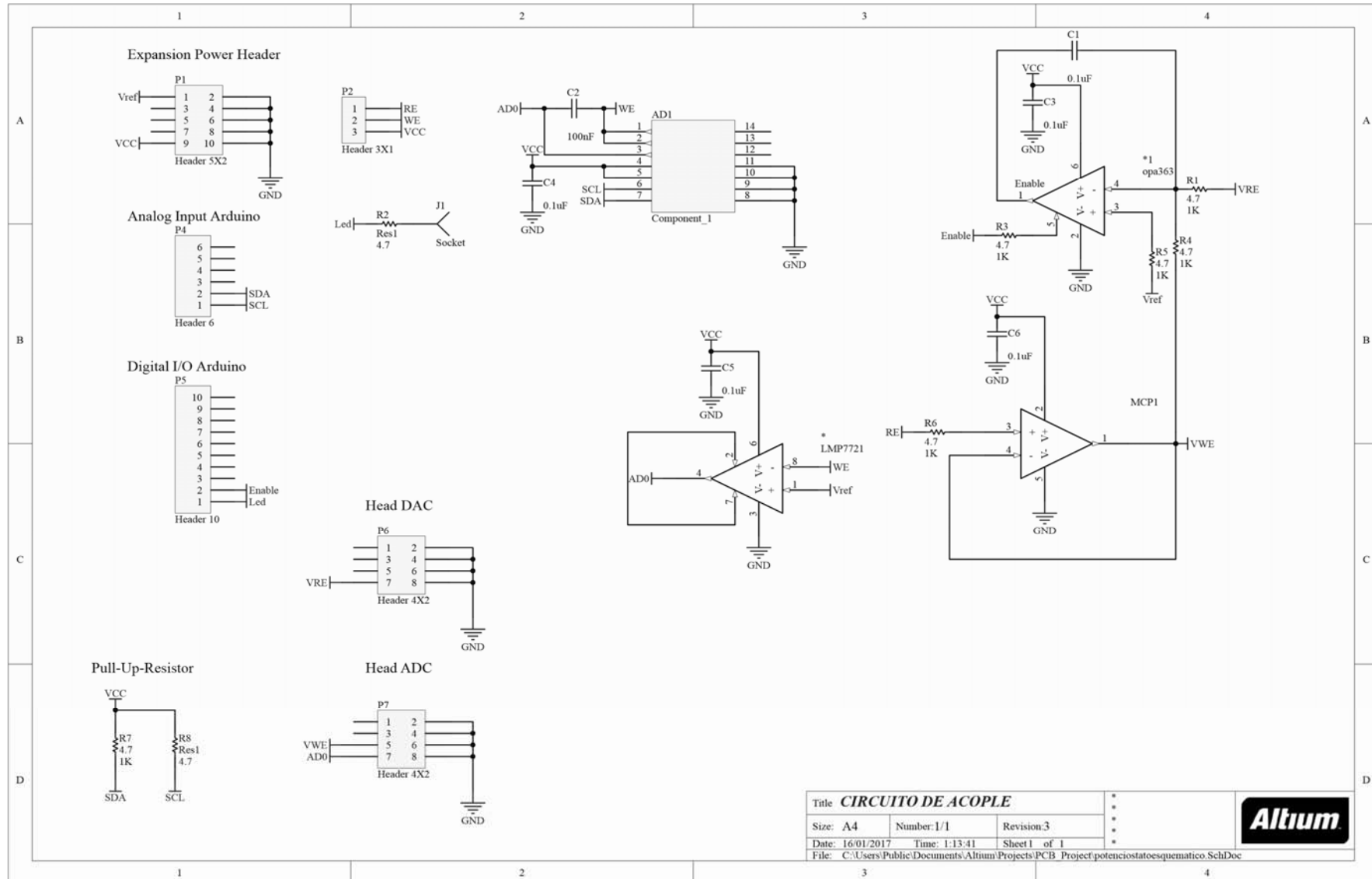


Figura: 20 Esquemático de tarjeta de acoplamiento.

Fuente: Autor.

3.2.1. Fabricación de las placas

A continuación se indican los diferentes pasos para el desarrollo de la placa de circuito impreso de doble capa, se omite pasos iniciales por ser básicos.

- La impresión a escala en papel de transferencia.
- La transferencia y quemado del diseño hacia el placa de circuito impreso
- Perforación de la placa grafico (figura 21).

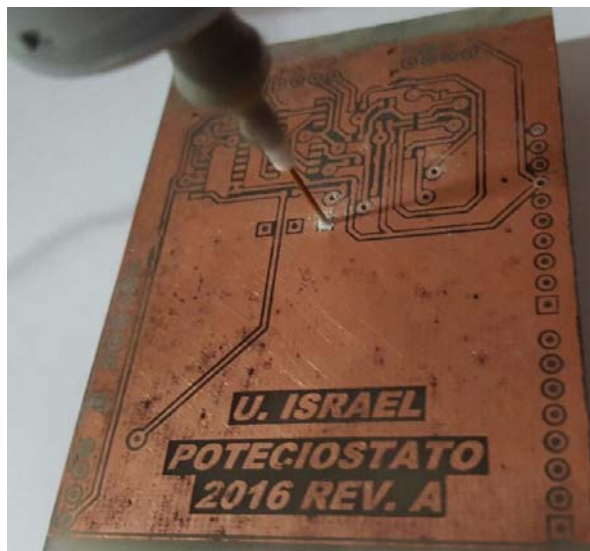


Figura: 21 Perforación en la placa.

Fuente: Autor.

Para la soldadura de los elementos de superficie se utilizó soldadura en pasta y con ayuda de un cautín de elementos de soldadura superficial se logra su correcto acople.



Figura: 22 Ubicación de elementos de superficie en la placa.

Fuente: Autor.

Al realizar el acoplamiento entre las placas Analog shield y módulo potenciostático, se interconectan sin tener ninguna dificultad debido a que el diseño se basó en las características físicas de Analog Shield como se indica en la figura 23.

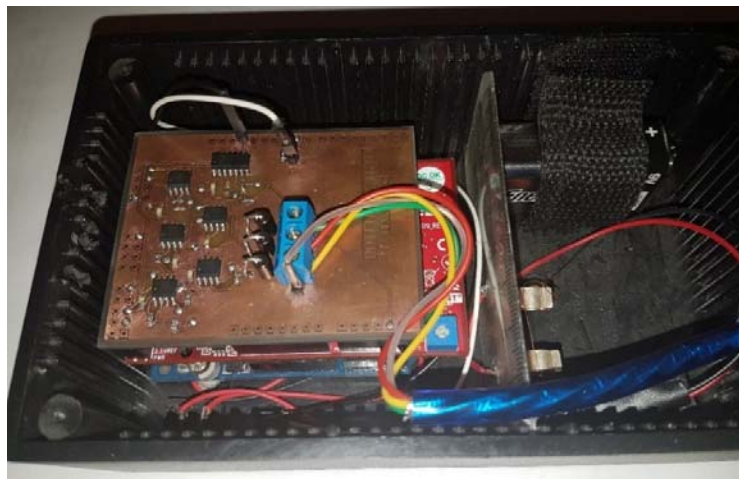


Figura: 23 Ubicación de las placas del potenciostato.

Fuente: Autor.

3.3. Desarrollo del software

3.3.1. Sistema de control

Para el proceso automático del potencióstato se requiere determinar el sistema de control a través de un diagrama de bloques en función de un lazo de control realimentado donde se indica el set point y sus diferentes etapas de acuerdo a la siguiente figura.

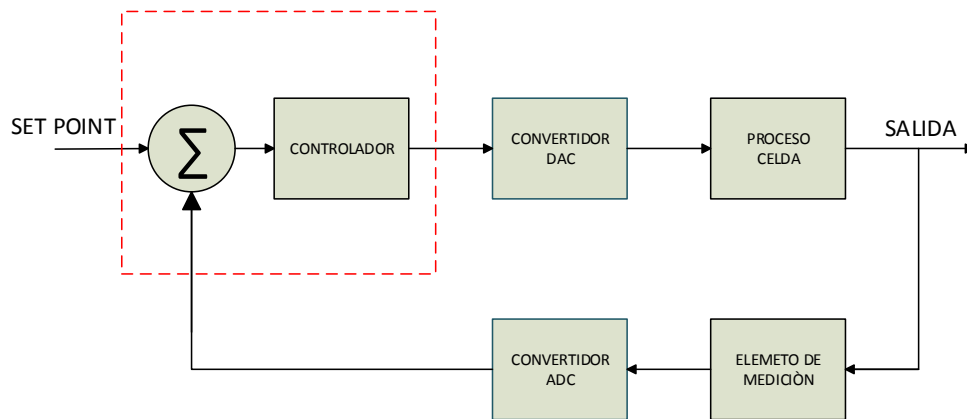


Figura: 24 Diagrama de bloque lazo cerrado.

Fuente: Autor

Para el desarrollo del interfaz entre la placa arduino y la computadora se dispone de medio de comunicación serial.

Para el entorno grafico se seleccionó el programa Labview por la interfaz que ofrece al momento del desarrollo.

3.3.2. Ventajas

- Los datos generados desde la placa arduino se almacenan directamente al computador sin necesidad de implementar una memoria shield adicional en el Potencióstato.
- La velocidad que ofrece el procesador del Arduino Uno es suficiente para enviar y captar la información desde el computador.

El tratamiento de los datos enviados desde el arduino se procesan en el entorno de labview, para tener una señal cien por ciento confiable se procede a calibrar las entradas analógicas.

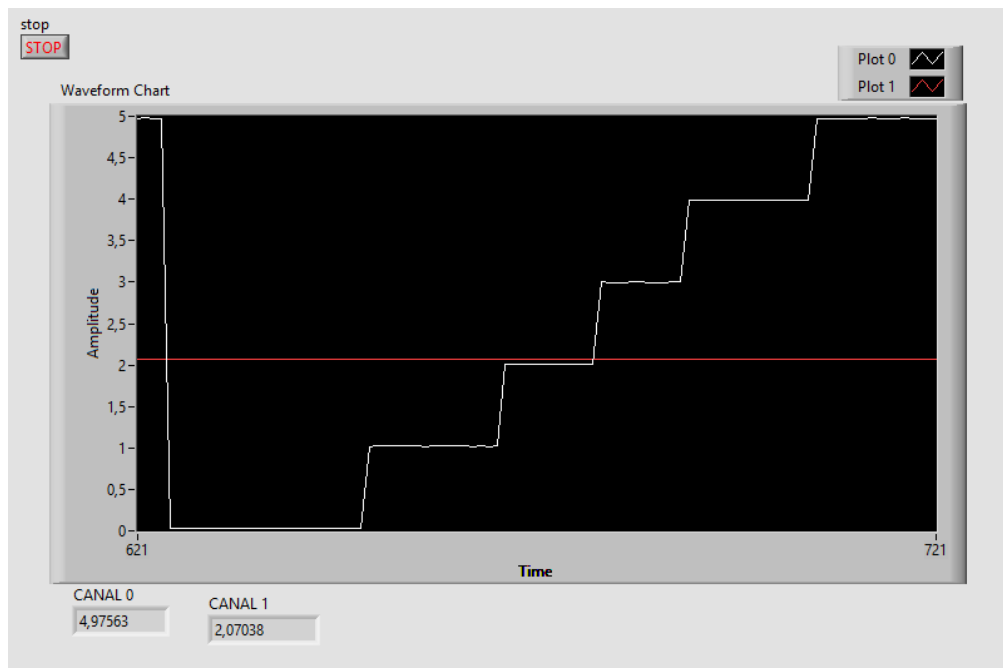


Figura: 25 Visualización de entradas analógicas con el equipo patrón.

Fuente: Autor.

El entorno de usuario debe ser lo más amigable y entendible posible, puesto que la persona que utilizará no está familiarizada con la programación o diseño de este software.

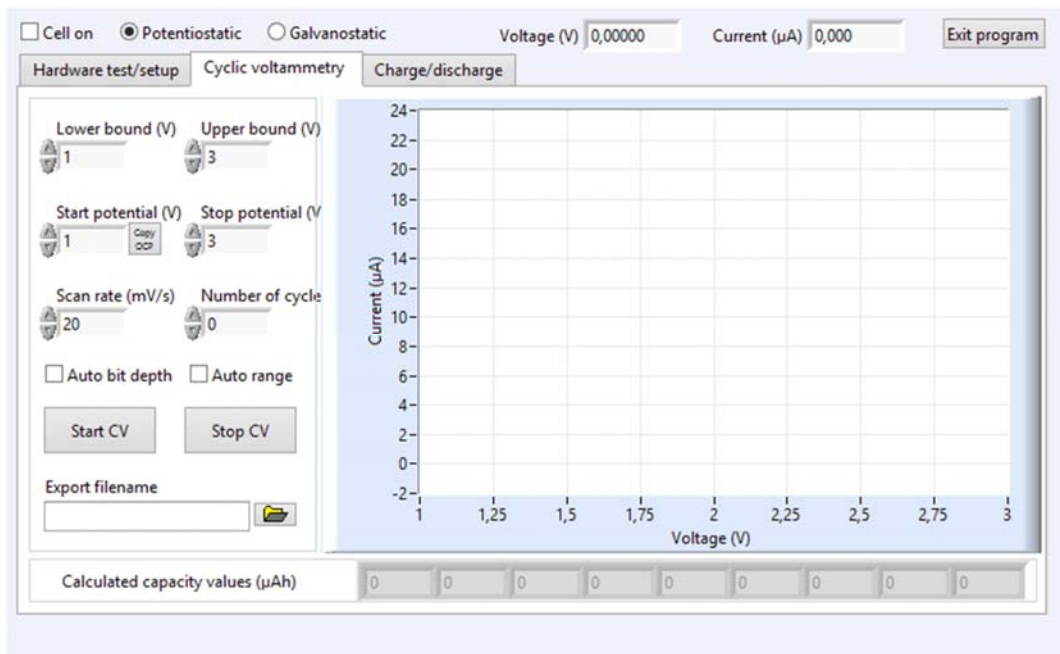


Figura: 26 Pantalla de desarrollo de las pruebas para electroquímicas.

Fuente: Autor.

Las opciones de las pantallas son las siguientes

- Seleccionar el voltaje de inicio y final de la prueba con un rango de -5 V a 5V
- Seleccionar la velocidad de muestreo en la rampa de subida y bajada (ciclo)
- Exportar los resultados en un archivo y generar un respaldo de cada prueba electroquímica realizada
- Con el botón de inicio se asegura que la generación de voltaje en los terminales es cero para evitar posibles daños mientras el equipo no esté en funcionamiento.

Los resultados con la placa de integración del potenciostato son admisibles conforme el rango de error permitido por la norma, para la prueba del potenciostato embebido, se utilizó resistencias de alta precisión como simulación de la celda electroquímica.

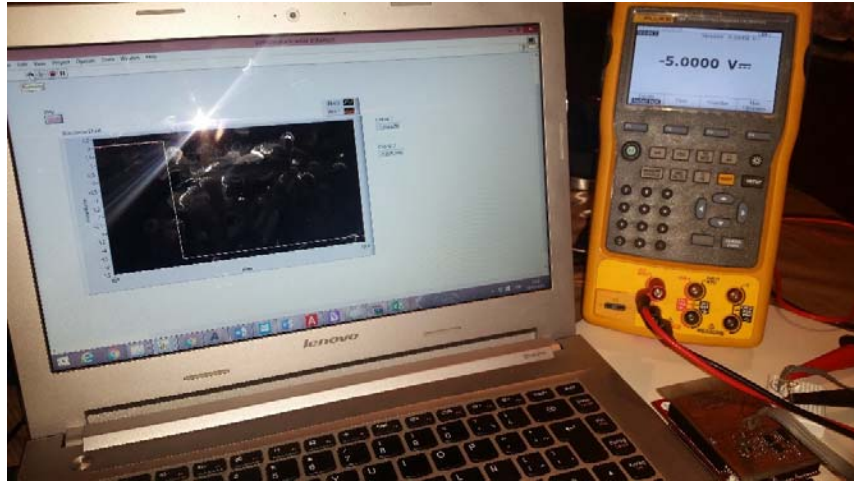


Figura: 27 Integración de señales desde el potencióstato y la computadora.

Fuente: Autor.

Las lecturas son validadas por el multicalibrador marca Fluke 754, esto certifica el correcto funcionamiento del potencióstato canal por canal tanto de entrada como salida, las lecturas son visualizadas desde la pantalla de un computador mediante el software Labview en tiempo real como se muestra en la figura 27.

3.4. Pruebas

3.4.1. Procedimiento de calibración de las entradas analógicas

Se procede a alimentar con una señal inducida (voltaje) desde el multicalibrador Fluke 754, el cual tiene la capacidad de generar y medir voltaje con una resolución de micro voltios como ya se indicó anteriormente.

El rango de prueba es de -5V a 5V con la máxima resolución de equipo patrón, las lecturas tomadas se visualizan en el entorno Labview.

En la tabla 3 se muestra los resultados de la primera verificación del potencióstato, el cual arroja un error en todos los puntos en prueba.

Tabla 3: Verificación de entrada analógica (error).

| TABLA DE RESULTADOS CALIBRACIÓN CANAL 0 | | | | | | | |
|---|---------|----------------|------------|----------------|---------|--------|----|
| ENTRADA | | SALIDA | | | | CUMPLE | |
| EQUIPO | V | BANDA BAJA (V) | ACTUAL (V) | BANDA ALTA (V) | ERROR % | SI | NO |
| FLUKE 754 | 5,0000 | 5,0000 | 5,040940 | 5,0000 | -0,8188 | | X |
| FLUKE 754 | 4,0000 | 4,0000 | 4,050680 | 4,0000 | -1,0136 | | X |
| FLUKE 754 | 3,0000 | 3,0000 | 3,060650 | 3,0000 | -1,2130 | | X |
| FLUKE 754 | 2,0000 | 2,0000 | 2,051450 | 2,0000 | -1,0290 | | X |
| FLUKE 754 | 1,0000 | 1,0000 | 1,079870 | 1,0000 | -1,5974 | | X |
| FLUKE 754 | 0,0000 | 0,0000 | 0,063800 | 0,0000 | -1,2760 | | X |
| FLUKE 754 | -1,0000 | -1,0000 | -0,953400 | -1,0000 | -0,9320 | | X |
| FLUKE 754 | -2,0000 | -2,0000 | -1,953450 | -2,0000 | -0,9310 | | X |
| FLUKE 754 | -3,0000 | -3,0000 | -2,952180 | -3,0000 | -0,9564 | | X |
| FLUKE 754 | -4,0000 | -4,0000 | -3,967800 | -4,0000 | -0,6440 | | X |
| FLUKE 754 | -5,0000 | -5,0000 | -4,947600 | -5,0000 | -1,0480 | | X |

Fuente: Autor

La corrección se la realiza mediante software (Labview), con un factor de ajuste en cada punto comprobado, los resultados de esta prueba se muestra en la tabla 4 con un error menor a 0.5%.

Tabla 4: Resultado de calibración del canal 0 (V)

| TABLA DE RESULTADOS CALIBRACIÓN CANAL 0 | | | | | | | |
|---|---------|-------------------|---------------|-------------------|------------|--------|----|
| ENTRADA | | SALIDA | | | | | |
| EQUIPO | V | BANDA BAJA (V) | ACTUAL (V) | BANDA ALTA (V) | ERROR % | CUMPLE | |
| | | | | | | SI | NO |
| FLUKE 754 | 5,0000 | 5,0000 | 4,990940 | 5,0000 | 0,1812 | X | |
| FLUKE 754 | 4,0000 | 4,0000 | 4,000680 | 4,0000 | -0,0136 | X | |
| FLUKE 754 | 3,0000 | 3,0000 | 3,010650 | 3,0000 | -0,2130 | X | |
| FLUKE 754 | 2,0000 | 2,0000 | 2,001450 | 2,0000 | -0,0290 | X | |
| FLUKE 754 | 1,0000 | 1,0000 | 1,029870 | 1,0000 | -0,5974 | X | |
| FLUKE 754 | 0,0000 | 0,0000 | 0,013800 | 0,0000 | -0,2760 | X | |
| FLUKE 754 | -1,0000 | -1,0000 | -1,003400 | -1,0000 | 0,0680 | X | |
| FLUKE 754 | -2,0000 | -2,0000 | -2,003450 | -2,0000 | 0,0690 | X | |
| FLUKE 754 | -3,0000 | -3,0000 | -3,002180 | -3,0000 | 0,0436 | X | |
| FLUKE 754 | -4,0000 | -4,0000 | -4,017800 | -4,0000 | 0,3560 | X | |
| FLUKE 754 | -5,0000 | -5,0000 | -4,997600 | -5,0000 | -0,0480 | X | |

Fuente: Autor

Los resultados que se han comprobado son admisibles para el desarrollo del potenciómetro como se indica en la tabla 4, confirma que el canal de la tarjeta analógica está calibrada y ajustada como se indica en la figura 28, en la cual se evidencia las curvas de cada tabla antes y después de la calibración.

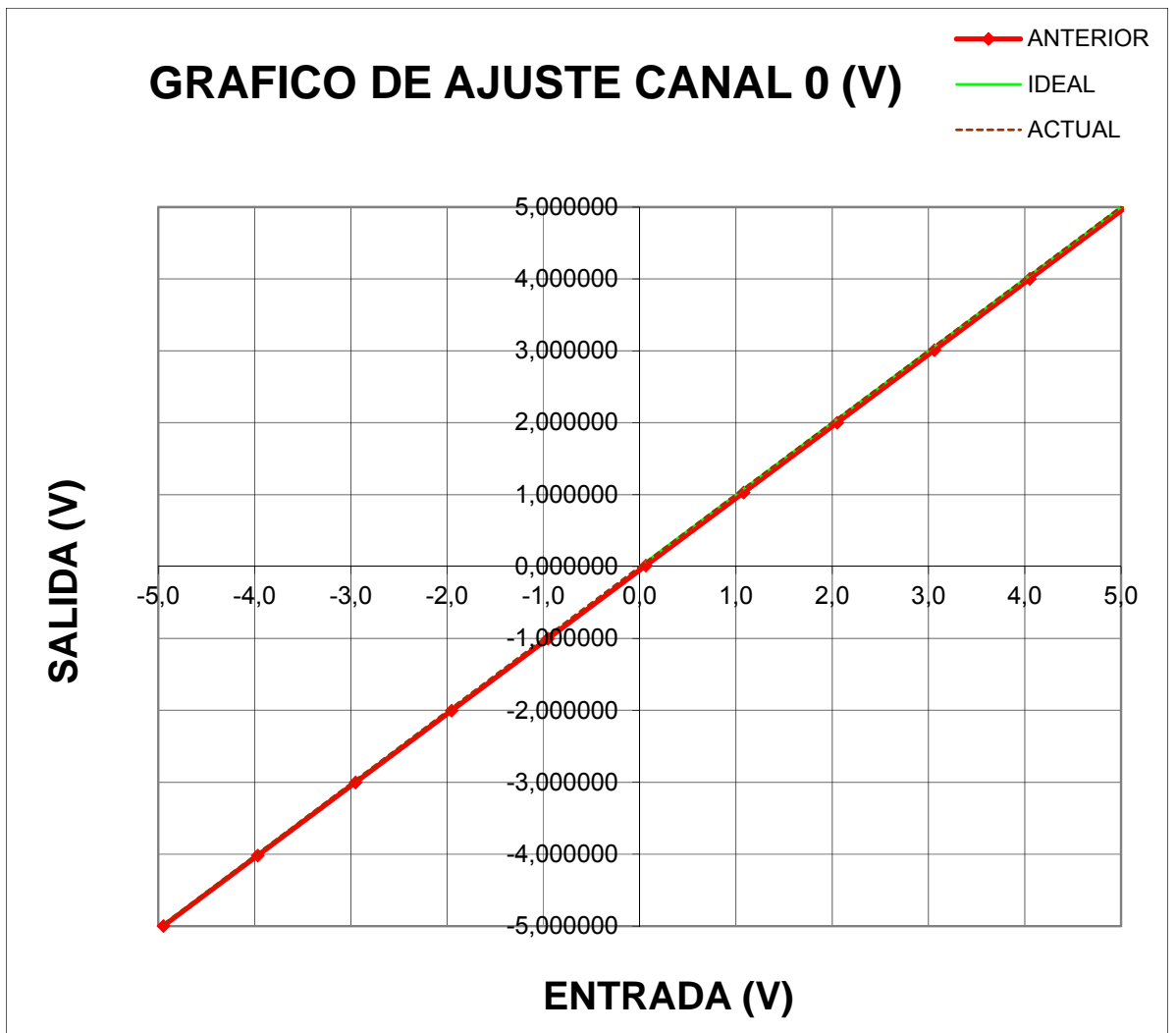


Figura: 28 Curva de calibración del canal 0 entrada y salida voltaje.

Fuente: Autor

3.4.2. Dummy cell

El procedimiento es colocar una celda simulada, es una resistencia fija de alta precisión de 1KΩ con un extremo conectado a WE y el otro extremo a CE y RE, al realizar un variado de voltaje su respuesta debe ser la corriente calculada de acuerdo a la ley de Ohm.

$$I = \frac{V}{R}$$

Donde

I = Intensidad calculada

V= Voltaje generado (conocido)

R= resistencia simulada (conocido)

Tabla 5: Lecturas de salida con dummy cell

| LECTURA DE CORRIENTE | |
|----------------------|-----------|
| Vin (V) | Iout (mA) |
| 0,000 | 0,00 |
| 0,500 | 499,60 |
| 1,002 | 1001,00 |
| 1,500 | 1498,50 |
| 2,000 | 1998,00 |
| 2,500 | 2497,50 |
| 3,000 | 2997,00 |
| 3,500 | 3496,50 |
| 4,003 | 3999,00 |
| 4,500 | 4495,50 |
| 5,000 | 4995,00 |

Fuente: Autor

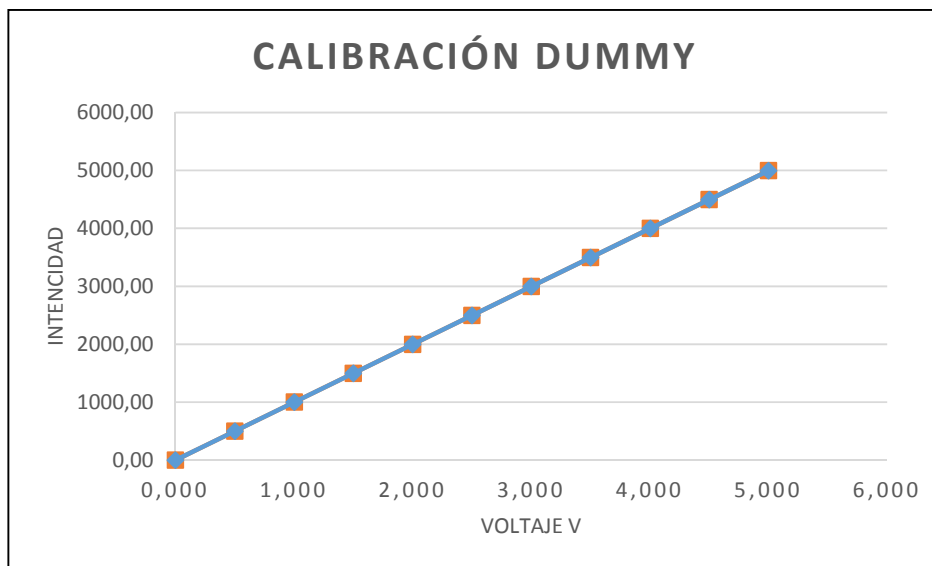


Figura: 29 Recta de salida dummy cell.

Fuente: Autor

3.5. Presupuesto

La siguiente sección se indican los elementos comprados para el proyecto se divide en tres secciones la tabla 7 se indica los materiales importados directamente, la tabla 6 los materiales comprados localmente y la tabla 8 cantidad de horas hombre utilizadas en las diferentes etapas del proyecto.

Tabla 6: Listado de elementos utilizados-compra local.

| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (USD) | TOTAL (USD) |
|------|---|----------|-----------------------|--------------|
| 1 | Arduino Uno | 1 | 19,89 | 19,89 |
| 2 | Soldadura de superficie | 1 | 7,56 | 7,56 |
| 3 | Hojas de transferencia | 5 | 1,7 | 8,5 |
| 4 | PCB doble lado | 1 | 9,8 | 9,8 |
| 5 | Acido férrico | 2 | 1,6 | 3,2 |
| 6 | Cable de cuatro hilos + ferrita | 1 | 12 | 12 |
| 7 | Conectores de tres pines | 2 | 2,38 | 4,76 |
| 8 | Pines de conexión | 4 | 1 | 4 |
| 9 | Cable USB 2.0 | 1 | 2,8 | 2,8 |
| 10 | Caja moldeada de proyectos electrónicos | 1 | 8,4 | 8,4 |
| | | | TOTAL | 80,91 |

Fuente: Autor

Tabla 7: Listado de elementos utilizados importados.

| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | UNITARIO (USD) | TOTAL (USD) |
|------|--|----------|-------------------|----------------|
| 1 | 584-AD5241BRZ1M AD5241BRZ1M IC I2C Compat | 1 | 2,59 | 2,59 |
| 2 | 581-GX02YD104KAT2 GX02YD104KAT2-500 0.1uF 10% | 12 | 0,63 | 7,56 |
| 3 | 80-C320C104J5R C320C104J5R5TA 50volts 0.1uF 5% | 5 | 0,33 | 1,65 |
| 4 | 71-S102JT1K0000TB Y07851K00000T9L S102JT 1Kohms 0.01% | 2 | 12,15 | 24,3 |
| 5 | 926-LMP7721MA/NOPB LMP7721MA/NOPB | 2 | 10,65 | 21,3 |
| 6 | 424-ANALOG-SHIELD 410-309P-KIT Analog Shield | 1 | 49,99 | 49,99 |
| 7 | 595-OPA363IDBVR OPA363IDBVR | 1 | 2,38 | 2,38 |
| 8 | RES SMD 4.7K OHM 5% 1/10W 0402 | 2 | 0,33 | 0,66 |
| | | | TOTAL | 110,43 |

Fuente: Autor

Tabla 8: Horas hombre utilizadas.

| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | HORAS | PRECIO UNITARIO | TOTAL (USD) |
|------|----------------------------|-------|--------------------|----------------|
| 1 | Desarrollo - Investigación | 60 | 18 | 1080 |
| 2 | Implementación - Montaje | 35 | 18 | 630 |
| 3 | Programación | 45 | 18 | 810 |
| | | | TOTAL | 2520 |

Fuente: Autor

Tabla 9: Resumen total de gastos del proyecto.

| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | TOTAL (USD) |
|-------------|--------------------------------|------------------------|
| 1 | Elementos importados | 110,43 |
| 2 | Elementos comprados localmente | 80,91 |
| 3 | Ejecución - programación | 2520 |
| | | 2711,34 |

Fuente: Autor

3.5.1. Resumen de Costos

El costo por la implementación del potencióstato es de USD 2 711,34, como la mayoría de sus partes electrónicas son de tamaño micro y el traslado de estos elementos desde el exterior fue aprovechado en un viaje familiar, no se contempla recargos adicionales generados por transporte, nacionalización o impuestos adicionales.

A modo de evaluación se tiene que la compañía ICM Laboratory alquila un potencióstato de marca Gamry 3000 Potentiostat/Galvanostat/ZRA para las pruebas solicitadas por los clientes, este modelo y marca se toma como referencia de cotización, el documento entregado por parte del fabricante establece un valor de \$12 386 dólares americanos, ya incluido todos los gastos generados como adicionales.

El potencióstato es alquilado con una frecuencia promedio de cinco veces por mes, el costo del alquiler es de \$ 50 dólares por día el cual genera un gasto mensual de \$ 250 dólares por mes.

Tabla 10: Análisis económico

| ANÁLISIS ECONÓMICO PROYECTO | | | |
|-------------------------------------|--------------------|---------------|-----------------------|
| Alquiler día | \$ 50,00 | | |
| promedio Mes | 5 | | |
| | | | |
| Alquiler del equipo | MES | AÑO | |
| DC/300 | \$ 250,00 | \$ 3.000,00 | |
| | | | |
| Compra de equipo | Exwork | Total | |
| DC/300 | \$ 8.340,00 | \$ 13.761,00 | |
| | | | |
| Implementación | Total | | |
| Potenciostato | \$ 2.711,34 | | |
| | | | |
| PROYECCIÓN | | | |
| | Alquiler | Compra | Implementación |
| Capital invertido | | \$ 13.761,00 | \$ 2.711,34 |
| Gastos | \$ 3.000,00 | | |
| Recuperación Capital (meses) | 0 | 54 | 10 |

Fuente: Autor

Al interpretar la tabla 10 mostrada en la parte superior se determina que la mejor viabilidad es la construcción por ser de menor costo a comparación de las otras dos alternativas. La proyección de rápido retorno de capital en un plazo de un año y el prototipo realizado es el primero por lo cual tiene una inversión inicial alta debido a todos los costos indirectos de este proyecto.

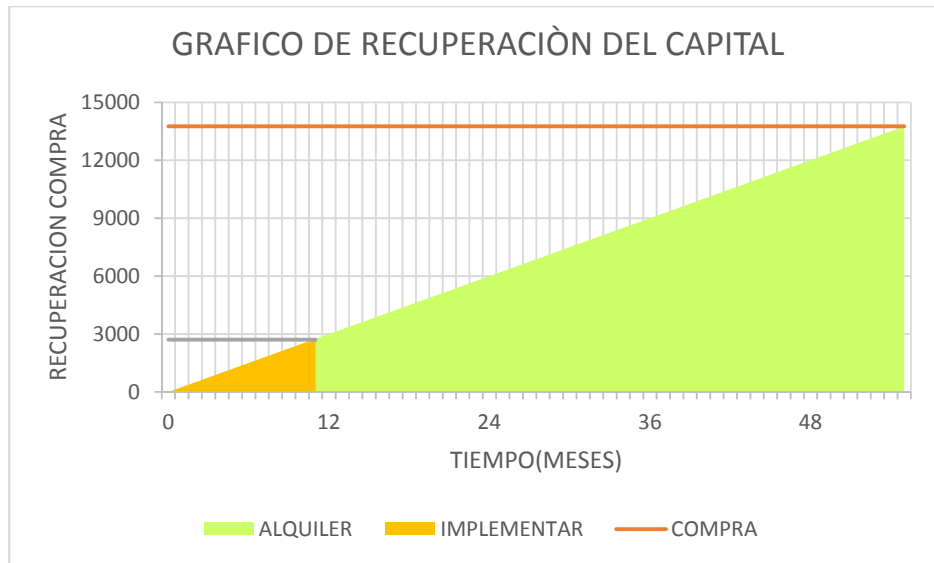


Figura: 30 Curvas de recuperación de capital por cada propuesta.

Fuente: Autor

En la figura 30 se muestra los puntos de intersección de la recuperación de capital por cada alternativa económica, la curva de alquiler indica el punto de recuperación en 10 meses sombreado de color amarillo y la de compra en 54 meses de color verde. La mejor opción es la implementación como se lo indico anteriormente.

CONCLUSIONES

- Se diseñó un sistema electrónico según requerimientos para la conversión de datos generados y enviados desde la celda del potencióstato, todos los elementos seleccionados cumplen con estándares electrónicos según las normativas aplicativas a este proyecto.
- Se elaboró un equipo de alta resolución y precisión, para la ejecución de pruebas electroquímicas de laboratorio, sus distintas características técnicas cumplen con la norma ASTM G5-87 STANDARD REFERENCE TEST METHOD FOR MAKING POTENCIOSTATIC.
- La interface desarrollada en Labview la cual sirve de enlace entre el usuario y el potencióstato cumple con los requerimientos en cuanto a la fijación inicial de la prueba, visualización de los resultados en tiempo real durante la prueba y el almacenamiento archivo en un computador.
- Con el estudio económico realizado se determina que la mejor viabilidad es la construcción por su baja inversión y su rápido retorno de capital y se debe aclarar que el prototipo realizado por ser el primero tiene una inversión inicial alta debido a costos indirectos.

RECOMENDACIONES

- Para logra una mejor resolución es necesario tener una entrada con un cable que tengan revestimiento interno de aluminio y que posea un cable de drenaje fijado a tierra para reducir el ruido.
- Todos los elementos electrónicos son de importación, en vista que en el mercado nacional no cuentan con elementos de superficie, es necesario tener un stock mínimo de cada elemento para sustentar cualquier novedad, ya sea por mantenimiento o reparación del equipo.
- La sensibilidad de los elementos a corrientes estáticas es muy alta para evitar daños a los elementos o tarjetas se debe utilizar métodos que ayuden a disipar estas cargas.
- Para controlar el potenciómetro desde la interfaz del usuario en el computador, es necesario direccionar el puerto usb solo para uso exclusivo de Labview y no causar interferencias con arduino.
- Al diseño se acoplo una batería de 9 Vdc como alimentación principal del equipo y darle una característica de portabilidad.
- El manejo del equipo y la celda deberá ser por personal capacitado en su uso para no causar daños a estos.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, L. E. (2014). *Elaboración de un potenciostato de tres electrodos e implementación en medición de metales pesados*. Quito: Universidad San Francisco.
- ASTM. (2002). Standard Reference test method for making potentiodynamic anodic.
- Boylestad. (2009). *Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. Mexico.
- Carletti, E. (2016). *Robots*. Obtenido de http://robots-argentina.com.ar/Comunicacion_busI2C.htm
- Diego Gomez, A. R. (11 de junio de 2011). *Revistas.unal.edu.co*. Obtenido de Revistas de física:
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/viewFile/34865/35140>
- Doelling, R. (2000). Potentiostats . *Bank Electronics*, 1-24.
- Elena, F. (1995). VOL T AMETRIA CICLICA. *Revista de Química*, 165-172.
- Esposito, W. (5 de junio de 2014). *www.diligentinc.com*. Obtenido de https://reference.diligentinc.com/_media/analogshield_rm_rev3.pdf
- Esteban, G., Sergio, S., Armando, A., & Marcos, L. (1997). Las pruebas electroquímicas y el potenciostato autónomo programable. *IIE*, 1-5.
- Franco, S. (2005). *Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados operacionales*. Mexico DF: Mc Graw Hill.
- Hernandez, R. (2013). Construcción, implementación y calibración de Potenciostato dedicado a mediciones voltamétricas. *ITESM*, 3-5.
- Hock-Chuan, C. (octubre de 2015). *Getting Started with Arduino*. Obtenido de <https://www.ntu.edu.sg/home/ehchua/programming/arduino/Arduino.html>
- JAIRO, C. (2012). DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN BIPOTENCIOSTATO DE PRECISIÓN. Bucaramanga, Colombia: Universidad industrial de santander.

labview. (2016). *Labview*. Obtenido de <http://www.ni.com/labview/why/esa/>

Monica, G. (19 de Noviembre de 2010). *La guía Química*. Obtenido de <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/potenciostato>

Oscar Baltuano, Y. H. (2012). *Desarrollo de un potenciostato analítico de bajo costo y altas prestaciones*. Lima: IPEN.

Oscar Baltuano, A. L. (2012). *Desarrollo de un medidor autónomo de bajo costo para la determinación de calidad química del agua*. Lima: IPEN.

Renato Salazar, N. R. (2003). *Diseño e implementación de un equipo portátil para ensayos electroquímicos de corrosión en campo*. Lima: PUCP.

Renato, S., & Narciso, F. (2003). *Diseño e implementación de un equipo portátil para ensayos electroquímicos de corrosión en campo*. Lima, Perú: Tesis PUCP.

Sanchez, J. L. (2004). *Realización de un Potenciostato*. Madrid.

ANEXOS

Tabla 11 Características Arduino

| RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS ARDUINO UNO | |
|--|--|
| Microcontroladores | ATmega328 |
| Tensión de funcionamiento | 5V |
| Voltaje de entrada (recomendado) | 7-12V |
| Voltaje de entrada (límites) | 6-20V |
| Digital I / O Pins | 14 (de los cuales 6 proporcionan PWM) |
| Pines de entrada analógica | 6 |
| Corriente continua para las E / S Pin | 40 mA |
| Corriente de la CC para Pin 3.3V | 50 mA |
| Memoria Flash | 32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB utilizado por el gestor de arranque |
| SRAM | 2 KB (ATmega328) |
| EEPROM | 1 KB (ATmega328) |
| Velocidad del reloj | 16 MHz |

Fuente: (Hock-Chuan, 2015)

. Placa de circuitos impresos desarrollados.

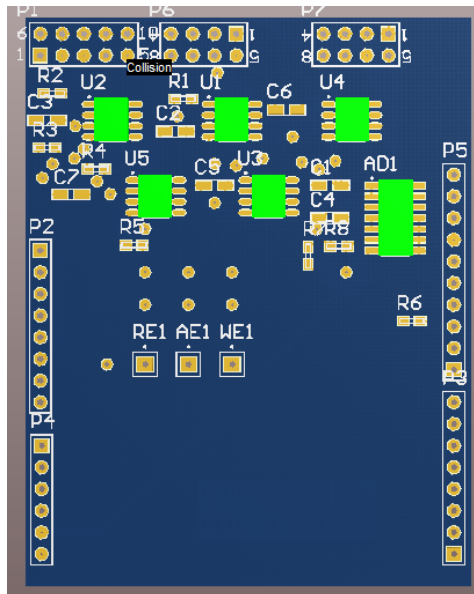


Figura: 31 Placa en dos dimensiones.

Fuente: Autor.

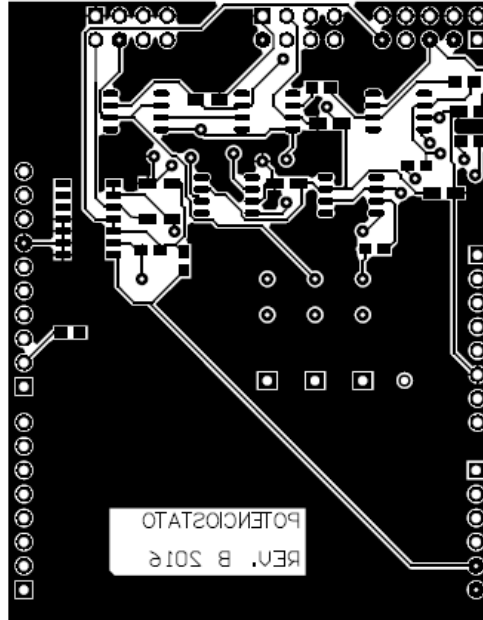


Figura: 32 PCB derecho para impresión en espejo.

Fuente: Autor.

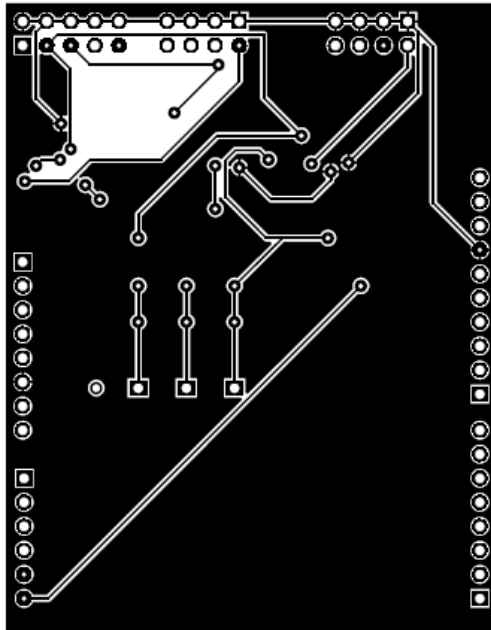


Figura: 33 PCB cara posterior en impresión directa.

Fuente: Autor.

Programación de Labview.

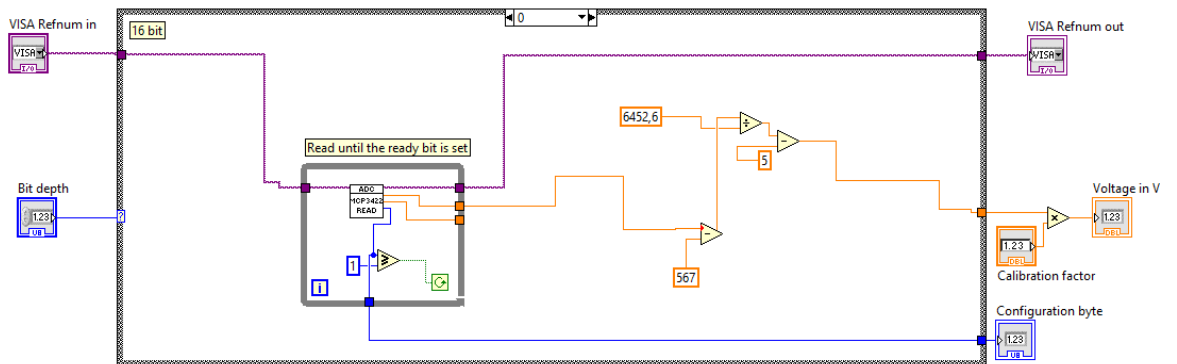


Figura: 34 Manejo de lectura de datos en labview.

Fuente: Autor.

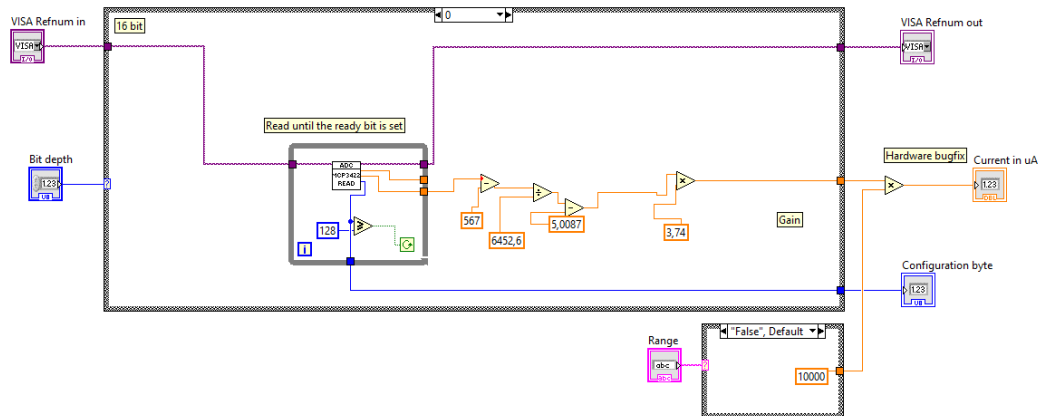


Figura: 35 Manejo de lectura de datos de salida de lectura en labview.

Fuente: Autor.

Anexo N° 4. Programación de Arduino.

```

#include <analogShield.h>

long readNumber = 1;

void setup() {

    // put your setup code here, to run once:

    Serial.begin(9600);}

void loop() {

    if ( Serial.available() ){

        // cast the string read in an integer

        readNumber = Serial.parseInt();

        char *p, a[9], b[9], cadena[] = "DACSET ";

        int n;

        p = &cadena[0];

        n = 0;while(isalpha(*p))
    
```

```

    a[n++] = *p++;
a[n] = '\0';
n = 0;
while(isdigit(*p))
    b[n++] = *p++;
b[n] = '\0'; }
analog.write(0,readNumber);

String stringuno=String(analog.read(0),DEC);
String stringdos=String(analog.read(1),DEC);
String stringuno1=String("A" + stringuno);
String stringdos2=String("B" + stringdos);
String stringtodo=String(stringuno1 + stringdos2);
Serial.print(stringtodo);
delay(100);}

void interpret_command() {
    if (received_data_length == 7 && strncmp(received_data,"CELL ON",7) == 0)
        command_cell_on();
    else if (received_data_length == 8 && strncmp(received_data,"CELL OFF",8) == 0)
        command_cell_off();
    else if (received_data_length == 14 && strncmp(received_data,"POTENTIOSTATIC",14)
== 0)
        command_mode_potentiostatic();
    else if (received_data_length == 13 && strncmp(received_data,"GALVANOSTATIC",13)
== 0)
        command_mode_galvanostatic();
    else if (received_data_length == 7 && strncmp(received_data,"RANGE 1",7) == 0)
        command_range1();

```

```

else if (received_data_length == 7 && strncmp(received_data,"RANGE 2",7) == 0)
    command_range2();

else if (received_data_length == 7 && strncmp(received_data,"RANGE 3",7) == 0)
    command_range3();

else if (received_data_length == 7 && strncmp(received_data,"RANGE 4",7) == 0)
    command_range4();

else if (received_data_length == 9 && strncmp(received_data,"DACSET ",7) == 0)
    command_set_dac(received_data[7],received_data[8]);

else if (received_data_length == 9 && strncmp(received_data,"ADCCONF ",8) == 0)
    command_config_adc(received_data[8]);

else if (received_data_length == 8 && strncmp(received_data,"ADCREAD3",8) == 0)
    command_read_adc_3bytes();

else if (received_data_length == 8 && strncmp(received_data,"ADCREAD4",8) == 0)
    command_read_adc_4bytes();

else
    command_unknown();
}

```

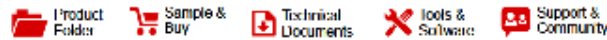
Especificaciones tarjeta Analog Shield.

Tabla 12 características Analog Shield

| ESPECIFICACIONES FÍSICAS ANALOG SHIELD |
|--|
| 4 canales ADC de resolución 16 bits (-5V a 5V) |
| 4 canales DAC de resolución 16 bits (-5V a 5V) |
| Fuente fija 5 V regulada por el integrado TPS61093 |
| Compatible con la placa Arduino |

Fuente: (Esposito, 2014)

Anexo N° 6. Hoja de datos LMP7721



LMP7721

SNOSAW9F – JANUARY 2006 – REVISED DECEMBER 2014

LMP7721 3-Femtoampere Input Bias Current Precision Amplifier

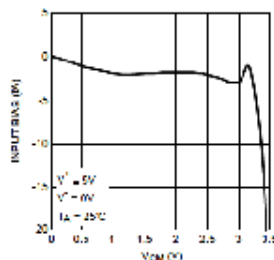
1 Features

- Unless Otherwise Noted, Typical Values at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 5\text{ V}$.
- Input Bias Current ($V_{CM} = 1\text{ V}$)
 - Maximum at $25^\circ\text{C} \pm 20\text{ fA}$
 - Maximum at $85^\circ\text{C} \pm 900\text{ fA}$
- Offset Voltage $\pm 26\ \mu\text{V}$
- Offset Voltage Drift $-1.5\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- DC Open-Loop Gain 120 dB
- DC CMRR 100 dB
- Input Voltage Noise (at $f = 1\text{ kHz}$) $6.5\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- IHD 0.0007%
- Supply Current 1.3 mA
- GBW 17 MHz
- Slew Rate (Falling Edge) 12.76 V/ μs
- Supply Voltage 1.8 V to 5.5 V
- Operating Temperature Range -40°C to 125°C
- 8-Pin SOIC

2 Applications

- Photodiode Amplifier
- High Impedance Sensor Amplifier
- Ion Chamber Amplifier
- Electrometer Amplifier
- pH Electrode Amplifier
- Transimpedance Amplifier

Ultra-Low Input Bias Current



3 Description

The LMP7721 is the industry's lowest specified input bias current precision amplifier. The ultra-low input bias current is 3 fA, with a specified limit of $\pm 20\text{ fA}$ at 25°C and $\pm 900\text{ fA}$ at 85°C . This is achieved with the latest patent-pending technology of input bias current cancellation amplifier circuitry. This technology also maintains the ultra-low input bias current over the entire input common-mode voltage range of the amplifier.

Other outstanding features, such as low voltage noise ($6.5\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$), low DC-offset voltage ($\pm 150\ \mu\text{V}$ maximum at 25°C) and low-offset voltage temperature coefficient ($-1.5\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$), improve system sensitivity and accuracy in high-precision applications. With a supply voltage range of 1.8 V to 5.5 V, the LMP7721 is the ideal choice for battery-operated, portable applications. The LMP7721 is part of the LMP™ precision amplifier family.

As part of Texas Instruments' PowerWise™ products, the LMP7721 provides the remarkably wide-gain bandwidth product (GBW) of 17 MHz while consuming only 1.3 mA of current. This wide GBW along with the high open-loop gain of 120 dB enables accurate signal conditioning. With these specifications, the LMP7721 has the performance to excel in a wide variety of applications such as electrochemical cell amplifiers and sensor interface circuits.

The LMP7721 is offered in an 8-pin SOIC package with a special pinout that isolates the amplifier's input from the power supply and output pins. With proper board layout techniques, the unique pinout of the LMP7721 will prevent PCB leakage current from reaching the input pins. Thus system error will be further reduced.

Device Information⁽¹⁾

| PART NUMBER | PACKAGE | BODY SIZE (NOM) |
|-------------|----------|-------------------|
| LMP7721 | SOIC (8) | 4.90 mm × 1.90 mm |

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers: [PRODUCTION DATA](#)

Figura: 36 Data sheet LMP7721.

Fuente: Data sheet LMP7721

AD5241/AD5242

FEATURES

- 256 Positions
- 10 kΩ, 100 kΩ, 1 MΩ
- Low Tempo 30 ppm/°C
- Internal Power ON Midscale Preset
- Single-Supply 2.7 V to 5.5 V or
Dual-Supply ±2.7 V for AC or Bipolar Operation
- I²C Compatible Interface with Readback Capability
- Extra Programmable Logic Outputs
- Self-Contained Shutdown Feature
- Extended Temperature Range -40°C to +105°C

APPLICATIONS

- Multimedia, Video, and Audio Communications
- Mechanical Potentiometer Replacement
- Instrumentation: Gain, Offset Adjustment
- Programmable Voltage-to-Current Conversion
- Line Impedance Matching

GENERAL DESCRIPTION

The AD5241/AD5242 provide a single-/dual-channel, 256-position, digitally controlled variable resistor (VR) device. These devices perform the same electronic adjustment function as a potentiometer, trimmer, or variable resistor. Each VR offers a completely programmable value of resistance between the A Terminal and the wiper, or the B Terminal and the wiper. For AD5242, the fixed A-to-B terminal resistance of 10 kΩ, 100 kΩ, or 1 MΩ has a 1% channel-to-channel matching tolerance. The nominal temperature coefficient of both parts is 30 ppm/°C.

Wiper position programming defaults to midscale at system power ON. Once powered, the VR wiper position is programmed by an I²C compatible 2-wire serial data interface. Both parts have available two extra programmable logic outputs that enable users to drive digital loads, logic gates, LED drivers, and analog switches in their system.

The AD5241/AD5242 are available in surface-mount (SOIC-14/16) packages and, for ultracompact solutions, TSSOP-14/16 packages. All parts are guaranteed to operate over the extended temperature range of -40°C to +105°C. For 3-wire, SPI compatible interface applications, please refer to AD5200, AD5201, AD5203, AD5204, AD5206, AD5231*, AD5232*, AD5235*, AD7376, AD8400, AD8402, and AD8403 products.

*Nonvolatile digital potentiometer
I²C is a registered trademark of Philips Corporation.

REV. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

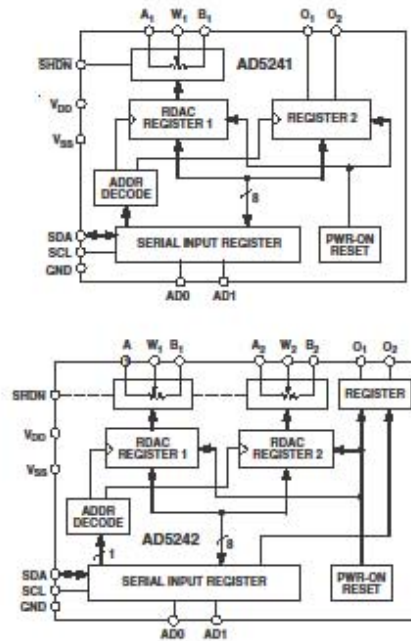


Figura: 37 data sheet AD5241

