

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE BIPOTENCIOSTATO-
GALVANOSTATO**

**PEDRO JOSÉ CORREA CAICEDO
ERNESTO SÁNCHEZ CÉSPEDES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2015**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE BIPOTENCIOSTATO-
GALVANOSTATO**

**PEDRO JOSÉ CORREA CAICEDO
ERNESTO SÁNCHEZ CÉSPEDES**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

**JAIME GUILLERMO BARRERO PEREZ
Magíster en Potencia Eléctrica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	15
1. EL TEMA QUE SE ABORDA.....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. SELECCIÓN DEL CONTROLADOR DEL INSTRUMENTO	19
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR.....	19
2.1.1 Protocolo “Serial Peripheral Interface” (SPI).....	19
2.1.2 Protocolo de comunicación “Universal Asynchronous Receiver-Transmitter” (UART).....	21
2.1.3 Cantidad de pines del micro controlador.....	22
2.1.4 Entorno de programación.....	23
2.2 CONTROLADOR DEL SISTEMA	23
2.2.1 Stellaris Launchpad LM4F120H5QR.	23
3. SISTEMA DIGITAL Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	25
3.1 FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO	25
3.2 GENERACIÓN DE SEÑAL	26
3.2.1 Conversor DAC8831	27
3.3 ADQUISICIÓN DE SEÑAL.....	30
3.4 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL	30
3.5 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO DEL SISTEMA DIGITAL	32
3.5.1 Componentes de la tarjeta.	33
Tabla 1. Componentes de la tarjeta del sistema digital.....	33

3.5.2 Elementos discretos. En la Tabla 2 se muestran las principales características de los elementos discretos utilizados en la PCB del sistema digital.	34
4. DISEÑO DEL SISTEMA ANALÓGICO	36
4.1 CIRCUITO POTENCIOSTÁTICO	36
4.1.1 electrómetro.	37
4.1.2 Amplificador de control.	38
4.1.3 Amplificador de transimpedancia	39
4.2 CIRCUITO GALVANOSTÁTICO	40
4.3 CELDA ELECTROQUÍMICA O “CELDA <i>DUMMY</i> ”	43
4.3.1 Diseño de la celda electroquímica.	46
4.4 INTERRUPTORES ANALÓGICOS	48
4.4.1 Interruptor ADG1413.	48
4.4.2 Interruptor ADG1419.	49
4.5 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO DEL SISTEMA ANALÓGICO	49
4.5.1 Componentes de la tarjeta.	52
4.5.2 Elementos discretos	53
4.5.3 Alimentación del instrumento.	54
5. CARACTERIZACIÓN DEL INSTRUMENTO	56
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DIGITAL	57
5.1.1 Generación de señal.	57
5.1.2 Acondicionamiento de señal	60
5.1.3 Adquisición de señal	61
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ANALÓGICO	63
5.2.1 Escalas de medición de corriente	63
5.2.2 Escalas de generación de corriente	65
5.2.3 Alimentación del instrumento.	66
6. INTERFAZ GRÁFICA Y PROGRAMACIÓN DEL MICRO CONTROLADOR	69
6.1 INTERFAZ GRÁFICA EN <i>LABVIEW</i>	69
6.1.1 Diseño de la interfaz	70

6.1.2 Lógica de operación de la interfaz	73
6.2 PROGRAMACIÓN DEL MICRO CONTROLADOR	75
6.3 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO	78
7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	81
8. RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	87

LISTA DE FIGURA

	Pág.
Figura 1. Esquema del protocolo SPI de un maestro con múltiples esclavos.	20
Figura 2. Esquema de funcionamiento del protocolo Serial UART	22
Figura 3. Diagrama descriptivo del funcionamiento del sistema.	25
Figura 4. Diagrama de conexión del conversor DAC8831	27
Figura 5. Diagrama de tiempos del DAC8831	28
Figura 6. Conversión del DAC8831	29
Figura 7. Circuito de Acondicionamiento para la adquisición de señal	31
Figura 8. Resultados de simulación del Acondicionamiento de señal.....	32
Figura 9. Esquema básico del Potenciostato	37
Figura 10. Esquema básico del circuito galvanostático	41
Figura 11. Esquema de funcionamiento de la celda electroquímica	43
Figura 12. Modelo Básico de la celda electroquímica de tres electrodos	44
Figura 13. Modelo eléctrico de la “Celda Dummy”	45
Figura 14. Esquema de la Celda electroquímica de <i>Devanathan-Stachurski</i>	46
Figura 15. Diseño de la celda electroquímica	46
Figura 16. Diseño eléctrico de la <i>Doble celda DUMMY</i>	48
Figura 17. Esquemático de la tarjeta analógica	50
Figura 18. Cables para la conexión de la celda electroquímica	51
Figura 19. Curva característica de los DAC8831	58
Figura 20. Oscilaciones indeseadas en los DAC8831	59
Figura 21. Salida de los DAC8831 con carga.	60
Figura 22. Prueba del Acondicionamiento de Señal con generador de señales	60
Figura 23. Gráfica del comportamiento de los ADC del μC	62

Figura 24. Escalera generada por el DAC	63
Figura 25. Tensión de alimentación de 12[V].....	66
Figura 26. Tensión de alimentación de 5[V].....	67
Figura 27. Tensión de alimentación de 3,3[V].....	67
Figura 28. Ventana de configuración para el Potenciostato.....	71
Figura 29. Diagrama de flujo de la rutina de la interfaz gráfica para el potenciostato	74
Figura 30. Diagrama de flujo de la programación del μ C.....	77
Figura 31. Gráfica en LabVIEW de la prueba estática.	79
Figura 32. Gráfica en <i>LabVIEW</i> de la prueba Dinámica.	80

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Componentes de la tarjeta del sistema digital.....	33
Tabla 2. Elementos discretos del sistema digital	35
Tabla 3. Elementos discretos para la celda electroquímica.	47
Tabla 4. Componentes de la Tarjeta analógica	52
Tabla 5. Elementos discretos de la tarjeta analógica.....	53
Tabla 6. Características de los interruptores analógicos	54
Tabla 7. Componentes para la alimentación del instrumento	55
Tabla 8. Caracterización de las escalas de medición de corriente	64
Tabla 9. Caracterización de la generación de corriente.....	65
Tabla 10. Códigos ASCII para el control del Equipo	72

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Selección del microcontrolador	87
ANEXO B. Selección del conversor digital/analógico	89
ANEXO C. Acople de la Stellaris Launchpad.....	90
ANEXO D. Resultados caracterización del equipo	93
ANEXO E. Manual de la interfaz para el usuario	98
ANEXO F. <i>LAYOUT</i> de las tarjetas diseñadas	103
ANEXO G. Diagramas de flujo para la programación del μ C.....	108

RESUMEN

TITULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE BIPOTENCIOSTATO-GALVANOSTATO.*

AUTORES: Pedro José Correa Caicedo**
Ernesto Sánchez Céspedes

PALABRAS CLAVE: Bipotenciostato, Galvanostato, Microcontrolador, SCADA.

DESCRIPCIÓN:

Los equipos disponibles en el laboratorio de metalúrgica (de la Universidad Industrial de Santander) para la caracterización y medición de los parámetros de corrosión de los materiales son costosos y los procedimientos para su mantenimiento y reparación elevan su precio; es por eso, que nace la necesidad de implementar un prototipo de bajo costo con el que se realicen las mismas pruebas y se le pueda entregar a un estudiante de pregrado de metalúrgica para que aprenda las diferentes técnicas electroquímicas propias de su carrera sin que los posibles daños del equipo le acarreen a la escuela o al estudiante una elevada suma de dinero.

Se presenta un prototipo de Bipotenciostato/Galvanostato controlado a través de una plataforma de monitoreo tipo SCADA diseñada en *LabVIEW* que es capaz de enviar ordenes hacia un microcontrolador para realizar pruebas electroquímicas.

La selección de componentes, como amplificadores operacionales de precisión, con bajas tensiones de *offset* (Voffset) y corrientes de polarización (IBias) que componen el circuito Potenciostático y Galvanostático; elementos discretos de baja tolerancia que no distorsionen las señales e interruptores analógicos que realicen el cambio de escalas de corriente y el modo de operación, permite desarrollar un equipo del cual se pueden obtener datos repetibles y confiables de las pruebas realizadas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MPE. Jaime Guillermo Barrero Pérez.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A PROTOTYPE OF BIPOTENTIOSTAT/GALVANOSTAT*

AUTHORS: Pedro José Correa Caicedo**
Ernesto Sánchez Céspedes

KEY WORDS: Bipotentiostat, Galvanostat, Microcontroller, SCADA.

DESCRIPTION:

The available equipment at the metallurgical laboratory (of the Universidad Industrial de Santander) for characterization and measurement of corrosion parameters in materials is expensive and so are its maintenance procedures and repairs. As an alternative, a low cost prototype of this equipment was build; this prototype is useful and convenient for colleges and their students since undergraduate students can learn how to do different electrochemical tests (that are commonly use in Metallurgical Engineering) in it without worrying about possible damages to the equipment and the related cost of repair.

In this degree work, a potentiostat/galvanostat prototype is developed. It is controlled and monitored using a SCADA platform designed in LabVIEW, and it is able to do electrochemical tests by giving instructions to a microcontroller.

Furthermore, the data obtained with this prototype can be replicated and is reliable thanks to the fact that the prototype was build using precision operational amplifiers with low offset voltage (Voffset) and bias current (IBias); discrete elements of low tolerance to avoid signal distortion, and analog switches to set the current scale and operation mode.

* Grade work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: MPE. Guillermo Barrero Jaime Perez.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la sociedad humana tiene un crecimiento económico, social e industrial cada vez más acelerado gracias al desarrollo de nuevas tecnologías y el mejoramiento de los procesos existentes. Este panorama presenta, para la misión de los centros de estudio e investigación, el reto de estar a la vanguardia de estos avances.

Uno de los principales enfoques de la industria, en la actualidad, es la optimización de recursos, de gastos y de tiempo por lo que se desarrollan tanto técnicas como instrumentos cada vez más complejos y robustos para el monitoreo y control de las diferentes variables que contribuyen al deterioro de la mayoría de procesos del desarrollo humano.

Una de estas variables es la corrosión, que está presente en toda la industria y que fundamentalmente puede describirse como el deterioro de un material por las diferentes reacciones químicas o electroquímicas que surgen del medio que lo rodea. Para los estudios electroquímicos se han desarrollado equipos como los potenciostatos con los que, mediante tensión, se excita una celda electroquímica preparada con una solución llamada “Electrolito” y una muestra del material que se desea caracterizar para obtener sus parámetros de corrosión midiendo el flujo de corriente que pasa por la misma. También existen los Galvanostatos que básicamente hacen lo mismo que un potenciostato pero la variable de control es la corriente.

Estos instrumentos pueden ser tan complejos como lo requiera la aplicación en la que se usen. En este proyecto se muestra, el diseño de un Bipotenciostato/Galvanostato funcional que puede ser controlado a través de una

plataforma estructurada en *LabVIEW* desde un computador personal (PC), basados en los diseños previos que han tenido lugar en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

1. EL TEMA QUE SE ABORDA

Desde el laboratorio de corrosión de la escuela de metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander nace la necesidad de implementar un Bipotenciostato Galvanostato de bajo costo para ser usado por los estudiantes de dicho laboratorio y que cumpla con los requerimientos en tensión de $-1,2[V]$ a $1,2[V]$, que maneje cuatro estapas de corriente $\pm 2[mA]$, $\pm 200[\mu A]$, $\pm 20[\mu A]$, $\pm 2[\mu A]$, y que sea controlado por el usuario mediante una plataforma desde un computador personal.

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseño y caracterización de un Bipotenciostato-Galvanostato de precisión.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

En cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende

- Realizar un prototipo de un Bipotenciostato-Galvanostato garantizando la optimización del espacio en el circuito impreso (PCB) y los costos, mediante la utilización de los componentes adecuados para su fabricación, Tomando como base un diseño previamente realizado por un estudiante de maestría de la E3T [3].

- Desarrollar una plataforma para el control y monitorización del instrumento mediante un entorno de desarrollo de tipo SCADA, más concretamente en *Labview*.
- Controlar el prototipo desde un sistema digital basado en Microcontrolador programable con lenguaje de alto nivel (lenguaje C), con capacidad de almacenamiento y comunicación con un computador personal.
- Realizar pruebas al prototipo para comprobar su funcionamiento.

2. SELECCIÓN DEL CONTROLADOR DEL INSTRUMENTO

En el mercado actual existen diversas familias de Micro Controladores (μC) que poseen muchas características especiales que pueden resultar ventajosas dependiendo de la aplicación, por eso, se hace necesario evaluar cada una para encontrar cuál de estos controladores le ofrece el mayor beneficio a la aplicación que se desarrolla en este documento.

En este capítulo se desglosan todas las propiedades que debe tener el μC para poner en funcionamiento el Bipotenciostato - Galvanostato y establecer un criterio de selección para encontrar el controlador que otorgue al instrumento un óptimo funcionamiento.

2.1 CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR

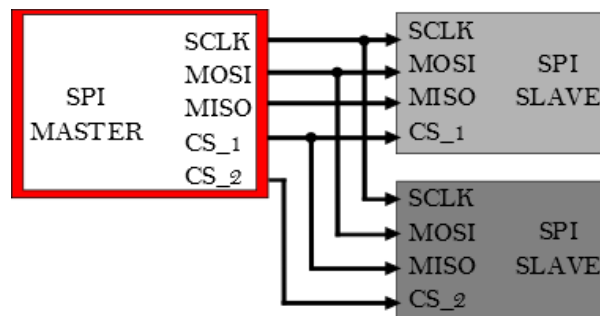
Debido a la amplia gama de μC que ofrece el mercado y a que la aplicación desarrollada brinda una solución específica se hace necesaria una selección rigurosa de este dispositivo. Principalmente se busca que el μC contenga las siguientes propiedades fundamentales para conseguir el correcto funcionamiento de instrumento.

2.1.1 Protocolo “Serial Peripheral Interface” (SPI). Como se requiere almacenar datos en una memoria micro SD (μSD) y usar un Conversor Digital - Analógico (DAC por sus siglas en inglés) externo se hace necesario contar con mínimo un bloque SPI para controlarlos.

Generalmente existe un dispositivo maestro, en este caso el μC , y es quien produce la sincronía de la comunicación mediante una señal de reloj. Este reloj es generado en un hilo independiente del sistema y es el maestro quien lo presenta en el canal de comunicación. Los demás dispositivos del sistema actúan como esclavos de la comunicación y son activados mediante una señal de selección que asigna el μC .

En los sistemas seriales sincrónicos para la interconexión de periféricos, se manejan distancias cortas, un solo maestro y múltiples esclavos, las tramas de comunicación son de variada presentación y algunas sólo involucran la carga útil, sin adicionar *bits* que permitan el entendimiento (*handshaking*) entre esclavos y maestro. Para estos protocolos deberá existir una línea tanto para el dato saliente (Tx)D) como para el dato entrante (Rx)D), así como la posibilidad de hacer comunicación simultánea y bidireccional (*Full Duplex*)

Figura 1. Esquema del protocolo SPI de un maestro con múltiples esclavos.



Fuente: InKscape es un software libre de diseño gráfico. (No requiere licencia y es gratuito)

En la Figura 1 se puede observar un diagrama de bloques correspondiente a una conexión SPI en donde trabajan un maestro y dos esclavos. En ellas se hacen evidentes las siguientes líneas de trabajo:

MOSI: (Del inglés, *Master Output Slave Input*) este pin se utiliza para enviar datos del maestro a los esclavos en cada flanco del reloj.

MISO: (Del inglés, *Master Input Slave Output*) la función de este pin es transportar los datos de los esclavos hacia el maestro.

SCLK: pin destinado para enviar desde el maestro la señal de reloj del protocolo de comunicación.

CS: (*Del Inglés, Chip Selector*) pin utilizado para la activación de los esclavos. Este pin por lo general se utiliza activo bajo.

2.1.2 Protocolo de comunicación “Universal Asynchronous Receiver-Transmitter” (UART). Es necesario que el μC posea un bloque UART debido a que la comunicación con el computador se realiza a través de él y un integrado que convierte de UART a comunicación USB (*Universal Serial Bus*), lo que posibilita el acceso a la interface diseñada en *LabVIEW*.

El protocolo UART consiste en un bloque *hardware* que viene incluido en algunos procesadores como los μC y es utilizado para llevar datos al exterior de dicho procesador en forma serial o paralela según como se requiera. Ver Figura 2.

Figura 2. Esquema de funcionamiento del protocolo Serial UART

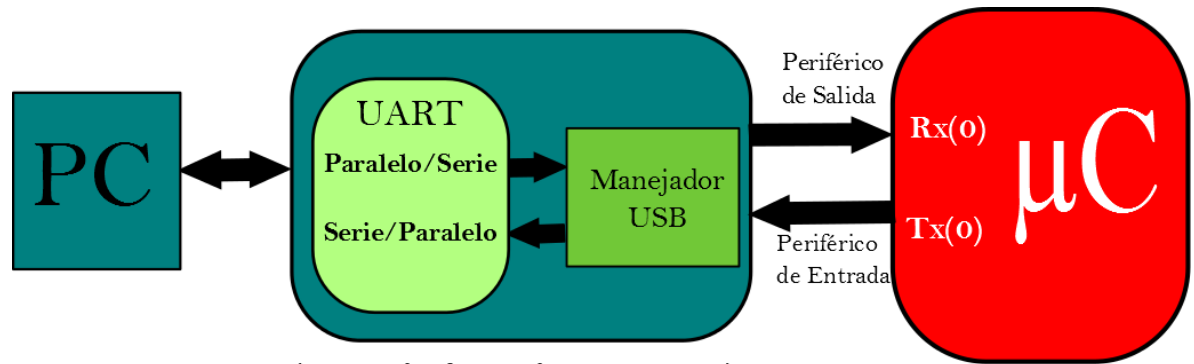


Diagrama de Bloques de Un puerto serie USB
con el uso del protocolo UART

Fuente: Inkscape es un software libre de diseño gráfico. (No requiere licencia y es gratuito)

2.1.3 Cantidad de pines del micro controlador. El número de pines también es un aspecto importante a tener en cuenta al escoger el μC para usar en esta aplicación, ya que para la implementación del dispositivo es necesario contar con múltiples escalas y modos de operación, por lo que se deben tener circuitos de interruptores analógicos que se conmutan mediante señales digitales, los cuales necesitan múltiples líneas de control (un pin del μC por cada una).

Para estos interruptores se deben tener 14 pines digitales libres. Además, hay que sumar los pines que ocupa el bloque SPI, algunos pines de propósito general para la implementación de *Leds* que indiquen al usuario como está operando el dispositivo y los pertenecientes al bloque UART; sumando un aproximado 40.

Otro aspecto importante para la selección del μC es que debe soportar palabras de al menos 16 [bits] ya que el DAC necesita en la entrada SDI [1] tramas de este tamaño. También es importante que los Conversores Análogos Digitales (ADC por sus siglas en inglés) del μC cuenten con la mayor resolución posible para garantizar una buena precisión en la adquisición de las señales.

2.1.4 Entorno de programación. Un aspecto importante cuando se implementa un algoritmo en un μC , es qué tan complejo resulta llevar dicha secuencia a una rutina de computo. La mayoría de μC 's en el mercado soportan lenguaje C, que es un lenguaje de alto nivel semejante a la forma en que se dan las comunicaciones humanas, haciéndolo más intuitivo y en este aspecto radican las facilidades en los entornos de programación.

2.2 CONTROLADOR DEL SISTEMA

En el anexo A se plantean las ventajas y desventajas que pueden presentar los diferentes μC 's ofrecidos en el mercado local. Teniendo en cuenta las características mencionadas anteriormente y el análisis presentado en el anexo A se seleccionó el controlador que mejor se ajusta a la aplicación desarrollada, la tarjeta de desarrollo de *Texas Instruments, Stellaris Launchpad LM4F120H5QR*.

2.2.1 Stellaris Launchpad LM4F120H5QR. Dicho lo anterior se infiere que la mejor opción para la elaboración del Bipotenciostato-Galvanostato es la tarjeta *Stellaris Launchpad LM4F120H5QR* la cual cuenta con un circuito para la comunicación USB, una PCB con la distribución de pines necesaria para acceder a todos los bloques del μC , además, esta tarjeta puede programarse a través del *software* llamado *Energía IDE* que es un programa Multiplataforma, desarrollado en paralelo a *Arduino IDE*, para controladores de Texas Instruments, el cual es de código abierto y no necesita licencia; la mejor característica es su precio, ya que se tienen todas sus ventajas por solo 12.99 dólares.

Uno de los atributos que más llama la atención de esta tarjeta es que mediante la plataforma *Energía IDE* se tiene una amplia gama de librerías y *sketchs* elaborados y compartidos libremente por los propios desarrolladores y la

comunidad virtual *Stellarisiti: ARM Stellaris Community*¹. Específicamente, fue de gran importancia encontrar la aplicación para manejar una memoria SD mediante protocolo SPI, lo que facilitó su uso en menos tiempo y con menos líneas de código. También fue necesario modificar algunas de estas librerías para acomodarlas a los requerimientos del proyecto.

Las tareas que tendrá que realizar este μ C son: Primero, la generación de la señal que debe excitar el circuito analógico del Potenciostato-Galvanostato, la tarjeta puede generar un barrido digital de 0x000 a 0xFFFF (en Hexadecimal) es decir 0[V] a 3,3[V] respectivamente en analógico, como el μ C no entrega las tensiones analógicas hay que pasar este barrido digital por los conversores DAC8831; Segundo, la adquisición de las señales mediante los conversores Análogo-Digitales que posee el μ C que son de 12 [bits] y unipolares. En tercer lugar, se deben manejar algunos periféricos como la memoria SD y la comunicación vía USB con *LabVIEW*, por último la *Stellaris Launchpad* debe entregar 14 señales digitales que servirán para manejar los interruptores que controlan los modos del instrumento y las escalas de trabajo.

¹ Para acceder a este blog ir al enlace, www.stellarisiti.com

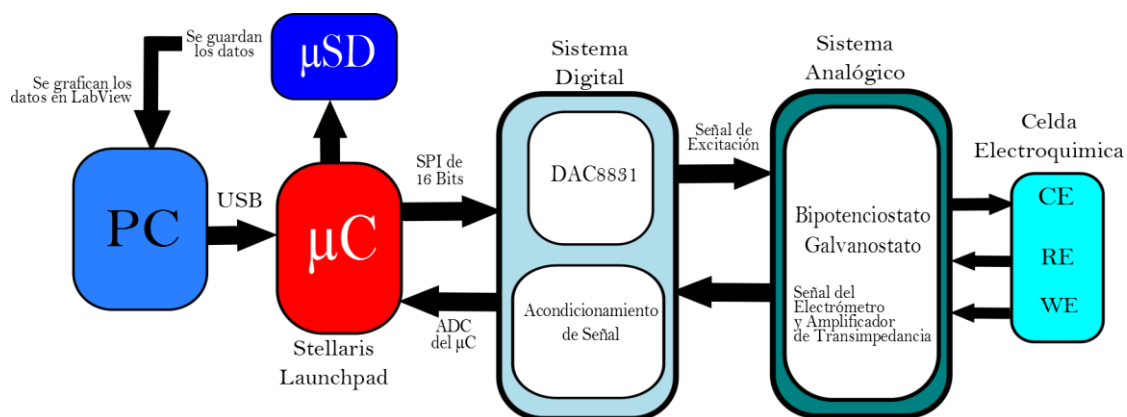
3. SISTEMA DIGITAL Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

La generación y adquisición de señales es una de las funciones más importantes que debe realizar el μC dentro del instrumento de medición, para lograr esto es necesario controlar conversores como el DAC8831 y diseñar un circuito de acondicionamiento de señal ya que las señales que recorrerán el Potenciostato-Galvanostato son bipolares y el μC trabaja rangos unipolares. En este capítulo se explica cómo se abordó este tema.

3.1 FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO

Como se muestra en la Figura 3, se identifican tres principales etapas en el funcionamiento general del instrumento.

Figura 3. Diagrama descriptivo del funcionamiento del sistema.



Fuente: InKscape es un software libre de diseño gráfico. (No requiere licencia y es gratuito)

- a) En primer lugar, mediante la plataforma desarrollada en *LabVIEW* se dan las instrucciones del tipo de prueba a hacer, las escalas de corriente y tensión con

la que se va a trabajar y la forma en que se operarán los datos adquiridos para graficar, todas estas instrucciones se dirigen hacia el micro controlador a través del puerto USB y se almacenan en variables.

- b)** Una vez guardadas las directrices de las pruebas dentro del μC , éste se encarga de enviar los respectivos códigos binarios que llegarán a los DAC para generar las señales analógicas que alimentarán las entradas de los circuitos Potenciostático y Galvanostático. Además, las señales se deben llevar a un circuito de acondicionamiento que las hace pasar de Bipolares a Unipolares en la medición para que los conversores ADC del μC puedan leerlas.
- c)** Luego de que la celda electroquímica sea estimulada con las señales de corriente o tensión provenientes del Galvanostato y del circuito de control del Potenciostato, se miden los resultados de las pruebas mediante el Electrómetro y amplificador de Transimpedancia, para finalmente llevar las señales resultantes hacia el circuito de acondicionamiento y el μC . Por último los datos generados en cada prueba se guardarán en la memoria μSD para realizar su posterior análisis en *LabVIEW*.

3.2 GENERACIÓN DE SEÑAL

Debido a que el μC no puede generar señales analógicas de amplitud variable fue necesario usar un conversor Digital-Analógico externo para realizar la tarea de entregar las señales con las que se excitarán las celdas electroquímicas, en el Anexo B se compararon algunos conversores que podrían servir para la aplicación y se seleccionó el DAC8831 como el que más se ajusta a las necesidades del proyecto.

3.2.1 Conversor DAC8831. El DAC8831 se comunica con el μC mediante el protocolo SPI, y debe recibir 16 flancos de reloj si interrupción para realizar una conversión debido a que es un conversor de 16 [bits]. En la Figura 4 se observa el diagrama de conexión del conversor en modo Bipolar².

Figura 4. Diagrama de conexión del conversor DAC8831

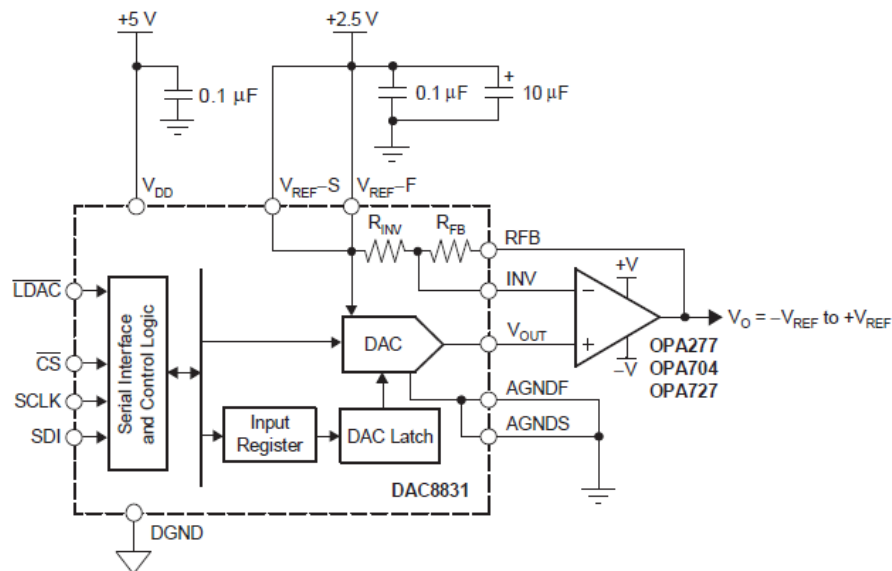


Figure 47. Bipolar Output Mode of DAC8831

Fuente: Hoja de datos del fabricante

El funcionamiento básico del conversor consiste en enviar a través del pin MOSI del controlador hacia la entrada SDI del DAC los 16 [bits] que contienen el número digital que representa la tensión analógica que se quiere obtener; Es importante que el *Chip Selector* (CS) se mantenga en bajo durante la transmisión de los 16 [bits] para su correcto funcionamiento. A continuación en la Figura 5 se presenta el diagrama de tiempos del DAC8831 tomado de la hoja de datos del fabricante [1].

² Bipolar: Que maneja señales positivas y negativas

Figura 5. Diagrama de tiempos del DAC8831

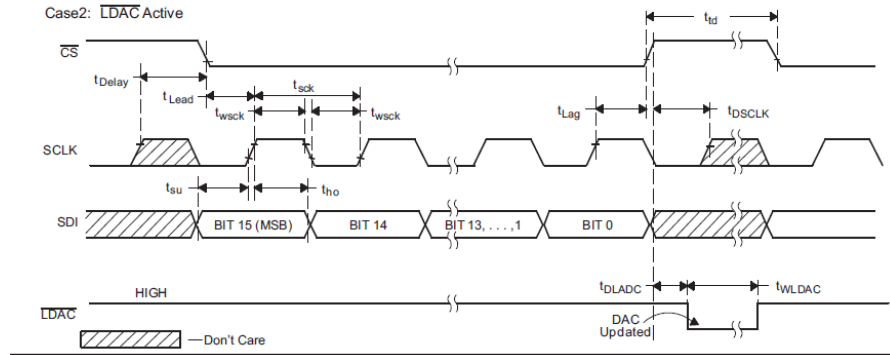


Figure 2. DAC8831 Timing Diagram

Fuente: Hoja de datos del fabricante

Debido a que los bloques SPI programados en las librerías de *Energía IDE* trabajan con señales de 8 [bits] fue necesario acceder a los códigos fuente de dichas librerías para modificarlas y conseguir que al menos uno de estos bloques opere con señales de 16 [bits] como lo requiere el DAC8831.

Este conversor en particular posee una señal de control, llamada LDAC, que funciona como *reset*, y se encarga de refrescar el registro que guarda el dato a convertir cada vez que se cambia por uno nuevo. Existen dos formas de usar esta señal, la primera es mantenerla siempre en bajo haciendo que el registro del dato se refresque o actualice permanentemente y la segunda es mantenerla en alto y bajarla cuando el SC este en alto (como se muestra en la Figura 5) haciendo que el registro se actualice cada vez que se cambia el dato. Para la aplicación se optó por esta última opción para tener más control sobre las señales.

Figura 6. Conversión del DAC8831

DAC LATCH CONTENTS		ANALOG OUTPUT
MSB	LSB	
1111 1111 1111 1111		$+V_{REF} \times (32,767/32,768)$
1000 0000 0000 0001		$+V_{REF} \times (1/32,768)$
1000 0000 0000 0000		0 V
0111 1111 1111 1111		$-V_{REF} \times (1/32,768)$
0000 0000 0000 0000		$-V_{REF} \times (32,768/32,768) = -V_{REF}$

Fuente: Hoja de datos del fabricante

En la Figura 6 se muestra la relación entre el código binario que se envía al DAC y la tensión analógica que se obtiene. Como se ve, la tensión de referencia V_{REF} es la que determina los valores de tensión resultantes de la conversión; Según reporta la hoja de datos del DAC8831 esta tensión puede ser tan grande como V_{DD} , es decir 5[V]. Para la aplicación se usó la referencia REF5030 que arroja una tensión de 3 [V] estable y precisa, la cual es suficiente para las pruebas que debe realizar el instrumento.

Finalmente el DAC8831 utiliza un operacional, conectado como se muestra en la Figura 4, para obtener tensiones bipolares; Para lograr esto se usó el operacional OPA727 como lo sugiere la hoja de datos del convertor y cuyas características eléctricas se detallan en la Tabla 1. Este operacional maneja señales de ± 6 [V] (máximo) suficiente para la aplicación que se describe en este documento.

3.3 ADQUISICIÓN DE SEÑAL

Para que las señales lleguen al micro controlador y puedan acondicionarse para su posterior análisis se optó por usar para la adquisición de señal los conversores Analógico/Digitales (ADC³) que posee la misma tarjeta *Stellaris Launchpad*.

Los conversores de la tarjeta *Stellaris Launchpad* poseen una resolución de 12 [Bits] y este sistema de desarrollo trabaja a una tensión de 3,3 [V] lo que hace que el tamaño del *Bit* menos significativo (LSB⁴) sea de 805,66 [μV], esta resolución resulta suficiente para las pruebas que debe realizar el equipo desarrollado en este proyecto. La tarjeta *Stellaris Launchpad* trabaja solamente con señales unipolares que van desde 0[V] hasta 3,3[V] y como las señales que se deben medir son bipolares, es necesario colocar una etapa de acondicionamiento para que haga la conversión.

3.4 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

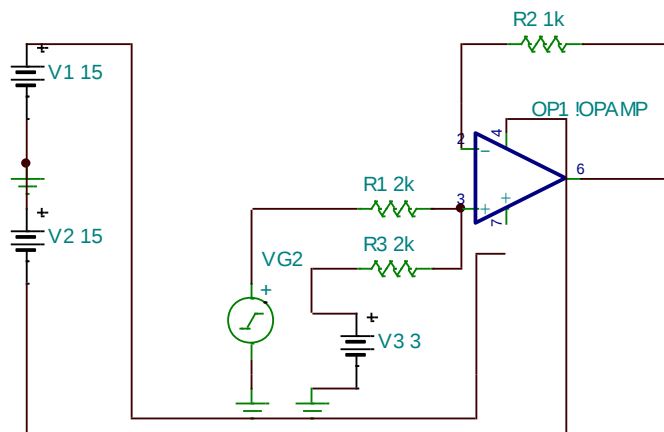
La necesidad de implementar un circuito de acondicionamiento radica en la incompatibilidad de las señales que maneja el sistema analógico, entiéndase potencióstato y galvanostato, y el sistema digital (el μ C y los conversores). Por ello se debe implementar un arreglo de Amplificadores operacionales y elementos discretos que cumplan con la función de tomar una señal bipolar y convertirla en una señal unipolar que pueda llevarse hacia los conversores Analógico-Digitales internos de la tarjeta *Stellaris Launchpad*.

³ Del inglés “Analog/Digital Converter”

⁴ Del Inglés “Least Significant Bit”

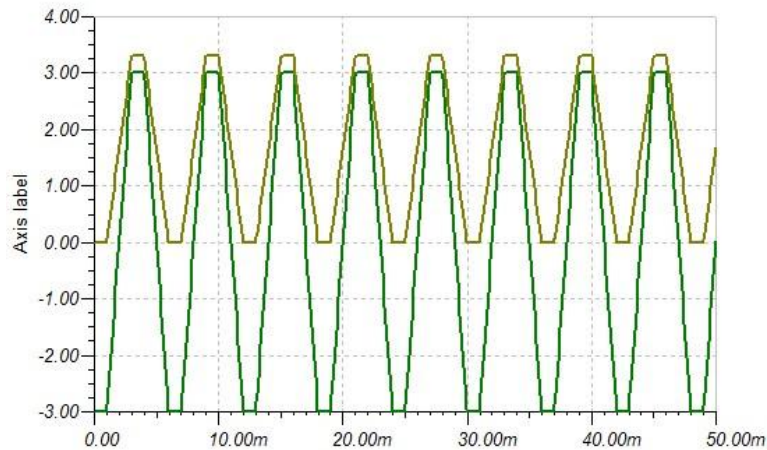
En primer lugar, se parte de una señal bipolar oscilante entre $-3[V]$ y $3[V]$ que viene de los circuitos potencióstático y galvanostático, la cual pasa por un circuito sumador que primero le suma un *offset* de $3[V]$ y luego la reduce a la mitad dando al final una señal que varía entre $0[V]$ y $3[V]$. En la Figura 7 se observa el circuito sumador que cumple este propósito.

Figura 7. Circuito de Acondicionamiento para la adquisición de señal



En la Figura 8 se ve como la señal bipolar (señal Verde) se convierte en unipolar (señal café) después de ser tratada en el circuito sumador y queda lista para ser llevada a los conversores Analógico-Digitales del μC .

Figura 8. Resultados de simulación del Acondicionamiento de señal



El amplificador operacional que se usó en esta parte del circuito es el OPA4140⁵ debido a que posee una tensión de *offset* bastante baja, apenas de 120 [μV], lo que garantiza que no se pierdan muestras en el tratamiento de la señal, además tiene una relación señal a ruido muy baja, de 5,1[nV] y como es necesario aplicar este acondicionamiento a cuatro señales dicho operacional es el ideal porque contiene cuatro canales. Las características eléctricas más relevantes de este operacional se pueden ver en la Tabla 1.

3.5 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO DEL SISTEMA DIGITAL

Se analizaron varias posibilidades para el diseño del circuito impreso de este instrumento y se decidió elaborar tres tarjetas principales, una para el sistema digital, otra para el sistema analógico y una última para el acoplar la tarjeta *Stellaris Launchpad* y la alimentación de todo el instrumento. La principal razón

⁵ Para seleccionar este amplificador operacional se tuvo en cuenta el análisis hecho en la tesis de maestría DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN BIPOTENCIOSTATO DE PRECISIÓN, del ING. Jairo Augusto Cala Rodríguez

para hacerlo de esta manera fue que mediante un desarrollo por módulos o bloques se facilita el monitoreo del funcionamiento de cada etapa e identificación de los posibles problemas que puedan surgir con más rapidez, también ante el posible fallo de algún elemento se simplifica su reemplazo sin afectar el trabajo del resto de etapas del equipo.

En este proyecto se desarrolla un prototipo que está sujeto a cambios y mejoras futuras que lo pueden llevar a un grado más alto de integración. Pero por el momento, se enfocaron todos los esfuerzos en garantizar su funcionamiento y por eso la optimización de espacio y costos en la fabricación del circuito impreso del instrumento se ve reflejada en cada una de las tres tarjetas mencionadas anteriormente. Los bloques que componen esta tarjeta corresponden a la generación de señal y al acondicionamiento de señal,

3.5.1 Componentes de la tarjeta. A continuación, en la Tabla 1, se muestran todos los elementos que componen el circuito impreso del sistema digital con sus principales propiedades eléctricas y aspectos que se tuvieron en cuenta para su uso.

Tabla 1. Componentes de la tarjeta del sistema digital.

Componente	V_n	V_{supply} (Max)	V_{supply} (Min)	V_{offset}	I_{Bias}	Slew Rate (SR)	I_{sc}^6	Empaquetado	Precio(USD/1ku ⁷)
OPA2727	6 [nV/ $\sqrt{Hz}$]	± 6 [V]	$\pm 2,15$ [V]	150 [μ V]	500 [pA]	30 [V/ μ S]	± 55 [mA]	Soic 8	1,20
OPA4140	5,1 [nV/ $\sqrt{Hz}$]	± 18 [V]	$\pm 2,5$ [V]	120 [μ V]	10 [pA]	20 [V/ μ S]	± 35 [mA]	Soic 14	5,70
DAC8831	10 [nV/ $\sqrt{Hz}$]	5 [V]	NP	NP	NP	NP	NP	Soic 14	7,94
REF5030	3 [μ Vpp/V]	NP ⁸	NP	NP	NP	NP	± 55 [mA]	Soic 8	1,65

⁶ Corriente de corto circuito “Short-Circuit Current”

⁷ Precio en dólares por cada mil unidades

⁸ No presenta en su hoja de datos

Se utilizaron dos conversores DAC8831, uno para generar la entrada del Potenciostato/Galvanostato (la cual se llamó EN1 en la PCB) y el otro para la entrada del segundo potenciostato (EN2). El integrado OPA2727 contiene dos amplificadores operacionales que van conectados a la salida de cada uno de los DAC, este operacional debe polarizarse máximo con tensiones de ± 6 [V] para que jamás lleguen tensiones superiores a estas al conversor que puedan dañarlo y como se observa en la Tabla 3 el amplificador operacional OPA4140 puede polarizarse con un rango pequeño ($\pm 2,5$ [V]) sin comprometer su correcto funcionamiento.

Por todo lo anterior se optó por polarizar toda la tarjeta del sistema digital con un rango dinámico de ± 5 [V], además la referencia de tensión REF5030 puede entregar 3[V] precisos con tan solo 5 [V] en la entrada. El amplificador OPA4140 tiene cuatro canales haciéndolo ideal para que haga la tarea de acondicionar las cuatro señales, que deberán leer los conversores ADS de la *Stellaris Launchpad*.

Fue necesario añadir, entre la salida de cada canal del OPA2727 y tierra, resistencias de carga para evitar que la tensión analógica generada por los DAC tuviera oscilaciones indeseadas que pueden dañar el funcionamiento del sistema digital; se hicieron varias pruebas y se encontró que debían tener un valor de 100 [Ω]. En el Anexo F se pueden observar las capturas del diseño de la PCB.

3.5.2 Elementos discretos. En la Tabla 2 se muestran las principales características de los elementos discretos utilizados en la PCB del sistema digital.

Tabla 2. Elementos discretos del sistema digital

Elemento	Valor	Precisión (%)	Empaquetado	Precio (COP)
Resistencia	100 [Ω]	0.1	0805	2000
	1 [K Ω]	0.1	0603	2400
	1 [Meg Ω]	1	0805	1000
	Valor	Tipo	Empaquetado	Precio (COP)
Capacitor	1 [μ F]	cerámico	Inserción	200
	0,1 [μ F]	cerámico	Inserción	200
	10 [μ F]	cerámico	Inserción	300
	22[μ F]	cerámico	Inserción	300

Los capacitores de 1 [μ F] se utilizaron para filtrar el ruido de alta frecuencia presente en los pines de polarización de los amplificadores operacionales; Los valores de los demás capacitores mostrados en la Tabla 4 provienen de las hojas de datos del DAC8831 [1] y la referencia REF5030 [2] para filtrar los ruidos de sus polarizaciones y mantener estables las tensiones de salida de cada uno. Se usaron resistencias de la precisión de 0,1% para el circuito destinado al acondicionamiento de señal para no afectar los datos que arroja la celda electroquímica en cada prueba.

4. DISEÑO DEL SISTEMA ANALÓGICO

En este capítulo se presentan los diferentes bloques que componen el sistema analógico del instrumento, que son: el circuito potencioestático, el circuito galvanostático, los interruptores analógicos y los elementos discretos.

Cabe mencionar que para este sistema también se desarrolló un circuito impreso independiente que facilita el seguimiento de las señales para detectar posibles fallos e inspeccionar las señales por módulos.

4.1 CIRCUITO POTENCIOSTÁTICO

La topología básica del circuito potencioestático [3] se muestra en la Figura 9. En la realización de pruebas electroquímicas se hace uso de este circuito básico cuyas funciones elementales son: primero, controlar la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo (WE⁹) y el electrodo de referencia (RE¹⁰) y segundo, medir la corriente existente entre el electrodo de trabajo (WE) y el contra-electrodo (CE¹¹). Estos instrumentos pueden variar en complejidad y precisión dependiendo de la aplicación para la que se necesiten.

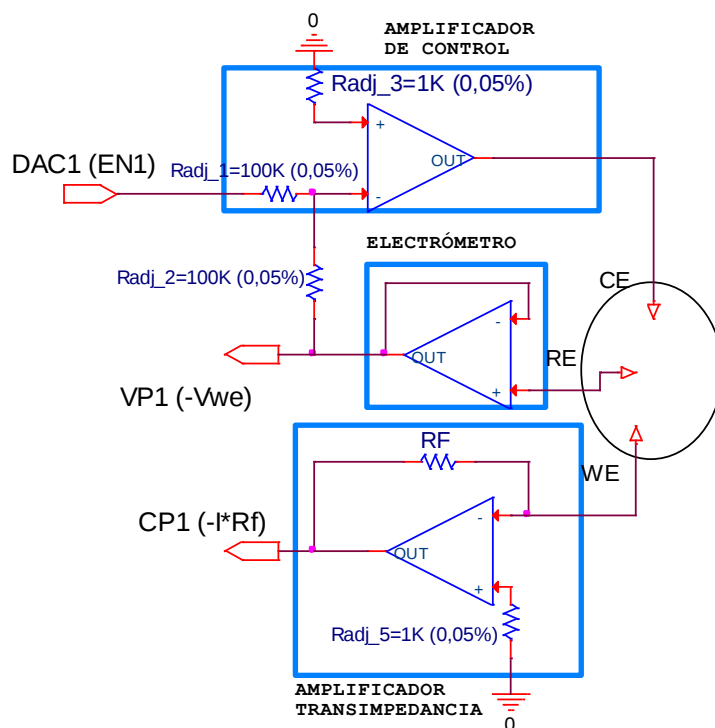
El circuito potencioestático [3] se divide en tres estructuras principales: un electrómetro, un amplificador de control y un amplificador de Trans-impedancia; Cada una de estas cumple una función específica dentro del funcionamiento general del instrumento. A continuación se hace una descripción básica de las mismas.

⁹ acrónimo de “Working Electrode” o Electrodo de Trabajo

¹⁰ acrónimo de “Reference Electrode” o Electrodo de Referencia

¹¹ acrónimo de “Counter Electrode” o Contra Electrodo

Figura 9. Esquema básico del Potenciostato



4.1.1 electrómetro. El electrómetro consiste en un amplificador operacional, conectado como seguidor de tensión o *Buffer*, que cumple la función de censar la tensión presente entre el electrodo de trabajo (WE) y el electrodo de referencia (RE), esta tensión debe ser igual en amplitud pero inversa a la tensión que se inyecta a la celda electroquímica mediante el Contra electrodo (CE).

En las pruebas electroquímicas que debe realizar el instrumento¹² descrito en este documento se manejan barridos de tensión que pueden oscilar entre ± 2 [V] y los

¹² Para entender mejor los conceptos de electroquímica, se recomienda leer la tesis de maestría: DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN BIPOTENCIOSTATO DE PRECISIÓN, de ING. Jairo

cambios dinámicos de tensión están por el orden de los mili-voltios [mV], es por eso que el operacional que cumpla la función del electrómetro debe tener en primer lugar una muy baja recepción de ruido para que no afecte la señal que se quiere medir, bajos niveles de tensión de *offset* y bajas corrientes de polarización (*Bias current*).

4.1.2 Amplificador de control. Esta etapa cumple la función de comparar la tensión que sale del electrómetro con la tensión que el DAC entrega a la celda electroquímica a través del contra electrodo, estas dos tensiones deben ser iguales. Para lograr esto la corriente de entrada al amplificador de control debe ser de cero, así que las resistencias de ajuste *Radj_1* y *Radj_2* que se observan en la Figura 9 deben ser iguales para que no exista diferencia de potencial entre el terminal negativo del amplificador de control y la salida del electrómetro.

Cuando se varía la tensión que sale del DAC, el amplificador de control responde a estos cambios entregándole a la celda electroquímica una variación igual, de tal forma que la salida del electrómetro sea igual a la tensión entregada por el conversor y la corriente entre estos dos operacionales se mantenga en cero.

Dicho lo anterior, el amplificador operacional que realice el control del potencióstato debe tener un *Slew Rate* (velocidad de respuesta) alto para que sea capaz de responder a dichos cambios de tensión, también debe tener características eléctricas similares o iguales a las del amplificador operacional que se desempeña como electrómetro ya que estos dos operacionales deben comparar señales de la misma naturaleza. Como la celda electroquímica tiene comportamiento capacitivo el amplificador operacional de control debe soportar cargas capacitivas.

Augusto Cala Rodríguez y la tesis de pregrado: GENERACION, ADQUISICIÓN Y VISUALIZACION DE SEÑALES PARA UN POTENSIOSTATO DE PRECISIÓN, de Ricardo Adolfo Cañas Mendoza, ya que para el desarrollo del presente proyecto se tomaron como base estas tesis.

4.1.3 Amplificador de transimpedancia. En esta etapa del potencióstato se mide la corriente que circula a través de la celda electroquímica mediante la medición de la tensión del electrodo de trabajo (WE); Como se muestra en la Figura 9, la corriente se determina conociendo la tensión V_{we} y la resistencia de realimentación (R_F ¹³).

Con la variación de la resistencia de realimentación se pueden establecer varios rangos de medición de corriente y para la aplicación que se desarrolla en este documento se manejaron principalmente cuatro. La resistencia R_F puede ser de 1[K Ω], 10[K Ω], 100[K Ω] y 1 [Meg Ω], y teniendo en cuenta que por el diseño del sistema la tensión máxima que puede presentarse en el electrodo de trabajo es de 2 [V], obteniendo corrientes de ± 2 [mA], ± 200 [μ A], ± 20 [μ A] y ± 2 [μ A] respectivamente.

Los amplificadores de transimpedancia tienden a oscilar¹⁴, debido a la existencia de efectos capacitivos por el paso de la corriente en las entradas del amplificador operacional que a altas frecuencias causan estas oscilaciones indeseadas y hacen propender al amplificador de transimpedancia a la inestabilidad.

Para solucionar esto se usa, comúnmente, un condensador C_F para compensar el sistema; Debido a que se cuenta con cuatro escalas de corriente no es posible encontrar un punto óptimo para garantizar la estabilidad. Así que para la obtención del valor de este condensador de acople se hicieron varias pruebas y se encontró que la mejor respuesta del amplificador de transimpedancia a diferentes frecuencias se presenta cuando $C_F = 0,1[\mu F]$.

¹³ Acrónimo de “feedback resistor” o Resistencia de realimentación

¹⁴ Para más detalle se recomienda revisar la tesis de maestría: DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN BIPOTENCIÓSTATO DE PRECISIÓN, de ING. Jairo Augusto Cala Rodríguez

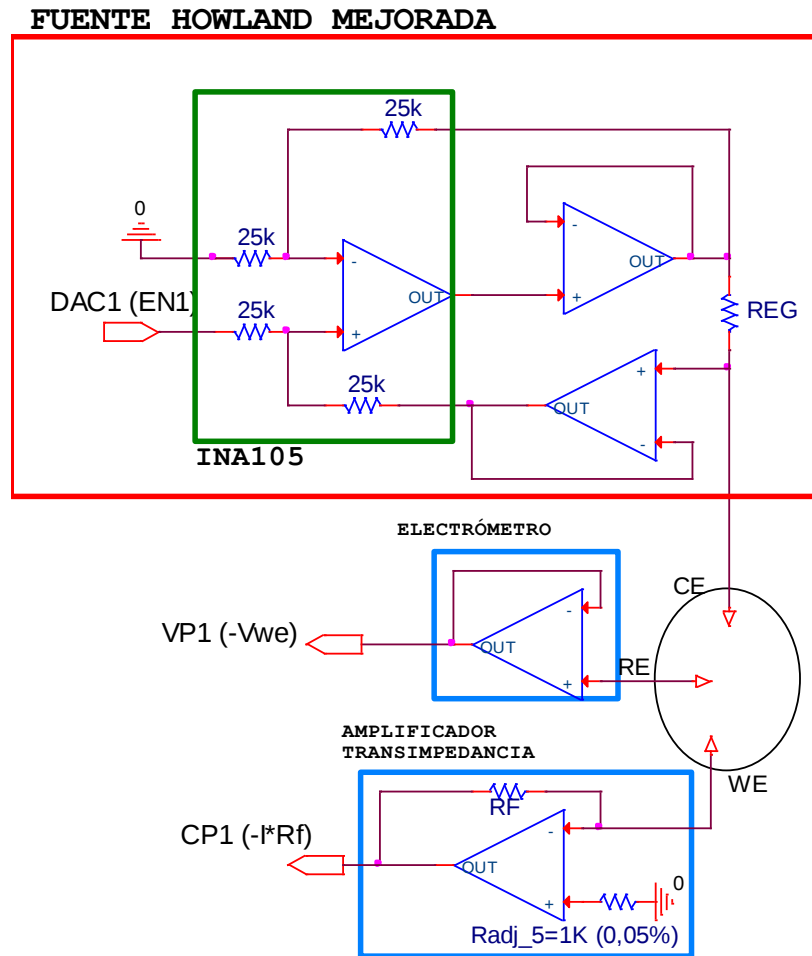
Se analizaron las diferentes propiedades eléctricas que deben tener los amplificadores operacionales que componen el potencióstato y se optó por utilizar el OPA192 (cuyas características pueden verse en la Tabla 4) Para las tres etapas que se describieron anteriormente ya que todas manejan las mismas señales. También se utilizaron resistencias superficiales de película fina con precisión de 0,05% como se muestra en la Tabla 5, para el manejo de las escalas de medición de corriente y para las resistencias de ajuste de tal forma que no se afecten las señales que entran y salen de la celda electroquímica y obtener la mayor precisión posible.

4.2 CIRCUITO GALVANOSTÁTICO

El galvanostato es un instrumento con el que se puede controlar la corriente que se inyecta a una celda electroquímica y mantenerla constante sin importar las variaciones que existan en la celda. El circuito galvanostático consta, al igual que el potencióstato, de un electrómetro, un amplificador de transimpedancia (que cumplen las mismas funciones anteriormente descritas) y una fuente de corriente *Howland*¹⁵ mejorada.

¹⁵ El diseño básico de la fuente de corriente *Howland* mejorada fue tomado de las consideraciones hechas en la tesis de maestría: DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN BIPOTENCIÓSTATO DE PRECISIÓN, del ING. Jairo Augusto Cala Rodríguez.

Figura 10. Esquema básico del circuito galvanostático



En el recuadro rojo de la Figura 10 se observa la fuente *Howland* mejorada. El amplificador operacional que cumpla la tarea de fuente de corriente debe ser capaz de manejar un rango amplio de esta, debe tener además un nivel de *offset* y corrientes de polarización bajas ya que es necesario generar corrientes pequeñas, se analizaron diferentes circuitos integrados que podrían cumplir estos requerimientos y se decidió utilizar el INA105 (que hace parte del diseño descrito en el texto guía para la realización de este proyecto [3]) cuyo esquema eléctrico puede verse en el recuadro verde de la Figura 10. Los seguidores de tensión o *Buffer* que están conectados en la entrada positiva y la salida del INA105 son para

garantizar que se pueda entregar a la celda electroquímica corrientes de gran amplitud ya que el INA no puede hacerlo por sí mismo; Para esto se utilizó el TLE2072 el cual maneja corrientes de $\pm 45\text{mA}$ y cuyas características también pueden verse en la Tabla 4. En las aplicaciones para las que se desarrolla este instrumento no se manejan corrientes superiores a $\pm 3\text{ [mA]}$ por lo que el uso de estos seguidores de tensión no es necesario ya que el INA105 puede entregar corriente $\pm 10\text{ [mA]}$, sin embargo se dispuso dejar el diseño del galvanostato tal y como se muestra en la Figura 10 para ampliar el las posibilidades de uso del instrumento.

La fuente *Hawland* mejorada toma la tensión generada por el DAC por su terminal positivo y la inyecta a la resistencia REG¹⁶, que se ve en la Figura 10. De esta forma a través del contra electrodo (CE) la celda electroquímica toma la corriente que pasa por REG y que luego es medida por el amplificador de transimpedancia. Nuevamente el electrómetro mide la tensión entre el electrodo de trabajo (WE) y el electrodo de referencia (RE).

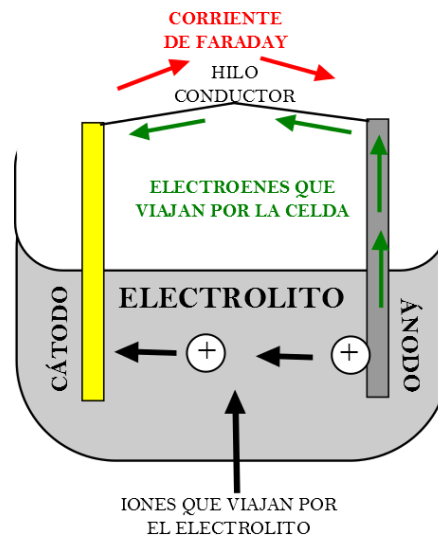
Finalmente, con la variación de la resistencia REG se puede controlar la cantidad de corriente que pasa por la celda electroquímica. Se establecieron para la generación de corriente las mismas escalas que se definieron para la medición de la misma en el potencióstato, es decir, que la resistencia REG tomará los mismos valores que la resistencia RF. Para la selección de estas escalas también fueron utilizadas resistencias superficiales de película fina de precisión de 0,05% como se muestra en la Tabla 5.

¹⁶ Acrónimo de “Resistencia de Escalas del Galvanostato”

4.3 CELDA ELECTROQUÍMICA O “CELDA DUMMY”

En las pruebas electroquímicas, para caracterizar las propiedades de corrosión de un material se prepara lo que se conoce como una “Celda electroquímica”. El propósito de esta celda es recrear de forma controlada las condiciones que provocan que un material se corroa; la celda consta de un recipiente, generalmente de vidrio, que contiene una solución acuosa llamada electrolito en la que se sumerge un metal, conocido como ánodo, capaz de oxidarse o emitir electrones y otro metal que no se corroe y puede recibir electrones, es decir, se reduce. En la Figura 11 se observa el esquema de funcionamiento de una celda electroquímica típica.

Figura 11. Esquema de funcionamiento de la celda electroquímica

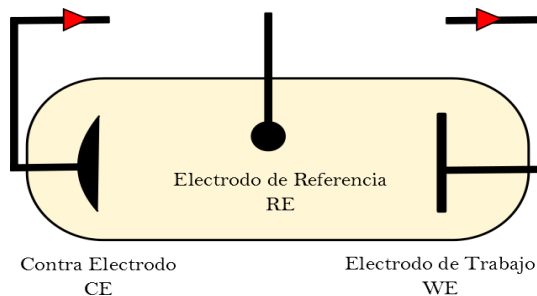


Fuente: Inkscape es un software libre de diseño gráfico. (No requiere licencia y es gratuito)

Como se muestra en la Figura 11, aparece una corriente que contrarresta el movimiento de electrones llamada “*corriente de Faraday*” y que es directamente proporcional a la corrosión vista en la superficie anódica del material. Ya en la

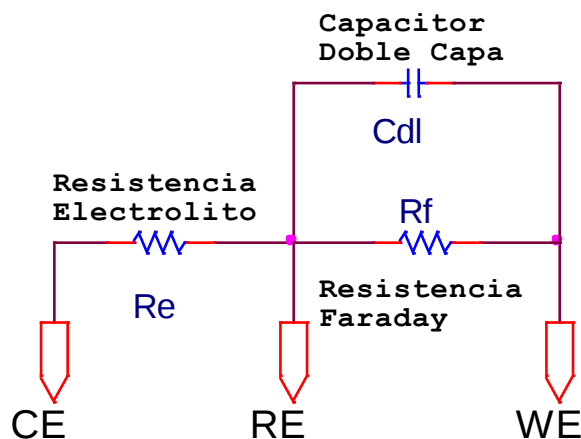
práctica, el metal que cumple la función de ánodo (material corrosivo) se le conoce como Electrodo de Trabajo (WE), y al material no corrosivo, que suele ser grafito, se le conoce como Electrodo Auxiliar o Contra Electrodo (CE). Adicionalmente en las pruebas potenciostáticas se acostumbra utilizar un tercer electrodo conocido como Electrodo de Referencia (RE). En la Figura 12 se muestra un modelo general de la celda electroquímica de tres electrodos.

Figura 12. Modelo Básico de la celda electroquímica de tres electrodos



Los fenómenos electroquímicos que se dan dentro de la celda permiten crear modelos eléctricos de la misma, que pueden llegar a ser muy complejos dependiendo de la aplicación en que se use. Para el desarrollo del presente proyecto se utilizó el modelo más sencillo de las celdas electroquímicas conocido como “*Celda Dummy*” y como se observa en la Figura 13 consta de dos resistencias y un capacitor.

Figura 13. Modelo eléctrico de la “Celda Dummy”



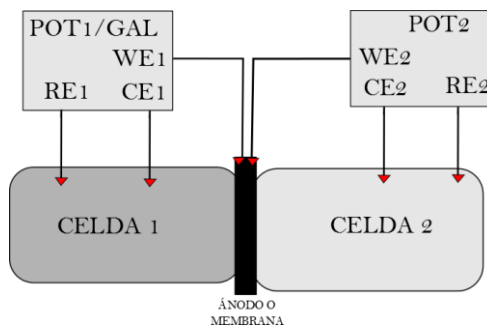
El paso de iones del ánodo hacia el cátodo genera un camino conductor dentro del electrolito y se modela a través de una resistencia de baja impedancia (R_e); el efecto de la corriente de Faraday es modelado con una resistencia (R_f) de alta impedancia ya que se trata de una corriente que se opone a la separación de los iones del ánodo; Finalmente el capacitor (C_{dl} ¹⁷) que se muestra en la Figura 13 corresponde a la doble capa de iones positivos y negativos que se forma alrededor del ánodo cuando ocurren los procesos de oxidación y reducción dentro de la celda.

Para las pruebas Bipotenciaostáticas se tomó como referencia el diseño propuesto por el método de *Devanathan-Stachurski*¹⁸ en el que se tienen dos celdas electroquímicas unidas por un solo electrodo de trabajo como se muestra en la Figura 14. Para el modelo eléctrico de esta celda doble simplemente se unieron dos “celdas Dummy” por el electrodo de trabajo (WE).

¹⁷ Acronimo de “Double Layer Capacitor”

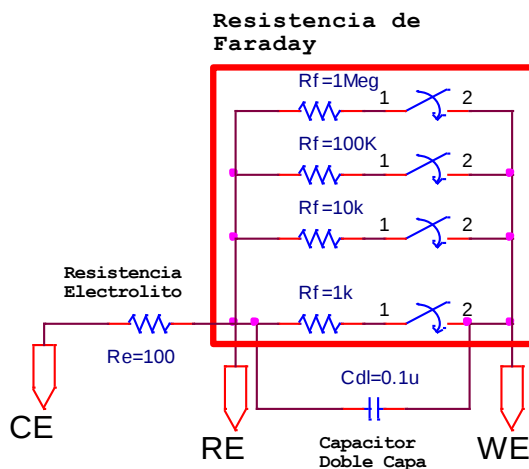
¹⁸ Para ampliar los conocimientos acerca de este método se recomienda revisar la tesis: ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN IÓNICA TRIDIMENCIONAL (3DII) EN DESCARGAS A BAJA PRESIÓN COMO PROTECCION DE ACEROS A LA PERMEACIÓN DE HIDRÓGENO de MIGUEL ANGEL SILVA PLATA.[3]

Figura 14. Esquema de la Celda electroquímica de Devanathan-Stachurski



4.3.1 Diseño de la celda electroquímica. La corriente que circula por la celda electroquímica depende directamente de la impedancia que exista entre el Electrodo de Trabajo (WE) y el Electrodo de Referencia (RE), es decir, del valor que tenga la Resistencia de Faraday (R_f). Por esto, se dispuso un arreglo de resistencias, como se muestra en la Figura 15, donde es posible variar dicha resistencia en los cuatro valores establecidos para cada escala de corriente y así comprobar de forma rápida el funcionamiento del instrumento.

Figura 15. Diseño de la celda electroquímica



Para la resistencia del electrolito, que debe ser pequeña, se usó un valor de 100 $[\Omega]$ ya que es 10 veces más pequeña que la resistencia de *Faraday* que genera la corriente más grande (es decir $R_f=1[k\Omega]$). Al capacitor de Doble capa (Cdl) se le asignó un valor de 0,1 $[\mu F]$ ya que es el valor típico con el que se representa su efecto en la pruebas potencioestáticas. Para mejorar la respuesta del instrumento en las pruebas realizadas se utilizaron resistencias de montaje superficial de la mejor precisión que se encontró en el mercado local, en la Tabla 3 se muestran sus características eléctricas.

Tabla 3. Elementos discretos para la celda electroquímica.

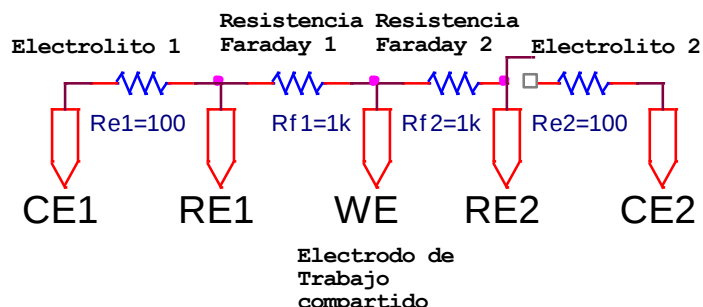
Impedancia	Precisión [%]	Empaquetado	Precio(COP/u ¹⁹)
100 $[\Omega]$	1	Smd ²⁰ 0805	400
1 $[k\Omega]$	0,05	Smd 0805	2400
100 $[k\Omega]$	0,05	Smd 0805	2400
1 $[Meg\Omega]$	0,1	Smd 0805	2400
Capacitancia	Tipo		
0,1 $[\mu F]$	Cerámico	Smd 0805	100

Para la doble celda usada para las pruebas Bipotenciaostáticas se estableció el diseño que se muestra en la Figura 16 y para la cual se usaron resistencias con las mismas características que se observan en la Tabla 3.

¹⁹ Acrónimo de Pesos Colombianos por unidad

²⁰ Acrónimo de “Surface Mounted Device” o Dispositivo de Montaje Superficial

Figura 16. Diseño eléctrico de la *Doble celda DUMMY*



4.4 INTERRUPTORES ANALÓGICOS

Para la selección del modo de operación del instrumento y para cambiar las escalas de corriente del mismo se debió usar dos tipos de interruptores analógicos que se activan mediante señales digitales para automatizar estas tareas. Los interruptores²¹ que a continuación se describen hacen parte del diseño de la tarjeta que contiene el circuito analógico del instrumento y por ello se alimentaron con tensiones de ± 12 [V]. En la Tabla 6 se muestran las principales características eléctricas de los interruptores analógicos descritos a continuación.

4.4.1 Interruptor ADG1413. Es un interruptor de tipo SPST (*Single-Pole/Single-Throw*) es decir, que las señales analógicas vienen de un origen llamado “polo” y una vez que se activa el interruptor sólo hay una “vía” por donde la señal seguirá su camino. Este integrado tiene cuatro canales y puede manejar señales bipolares entre ± 15 [V], además cuando está activo presenta una resistencia máxima de 1,5 [Ω] que es lo suficientemente baja como para no afectar las señales que pasen por él. Este integrado se utilizó para la selección de escalas de corriente en el

²¹ Para conocer a fondo las características y ventajas estos interruptores es necesario referirse a la tesis de maestría: DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN BIPOTENCIOSTATO DE PRECISIÓN, del ING. Jairo Augusto Cala Rodríguez

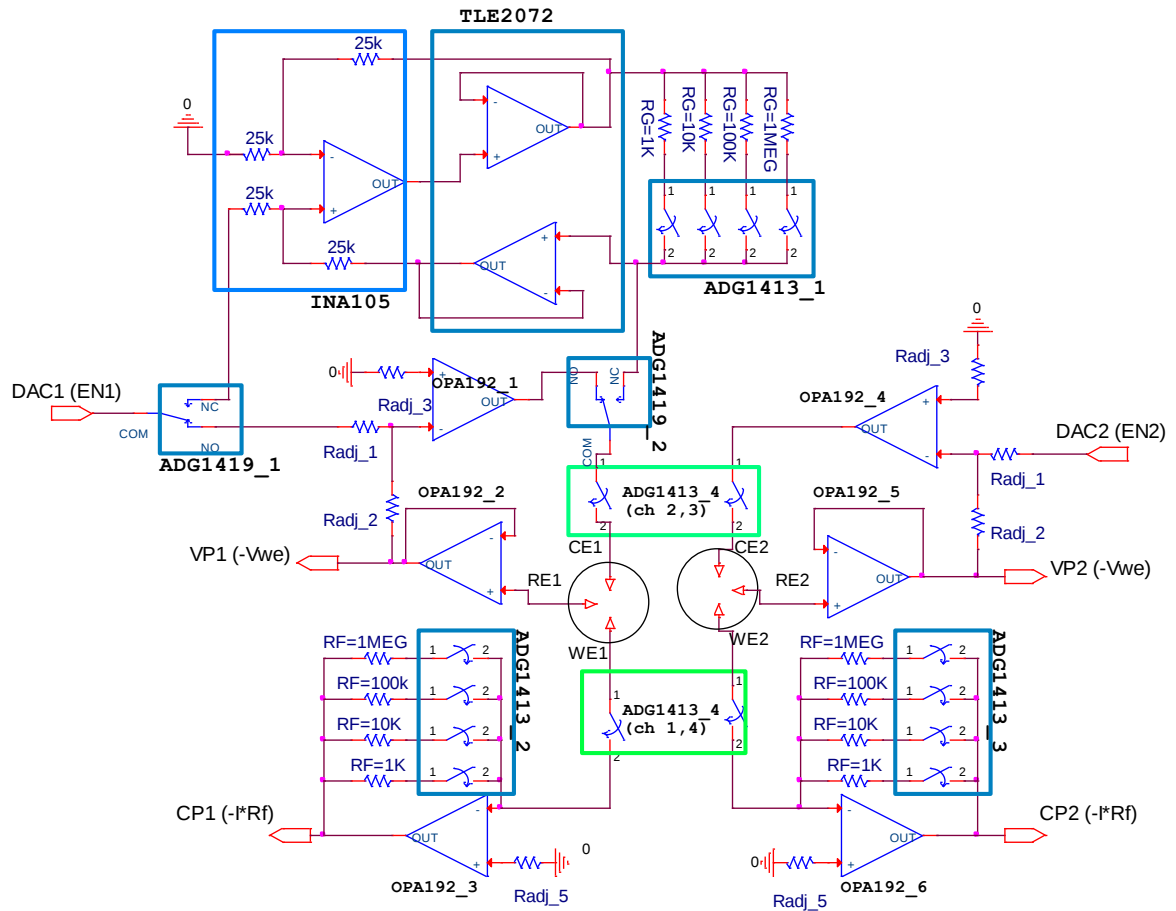
potenciostato y el galvanostato y para controlar el funcionamiento del instrumento cuando opere en modo Bipotenciostato.

4.4.2 Interruptor ADG1419. El interruptor es de tipo SPDT (Single-Pole/Doble-Throw) y su funcionamiento consiste en una señal que entra por el puerto común (D) del integrado, una vez ahí tiene dos posibles caminos por donde seguir su curso y depende de la orden que se envíe a su entrada digital (IN) la selección de uno de ellos. Este interruptor puede manejar señales bipolares de ± 15 [V] y tiene una resistencia máxima en estado activo de 2.1 [Ω], lo que tampoco afecta las señales; Este integrado sirve para la selección del modo trabajo del instrumento, ya sea potenciostato o galvanostato.

4.5 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO DEL SISTEMA ANALÓGICO

En esta tarjeta se pueden observar los dos circuitos potenciostáticos, el galvanostato, los interruptores analógicos y los conectores que van hacia la celda electroquímica. El diseño de esta tarjeta también se hizo por bloques de tal forma que todas las etapas que se explicaron anteriormente pudieran ser identificadas para hacer un seguimiento óptimo a las señales, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Esquemático de la tarjeta analógica



Para la conexión de la celda electroquímica a la tarjeta del sistema analógico del instrumento se utilizaron conectores hembra de audio en la *PCB* y cables de audio de tres hilos con apantallamiento con banana en un extremo y tres “caimanes” en el otro (como se muestra en la Figura 18); se usó este tipo de conexión porque ofrece un buen blindaje contra el ruido a un bajo costo. Es importante llevar de forma limpia (con el menor ruido posible) las señales del potencióstato a la celda electroquímica ya que, de no ser así, las mediciones seguramente no tendrán correspondencia con lo esperado; lo ideal para estos instrumentos es usar cables coaxiales robustos como las sondas de un generador de señales, pero estas

puntas suelen ser costosas y para la aplicación desarrollada en este proyecto los beneficios de la conexión elegida son idóneos.

Figura 18. Cables para la conexión de la celda electroquímica



Se usaron interruptores para el control de las escalas de medición en los dos potencióstatos, para las escalas de generación de corriente en el galvanostato, para el cambio de modo de funcionamiento del instrumento. Adicionalmente se utilizó un interruptor ADG1413 de cuatro canales, como se muestra en los recuadros verdes oliva de la Figura 17, para realizar tareas específicas en diferentes modos de operación; en primer lugar se dedicaron dos canales del integrado para desconectar internamente los contra electrodos (CE1 y CE2) de las celdas (sin la necesidad de quitar los “caimanes” correspondientes) y poder medir la tensión y corriente de corrosión, que debe hacerse sin excitación en la celda electroquímica, de forma automática y en segundo lugar, los canales restantes del integrado se ocuparon para automatizar la desconexión de los electrodos de trabajo (WE1 y WE2) cuando el instrumento esté operando en modo Bipotenciostato.

4.5.1 Componentes de la tarjeta. La tarjeta analógica consta básicamente de los elementos descritos en la Tabla 4. Los parámetros más importantes de estos elementos, además de los descritos anteriormente son las densidades de ruido de tensión y de corriente las cuales dependen de la frecuencia de operación. Con el instrumento desarrollado se trabajan pruebas que pueden hora o incluso días, es decir, opera a frecuencias bajas (los datos registrados en la Tabla 4 corresponden a la frecuencia de 100 [Hz] en las hojas de datos de los fabricantes).

Tabla 4. Componentes de la Tarjeta analógica

Opamp	Canales	Vos	Ios	Vn [$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$]	In [$\frac{pA}{\sqrt{Hz}}$]	IBIAS	Iout [mA]	SR [V/ μ s]	Precio [USD/1Ku]
OPA192	1	± 5 [μ V]	± 20 [pA]	10	0,0015	± 20 [pA]	± 65	20	1,35
INA105	1	± 50 [μ V]	NP	60	NP ²²	NP	+40 /-10	3	17
TLE2072	2	± 900 [μ V]	± 20 [pA]	48	0.0028	± 175 [pA]	± 45	35	1,15

Aunque la corriente máxima que pasará por la celda electroquímica es de 3 [mA] la selección de los componentes del potencióstato y el galvanostato permite generar y medir corrientes más grandes lo que amplía el rango de aplicaciones del instrumento.

²² No presenta en su hoja de datos

4.5.2 Elementos discretos. La precisión de las resistencias del instrumento es importante ya que en esta característica radica la precisión en las mediciones; En la Tabla 5 se registran las resistencias que se consiguen en el mercado local cuyas precisiones varían dependiendo de la impedancia. El empaquetado de los elementos discretos superficiales se eligió de 0805 el cual permite reducir el espacio en *PCB* y no dificulta el proceso de soldado.

Tabla 5. Elementos discretos de la tarjeta analógica

Impedancia	Precisión [%]	Empaquetado	Precio(COP/u ²³)
1[k Ω]	0,05	Smd ²⁴ 0805	2400
10k Ω]	0,05	Smd 0805	2400
100k Ω]	0,05	Smd 0805	2400
1[Meg Ω]	0,1	Smd 0805	2400
Capacitancia	Tipo	Empaquetado	precio
0,1 [μ F]	Cerámico	Smd 0805	100
1 [μ F]	Cerámico	Smd 0805	100
1 [μ F]	Cerámico	Inserción	100

La mayoría de componentes que se utilizaron para la implementación del Bipotenciostato/Galvanostato se adquirieron del fabricante Texas Instruments (T.I.) ya que se acoplan mejor con la tarjeta *Stellaris Launchpad* por ser del mismo fabricante. A pesar de esto, los interruptores analógicos empleados en el diseño

²³ Acrónimo de Pesos Colombianos por unidad

²⁴ Acrónimo de “Surface Mounted Device” o Dispositivo de Montaje Superficial

se consiguieron del fabricante *Analog Devices* principalmente porque soportan una corriente de 190 [mA] por canal (suficiente para realizar las tareas que se necesiten) mientras que los interruptores de T.I. no cumplen con los requerimientos de corriente.

Tabla 6. Características de los interruptores analógicos

Interruptor	Tipo	RON[Ω]	VINH [V]	VINL [V]	Canales	tON [ns]	tOFF [nS]	Precio(USD/1ku)
ADG1413	SPST	1,5	2	0,8	4	100	90	3,23
ADG1419	SPDT	2,1	2	0,8	1	85	115	1,85

4.5.3 Alimentación del instrumento. Existen varios arreglos para alimentar un instrumento de este tipo, para la aplicación desarrollada se optó por unir dos adaptadores de 12 [V] a 2 [A] para obtener líneas de tensión de ± 12 [V] para alimentar la tarjeta del sistema analógico y a partir de estas, mediante reguladores de tensión, se sacan rieles de tensión de ± 5 [V] para alimentar la tarjeta del sistema digital y finalmente con el riel de 5 [V] y un regulador se consigue la tensión de 3.3[V] necesaria para el acondicionamiento de la señal en la tarjeta del sistema digital.

Tabla 7. Componentes para la alimentación del instrumento

Componente	Vin [V]	Vout [V]	Iout [A]	Tolerancia [%]	Precio (COP/u)
Adaptador 12[V]	110/240 AC	12	2	1	12300
LM7805	12/18	5	1.5	±4	1000
LM7905	-12/-18	-5	1.5	±4	1000
LM1086-3.3	5/27	3.3	1.5	0,1	2000/1ku

Como se muestra en la Tabla 7 la corriente máxima de la tarjeta de alimentación es de 1.5 [A] suficiente para el prototipo elaborado en este proyecto. La principal razón para elegir este diseño para la alimentación es que por un bajo costo se tienen todos rieles de tensión que necesita el instrumento. El conector para llevar las tensiones de los adaptadores a la tarjeta de alimentación se eligió de tipo USB (*Universal Serial Bus*) y para que el instrumento funcione adicional a esta conexión se debe mantener conectada la *Stellaris Launchpad* a un computador vía USB. Finalmente las tierras de las tres tarjetas descritas anteriormente se unen a través de un solo camino que va directamente a la alimentación del instrumento, esto hace que el ruido se concentre en este punto y no afecte las mediciones de las señales.

Los diseños de las tarjetas de alimentación y del sistema analógico pueden observarse en el Anexo F. El acoplamiento de la tarjeta de desarrollo *Stellaris Launchpad* con la alimentación del sistema puede verse en el Anexo C así como el uso de los recursos del micro controlador.

5. CARACTERIZACIÓN DEL INSTRUMENTO

A partir del diseño propuesto en los capítulos anteriores y la selección de componentes se dispuso a comprobar el funcionamiento del equipo desarrollado para exponer los diferentes problemas que están presentes en estos equipos e implementar estrategias correctivas que disminuyan los riesgos de obtener mediciones erróneas.

Debido a que la mayoría de señales involucradas en las pruebas electroquímicas que deben realizar los Potenciostatos y Galvanostatos son de amplitudes menores a 1 [V], se hace necesario, además de utilizar amplificadores operacionales de baja tensión de *offset*, seleccionar elementos discretos de alta precisión que no cambien las señales sino que, al contrario, contribuyan a mejorar la calidad de las mismas. Uno de los fenómenos más comunes presentes en los instrumentos de medición de señales pequeñas es el ruido de alta frecuencia que puede montarse (agregarse o sumarse) a las señales y distorsionarlas; También el ruido de 60 [Hz] proveniente de la red de alterna podría “colarse” en el instrumento a través de la tarjeta de alimentación del instrumento provocando que las señales medidas se dañen, por eso la selección de un buen sistema de alimentación garantiza que este fenómeno no ocurra. Debido a la naturaleza de la celda electroquímica podrían venir de ella niveles de tensión indeseados que afecten las mediciones, por eso es fundamental adoptar una conexión entre la celda electroquímica y el instrumento que garantice el blindaje contra el ruido y estos niveles de tensión.

Como se elaboraron tres circuitos impresos, se realizaron las pruebas de caracterización a cada una de ellas y se analizaron los datos que arrojaron estos procedimientos. En esta sección se presenta la información con la misma lógica

que en los capítulos anteriores, por etapas, y de forma descriptiva tratando de plasmar todas las consideraciones tenidas para el desarrollo del instrumento.

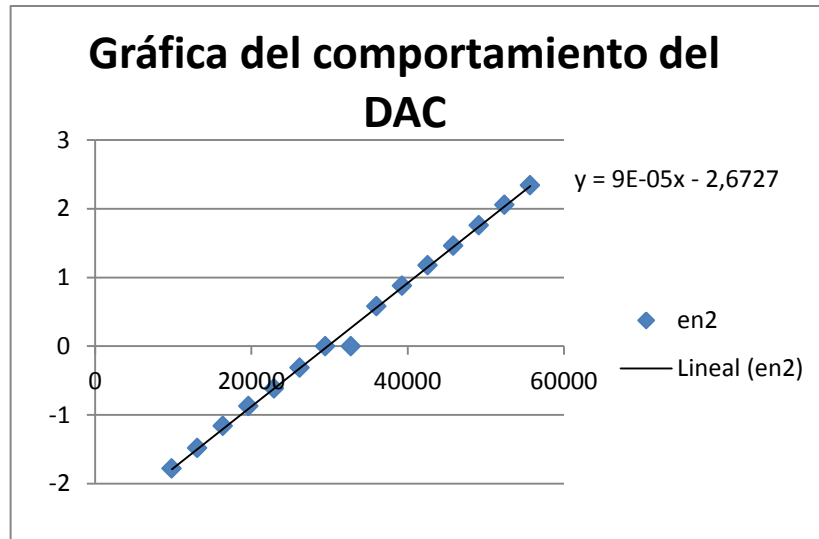
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DIGITAL

Dentro de la tarjeta del sistema digital se encuentran dos etapas fundamentales del instrumento que son la generación de la señal y el acondicionamiento de señal pero, además, para caracterizar el funcionamiento total del sistema digital es necesario medir la etapa de adquisición de señal, es decir, los conversores Analógicos/Digitales de la *Stellaris Launchpad*. Dicho esto a continuación se presenta los resultados obtenidos.

5.1.1 Generación de señal. La generación de la señal proviene del manejo de los conversores Digital/Analógicos DAC8831 que se encuentran en la tarjeta del sistema digital; Estos conversores se polarizan con una tensión de $VDD=5[V]$ y reciben una tensión de referencia que va de $2,5 [V]$ hasta VDD , para la aplicación se usó una referencia de $3[V]$, esta tensión es importante porque de ella depende el rango en que los conversores generarán la tensión.

En primer lugar es necesario obtener la curva de conversión de los DAC bajo las condiciones eléctricas del diseño del instrumento descrito en este proyecto. Para esto mediante el protocolo SPI de 16 [bits] se envió hacia los DAC de la tarjeta la señal de reloj (CLK), los *chip selector* para cada conversor (CS1 y CS2) y a la entrada SDI de ambos DAC el mismo número binario para que ambos hagan la misma conversión y se midió con el osciloscopio en escala de $1[V]$ la salida de los mismos (EN1 y EN2). Los resultados de estas mediciones están consignados en la Tabla 13 vista en el Anexo D de la cual se obtuvo la gráfica de la Figura 19.

Figura 19. Curva característica de los DAC8831



En la Figura 19 se observa la gráfica que se obtuvo a través de una regresión lineal hecha en *Excel*; En el eje horizontal se colocó el equivalente decimal de cada código Hexadecimal que se le introdujo a los conversores y el eje vertical está compuesto por las tensiones obtenidas de la conversión de cada código Hexadecimal. Así la ecuación que describe la conversión de los DAC es la siguiente:

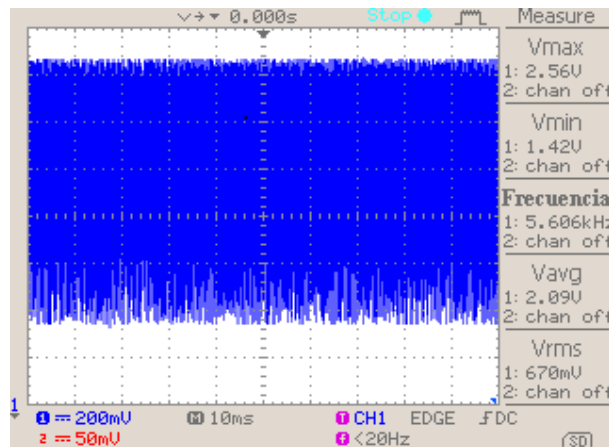
Ecuación 1. Ecuación de la recta de conversión de los DAC8831

$$V_{out} = (9 * E - 05) * (\text{valor a convertir en Decimal}) - 2,6727 \text{ [V]} \quad (1)$$

De la Tabla 14 vista en el Anexo D, se observa que en general la diferencia presente, entre las tensiones esperadas y las medidas en el circuito, arroja un porcentaje de error relativamente pequeño, siendo el máximo error de solo 3,7% y se ve cerca a la tensión de 0 [V], donde el osciloscopio comienza a afectar las señales medidas agregando niveles de ruido propio de las puntas de dicho instrumento de medición.

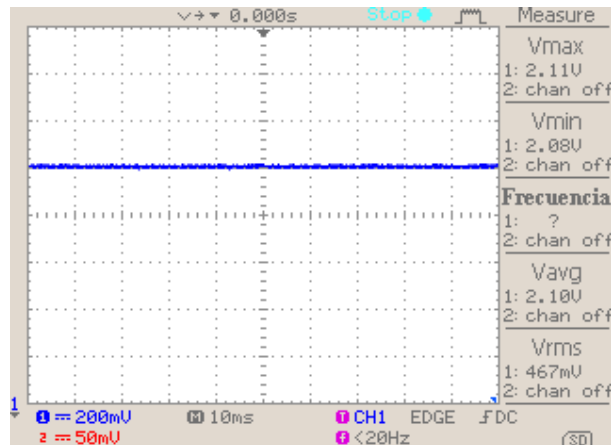
El principal problema que surgió al usar los DAC8831 es que se presentaron oscilaciones producidas por el operacional conectado a la salida de los mismos; Esto porque al no poner ninguna carga en la salida de este amplificador operacional (OPA2727) se comporta como un oscilador, es decir, que para tener un comportamiento correcto de los conversores es necesario tener las salidas del operacional una carga. Este efecto oscilante puede verse en la Figura 20.

Figura 20. Oscilaciones indeseadas en los DAC8831



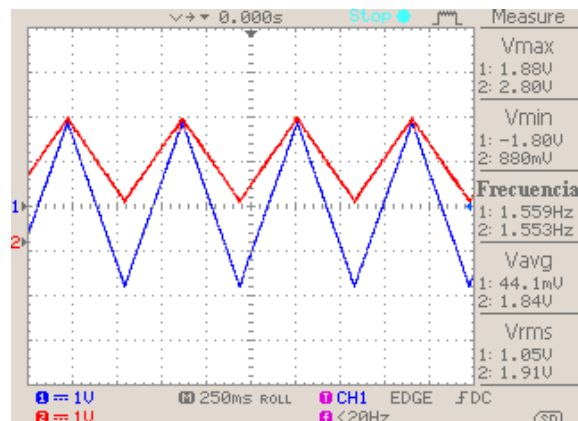
Para solucionar esto se colocaron resistencias de carga de 100 Ω , con precisión 0.1%, que mejoraron la señal que entregan los conversores; También al conectar la tarjeta del sistema analógico como carga se observó que las oscilaciones desaparecieron casi por completo (como se muestra en la Figura 21), presentándose solo en los valores de tensión extremos que no se tuvieron en cuenta por no hacer parte de la zona lineal de la conversión.

Figura 21. Salida de los DAC8831 con carga.



5.1.2 Acondicionamiento de señal. El acondicionamiento de señal consiste básicamente en un en un amplificador operacional que cumple la función de sumador al que llega la señal bipolar que arroja el Bipotenciostato/Galvanostato y una tensión continua de 3,3 [V] (que viene de la tarjeta de alimentación), el sumador tiene ganancia de $\frac{1}{2}$ y a la salida se obtiene una señal equivalente unipolar. Para una primera prueba del funcionamiento, con un generador de señales se llevó a la entrada del sumador una señal triangular bipolar que oscila entre -1,80 [V] y 1,88 [V] y se midió la salida (como se muestra en la Figura 22).

Figura 22. Prueba del Acondicionamiento de Señal con generador de señales



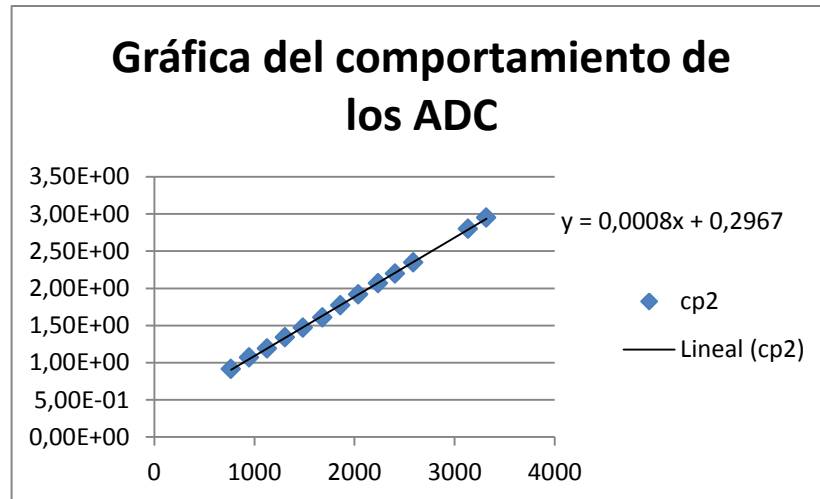
La ecuación básica del acondicionamiento de señal es $Tension_{Unipolar} = \frac{Tension_{bipolar} + 3,3}{2}$ [V], así para un máximo de tensión de 1,88[V] se obtiene 2,59[V] y para un mínimo de -1,80 se debe obtener 710 [mV].

La gráfica roja de la Figura 22 muestra la salida del sumador en las condiciones planteadas anteriormente, allí se observa que el máximo es de 2,8[V] y el mínimo de 800[mV]. Con estos resultados se comprobó el correcto funcionamiento del sistema de acondicionamiento de señal ya que la diferencia entre el valor teórico y el medido radica principalmente en que el osciloscopio agrega un pequeño nivel de *offset* que afecta la medición de señales.

Los porcentajes de error registrados en la Tabla 16 vista en el Anexo D, indican que la etapa de acondicionamiento de señal cumple su función sin distorsionar la naturaleza de la señal adquirida del potenciómetro ya que el máximo error visto es de apenas 3,4%, una tolerancia aceptable para la aplicación desarrollada en este proyecto. Sabiendo que contribuyen a que el margen de error sea de este tamaño la tolerancia de los elementos discretos, que es de 1%, que componen el acondicionamiento y la precisión del regulador que debe generar la tensión de continua de 3,3 [V] que entra al sumador (típica de 0,1%).

5.1.3 Adquisición de señal. Esta etapa consta básicamente de la caracterización de los conversores Analógico/Digitales (ADC por sus siglas en inglés) de la tarjeta *Stellaris Launchpad*, los cuales reciben las señales VP1, CP1, VP2, CP2 que vienen del bloque de acondicionamiento de señal. En la tabla 17, vista en el Anexo D, se consignan los resultados de la prueba hecha para caracterizar los conversores del micro controlador y de la cual se obtuvo la gráfica característica de la Figura 23.

Figura 23. Gráfica del comportamiento de los ADC del μC



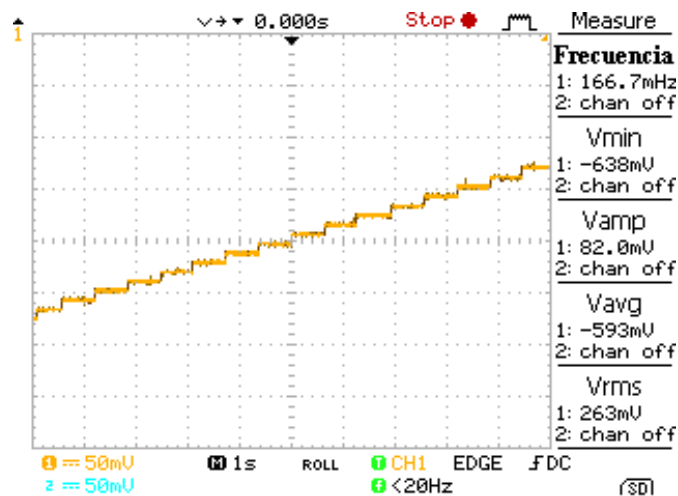
En la Ecuación 2 se observa la razón de conversión que caracteriza el comportamiento de los conversores Analógico/Digitales de la tarjeta *Stellaris Launchpad*.

$$V_{out} = 0,0008 * \text{valor a convertir en Decimal} + 0,2967 \text{ V} \quad (2)$$

Estos conversores digitalizan señales analógicas unipolares y por eso es necesario operar matemáticamente mediante programación cada uno de los datos medidos para obtener las tensiones bipolares equivalentes.

En la Figura 24 se muestra el cambio en de tensión generada por el DAC8831, en la escala mínima que permitió medir el osciloscopio, es decir que la tensión va aumentando de 10 [mV] cada 600 [mS]. Aquí se evidencia que el conversor logra hacer los cambios de tensión requeridos para la aplicación.

Figura 24. Escalera generada por el DAC



5.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ANALÓGICO

El sistema analógico consta básicamente de los circuitos potencioestáticos y galvanostático, los interruptores y los elementos discretos contenidos todos en un mismo circuito impreso. Para la caracterización de este sistema se censaron las cuatro salidas de tensión existentes en el circuito, VP1 (Tensión del Electrómetro 1) y CP1 (Tensión del Amplificador de Transimpedancia 1) para el potencioestado 1 y el galvanostato; VP2 y CP2 para el potencioestado 2, y se variaron las cuatro posibles escalas del instrumento para medir la variación de las señales cuando se excita el sistema con una tensión fija.

5.2.1 Escalas de medición de corriente. El circuito potencioestático maneja cuatro escalas de medición de corriente que son controladas mediante el accionar de los interruptores; Estas escalas constan, básicamente, de una resistencia de precisión en el amplificador de transimpedancia que dependiendo de su impedancia y de la tensión de excitación del circuito puede determinarse a través de la ley de Ohm ($V=I \cdot R$ [V]) la corriente que circula a través de la celda electroquímica.

La escala mínima de medición de corriente corresponde a la resistencia de mayor impedancia, es decir, la resistencia de 1 [MegΩ] que produce una corriente de 2 [μA]. Esto quiere decir que el buen funcionamiento del instrumento se ve comprometido cuando se conectan a él celdas electroquímicas cuyo equivalente en impedancia sea superior a 1 [MegΩ]; También se debe tener precaución cuando se conectan celdas de menor impedancia a la resistencia que genera la escala de corriente más alta, es decir, 1 [KΩ].

Se registró en la Tabla 8 el valor de la tensión del amplificador de transimpedancia del potencióstato 2 (CP2) para las diferentes escalas de corriente y conocer de qué forma se afectan las señales con la variación de las escalas. Para esta prueba se envió una tensión de excitación fija de 1,46 [V]

Tabla 8. Caracterización de las escalas de medición de corriente

Impedancia	Escala de Corriente teórica	Tensión medida en CP2 [V]	Corriente medida	Error (%)
1[KΩ]	1,46 [mA]	1,46	1,46 [mA]	0
10 [KΩ]	146 [μA]	1,47	147 [μA]	0,68
100[KΩ]	14,6 [μA]	1,45	14,5 [μA]	0,68
1[MegΩ]	1,46 [μA]	1,48	1,48 [μA]	1,36

De la tabla anterior se observa que, a medida que se va aumentando la resistencia de realimentación del amplificador de transimpedancia del potencióstato, el error en la medida respecto al valor teórico esperado tiene un pequeño aumento, siendo el máximo error registrado de 1,36 [%]. Este error, aunque es pequeño, se presenta principalmente por los efectos de ruido que los instrumentos de medición

(como el osciloscopio) le agregan al sistema desarrollado; por eso, puede asumirse que el error real presente en cada escala de medición es cercano al cero y las señales adquiridas son confiables y repetibles.

5.2.2 Escalas de generación de corriente. La generación de corriente está compuesta por la fuente de corriente *Howland* mejorada descrita anteriormente, la cual posee una resistencia R_G con la que, dependiendo de su impedancia, se puede controlar la cantidad de corriente que pasa por la celda electroquímica; Esta resistencia toma los mismos valores que la resistencia de realimentación del amplificador de transimpedancia del potencióstato, o sea que, se pueden generar las mismas escalas de corriente.

Para la caracterización de la generación de corriente se envió la misma tensión de 1,46 [V] que en la prueba anterior, se puso en modo galvanostato el instrumento y se midió para las cuatro escalas la tensión de salida del amplificador de transimpedancia del potencióstato 1 (CP1), en la Tabla 9 se registran los resultados.

Tabla 9. Caracterización de la generación de corriente

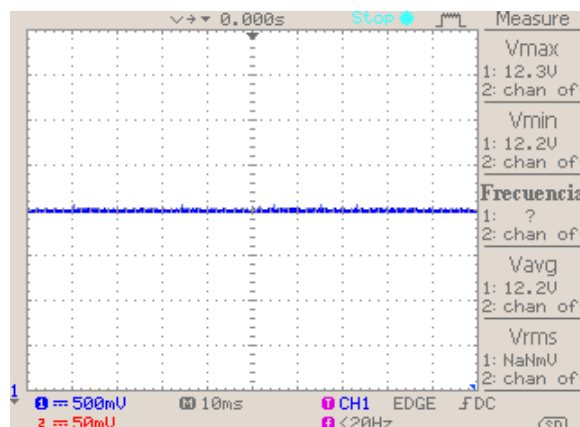
Impedancia	Escala de Corriente teórica	Tensión medida en CP1 [V]	Corriente medida	Error (%)
1[K Ω]	1,46 [mA]	1,46	1,46 [mA]	0
10 [K Ω]	146 [μ A]	1,44	144 [μ A]	1,36
100[K Ω]	14,6 [μ A]	1,43	14,3[μ A]	2,05
1[Meg Ω]	1,46 [μ A]	1,42	1,42[μ A]	2,7

Para el caso del galvanostato los niveles de error son un poco más altos, mostrando el mayor porcentaje en la escala de menor corriente (de 2,7%), esto debido a que las tensiones de *offset* del INA105 y el TLE2072 influyen en las señales. También la señal debe pasar por la resistencia REG con la que se cambia la escala de generación en el galvanostato y luego por la resistencia RF del amplificador de transimpedancia, en la medición, lo que agrega más error por las tolerancias de estas resistencias.

5.2.3 Alimentación del instrumento. La correcta selección de la fuente de alimentación, para instrumentos que manejan señales relativamente pequeñas como el desarrollado en este proyecto, influye en la calidad de las mediciones que se hagan. Por eso, se midieron con un osciloscopio, en la menor escala posible y con línea de tiempo de 10 [mS], las salidas del sistema de alimentación utilizado en este proyecto para determinar si de este arreglo se inyecta ruido al instrumento.

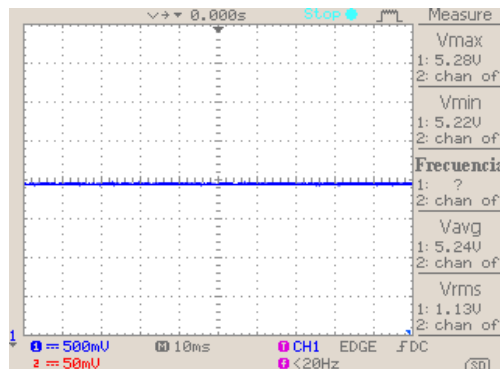
En primer lugar, en la figura 25 se muestra la tensión de 12[V] que viene directamente de los adaptadores y que alimenta la tarjeta del sistema analógico.

Figura 25. Tensión de alimentación de 12[V]



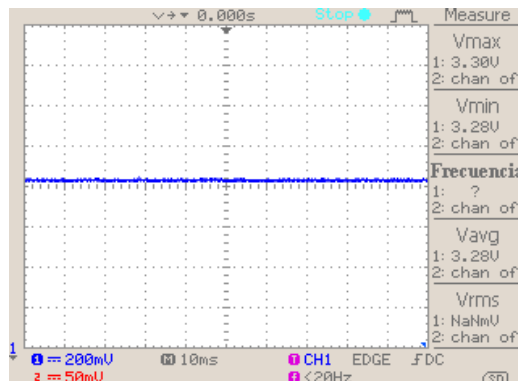
Esta tensión de 12[V] sirve de entrada al regulador LM7805 el cual entrega la tensión de 5[V] que alimenta el sistema digital del instrumento. Para garantizar una tensión estable se utilizaron los condensadores que recomienda la hoja de datos de dicho regulador en sus entradas²⁵. En la Figura 26 se observa esta tensión.

Figura 26. Tensión de alimentación de 5[V]



Finalmente la tensión de 5[V] sirve para alimentar el regulador de 3,3[V] el cual va hacia el circuito sumador del acondicionamiento de señal, en la Figura 27 se muestra la tensión que entrega este regulador.

Figura 27. Tensión de alimentación de 3,3[V]



²⁵ TEXAS INSTRUMENTS. Hoja de datos LM7805, LM7905, LM1086. Disponible en www.ti.com

Como se muestra en las Figuras 25, 26 y 27, las tensiones que entrega la tarjeta de alimentación son estables y no presentan ruido de 60 [Hz] ni de alta frecuencia. La principal razón para elegir este formato para la fuente de alimentación fue la relación costo beneficio que ofrece, ya que por un bajo costo se tienen rieles de alimentación que no van a afectar las señales del instrumento desarrollado.

6. INTERFAZ GRÁFICA Y PROGRAMACIÓN DEL MICRO CONTROLADOR

Una vez diseñado el sistema analógico y elegido los elementos que componen el sistema digital y luego de haber caracterizado las ventajas y limitaciones de dichos sistemas, es necesario establecer una estructura de control que sea capaz de poner en funcionamiento todas los componentes que constituyen el equipo desarrollado.

Este control se divide en dos grandes bloques: en primer lugar, la programación que debe tener el micro controlador seleccionado para que le entregue al sistema digital y analógico las señales necesarias para que opere en determinado modo y además cumpla la función de medir y administrar los datos; y en segundo lugar la creación de una plataforma, de control y monitoreo del funcionamiento del instrumento, hecha en *LabVIEW* para facilitar el uso del equipo por parte del usuario final.

6.1 INTERFAZ GRÁFICA EN *LABVIEW*

Debido a que el dispositivo electrónico realizado en este proyecto está pensado para que lo utilicen personas que no tienen amplios conocimientos en electrónica o sistemas, se hizo necesaria la implementación de una interfaz gráfica que permita al usuario acceder a todas las características que ofrece el Bipotenciostato/Galvanostato. Por esta razón se utilizó el software *LabVIEW* ya que mediante la implementación de dicho programa se pueden realizar controles virtuales o instrumentos virtuales VI²⁶.

²⁶ Acrónimo de “Virtual Instruments”

Con la creación de esta plataforma en Labview se debe realizar el control del Bipotenciostato/Galvanostato así como la visualización gráfica de los resultados obtenidos en la implementación de dicho dispositivo para su posterior análisis.

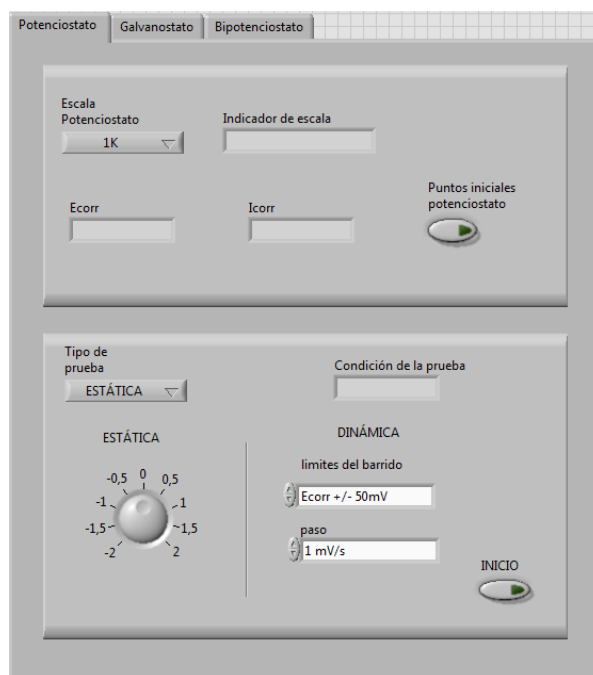
6.1.1 Diseño de la interfaz. El control que realiza la interfaz gráfica debe abarcar todas las formas de operación del equipo por lo que a continuación se enumeran dichas opciones:

- Selección de dispositivo (Potenciostato, Galvanostato y Bipotenciostato)
- Selección de escalas
- Tipo de prueba (estática o dinámica)
- Selección de tensión estática
- Selección de límites del barrido
- Selección de pasos para el barrido

La implementación de estas opciones se realizó mediante el uso del “GUI²⁷” mostrado en la Figura 28, que corresponde a la ventana de configuración para el potenciostato. En ella se puede ver en la parte superior tres pestañas en las cuales se escoge el tipo de dispositivo a utilizar, en el recuadro superior se muestra una lista desplegable de las escalas que maneja el dispositivo junto a casillas de indicadores que sirven para mostrar alertas, en el funcionamiento del dispositivo, y el cálculo de las tensiones y corrientes de corrosión.

²⁷ Acrónimo de “Grafical User Interface” de *LabVIEW*

Figura 28. Ventana de configuración para el Potenciostato



En el recuadro de la parte inferior se puede observar una lista desplegable para seleccionar el tipo de prueba, límites del barrido y paso del barrido, también se muestra una perilla para seleccionar el nivel de tensión deseado en una prueba estática. Más adelante se describa con ms detalle el proceso que se estableció para el uso de la interfaz.

Para que la interfaz pueda realizar su trabajo de control del instrumento se debe establecer una lógica en la que la interfaz genere una serie de códigos reconocibles por el μC . En la Tabla 10 se muestran los códigos que se envían en formato ASCII²⁸ y aunque los números asignados son de dos dígitos al enviarlos al μC por el puerto *Serial* del PC se hace más complejo.

²⁸ Acrónimo del inglés de “*American Standard Code For Information Interchange*”

Tabla 10. Códigos ASCII para el control del Equipo

Modo de operación	Resistencia RF para el control de Escalas	Código (ASCII)
Potenciostato		
	1[k Ω]	01
	100[k Ω]	02
	1 [Meg Ω]	03
	10 [Meg Ω]	04
Galvanostato		
	1[k Ω]	05
	100[k Ω]	06
	1 [Meg Ω]	07
	10 [Meg Ω]	08
Bipotenciostato		
	1[k Ω]	09
	100[k Ω]	10
	1 [Meg Ω]	11
	10 [Meg Ω]	12
Tipo de prueba		
	Dinámica	
Limite 1	Paso 1	16
	Paso 2	17
	Paso 3	18
Limite 2	Paso 1	19
	Paso 2	20
	Paso 3	21
Limite 3	Paso 1	22
	Paso 2	23
	Paso 3	24
	Estática	25
Señales Alerta		
	Interruptor PI ²⁹ off	26
	Interruptor inicio off	27

²⁹ Acrónimo para Puntos Iniciales e indica el cálculo de la Ecorr e Icorr necesarios para iniciar cualquier prueba.

La comunicación entre *LabVIEW* y el micro-controlador se pudo lograr mediante el uso de la herramienta VISA³⁰, la cual permite la comunicación *Serial* entre *LabVIEW* y cualquier μC que posea un bloque de conexión *Serial*. Dicha conexión se logró mediante el manejo del puerto USB.

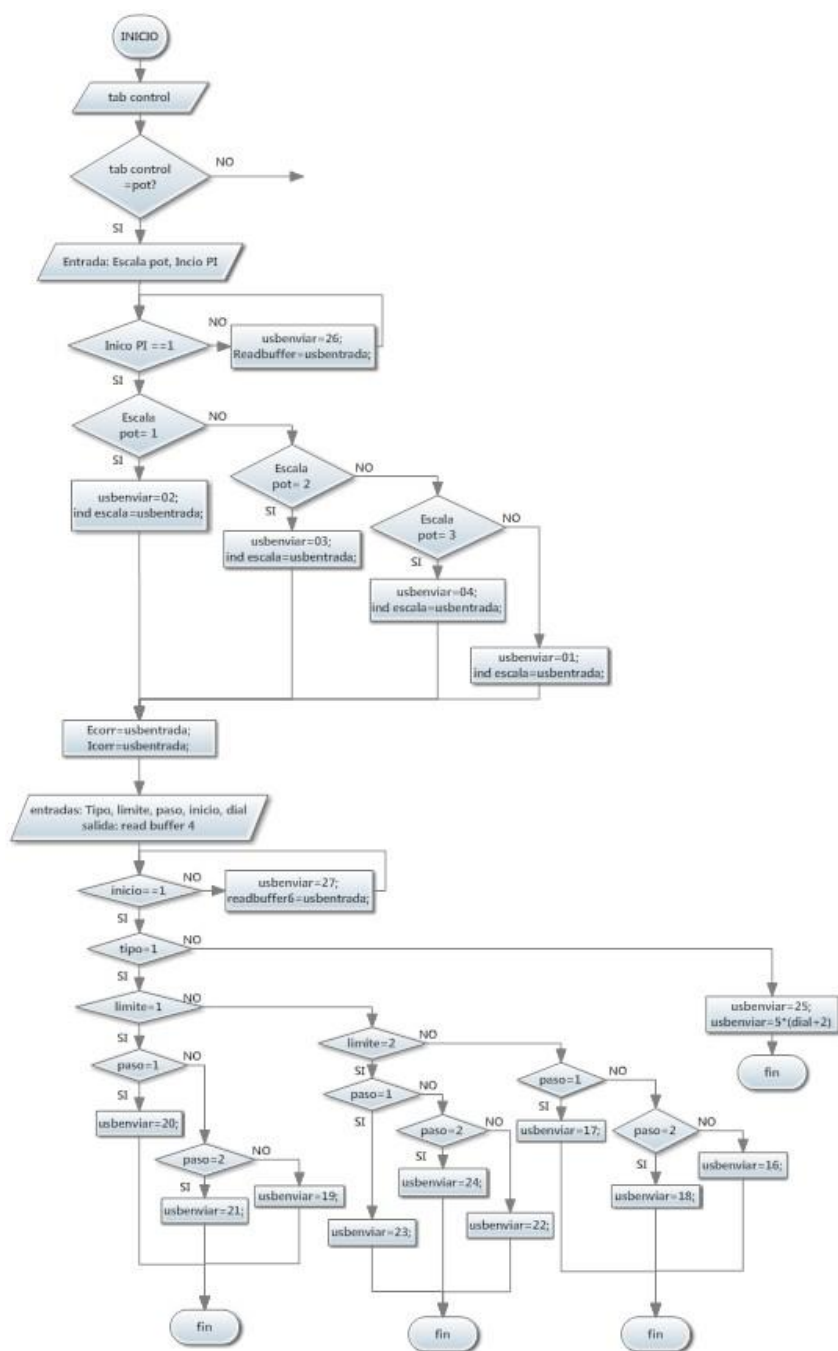
6.1.2 Lógica de operación de la interfaz. En la Figura 29 se muestra el diagrama de flujo para la ejecución de la rutina efectuada por la plataforma, donde se describe el proceso para enviar los códigos de configuración referentes al potencióstato.

En primer lugar, se pregunta por el indicador de modo de operación “Tab Control” con el que se selecciona si va a trabajar con el Bipotenciostato, el galvanostato o en este caso el potencióstato. En segundo lugar la instrucción pregunta por el estado del botón “Puntos Iniciales”, si dicho botón no ha sido presionado por el usuario Labview envía un código correspondiente a la señal de alerta 26 y vuelve a preguntar por el estado de del botón hasta que el estado sea diferente. Cuando la condición es verdadera pregunta cuál de las escalas esta seleccionada para enviar el código correspondiente; posteriormente envía el código para que el micro-controlador calcule los puntos iniciales (E_{corr} e I_{corr}).

Para la tercera parte del código el “GUI” pregunta cuál es el estado que el usuario ha seleccionado; si el botón de inicio está apagado envía la señal de alerta 27 y continúa preguntando hasta que el usuario indique el inicio de la prueba, cuando esta condición es verdadera se debe seleccionar el tipo de prueba, si dicha opción está en estática se habilita la perilla para indicar el nivel de tensión constante. Ahora si el indicador está en dinámica pregunta por el límite y el paso que ha seleccionado previamente el usuario y enviar el código de configuración para que el micro-controlador realice la prueba dinámica.

³⁰ Acrónimo de “*Virtual Instrument Software Architecture*”

Figura 29. Diagrama de flujo de la rutina de la interfaz gráfica para el potencióstato



Adicionalmente en el Anexo E se presenta un Manual de Usuario donde se explica el paso a paso para usar la plataforma diseñada en este proyecto y los diagramas de flujo para los modos Bipotenciostato y Galvanostato.

6.2 PROGRAMACIÓN DEL MICRO CONTROLADOR

Todo el control del Bipotenciostato/Galvanostato se realiza con el micro-controlador *Stellaris Launchpad* LM4F120. La rutina empleada para la ejecución de las pruebas consiste en la interpretación de los códigos enviados desde la interfaz gráfica para ejecutar sus tareas y así enviar los resultados a una memoria externa.

Las tareas que debe ejecutar el micro-controlador se muestran a continuación:

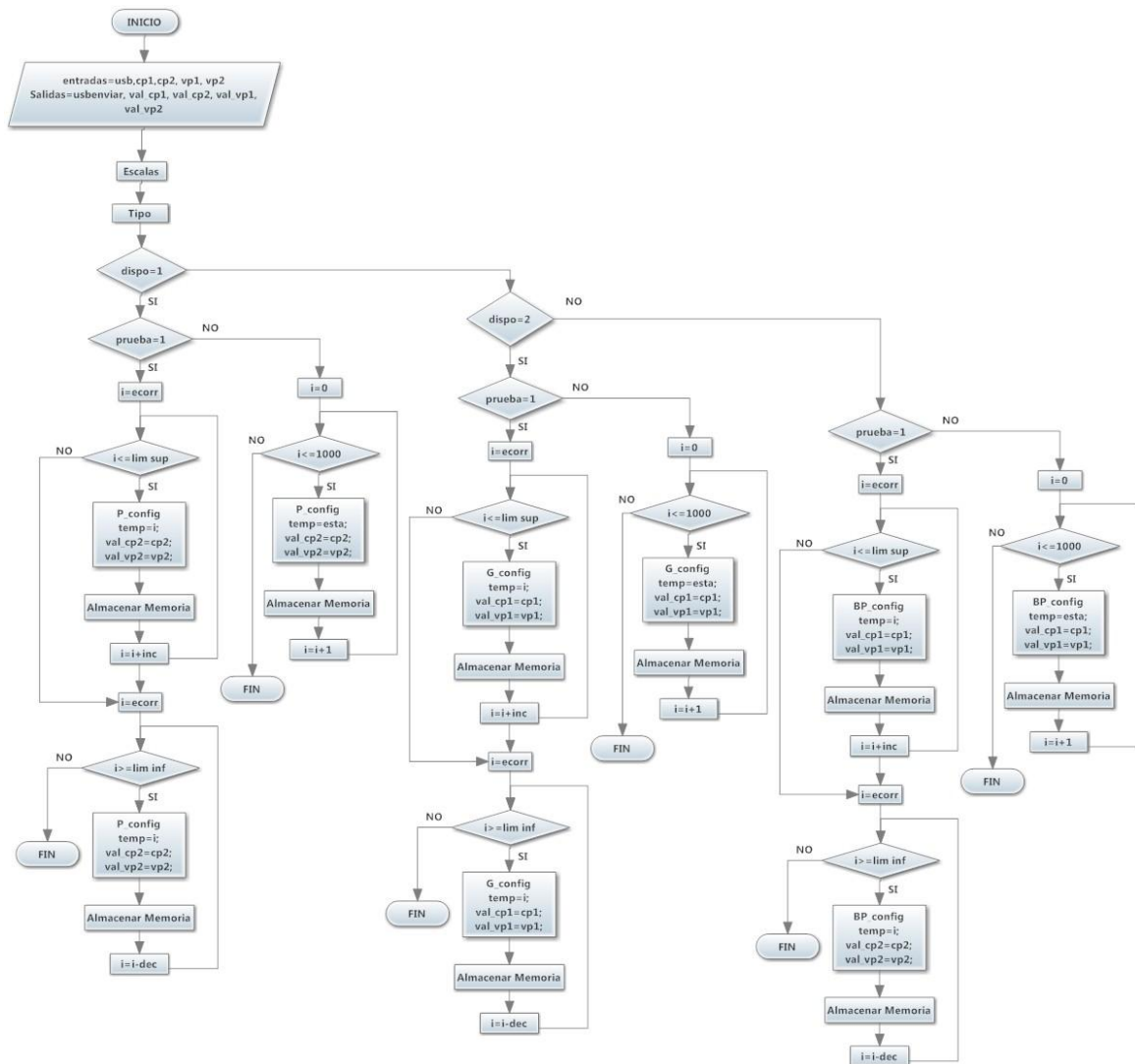
- Establecer comunicación con el computador.
- Comunicarse con la memoria microSD.
- Comunicarse con los DAC's .
- Convertir tensión de analógica a códigos digitales.
- Controlar los interruptores para el manejo de las escalas y la selección de dispositivo (o modo de operación).

Para realizar esta lista de tareas, se siguió el diagrama de flujo mostrado en la Figura 30. Donde se encuentra la lógica secuencial principal que debe seguir el micro controlador llamada “*Main*”. Este diagrama de flujo se divide en tres ramas principales: la lógica necesaria para configurar el modo Potenciostato, el modo Galvanostato y el Modo Bipotenciostato.

La primera rama (a la izquierda de la Figura 30), corresponde al modo potenciómetro; para el cual, después de que el μC recibe la orden de selección de dispositivo, de escalas y de medir el punto inicial (E_{corr} e I_{corr}) (Ver Anexo G), pregunta primero si se hará una prueba estática (0) o dinámica (1); si la respuesta es afirmativa, se toma el “Punto Inicial” y comienza a realizar la prueba (con los límites del barrido y el paso configurados como se muestra en el Anexo G). Esta prueba dinámica envía primero un barrido creciente desde los puntos iniciales y luego un barrido decreciente desde este mismo punto.

Si la respuesta es negativa, el μC espera a que el usuario seleccione un valor de excitación al sistema en la perilla estática de la plataforma de monitoreo (ver Figura 28) y lo realiza durante mil ciclos. Además, a medida que van avanzando las pruebas se almacenan los datos recolectados en la memoria μSD .

Figura 30. Diagrama de flujo de la programación del μC



La segunda rama del diagrama de flujo de la Figura 30 muestra la lógica secuencial de modo de operación del Galvanostato donde se realizan básicamente el mismo procedimiento que en el potencióstato con la diferencia de que se usan recursos diferentes del μC (Pines).

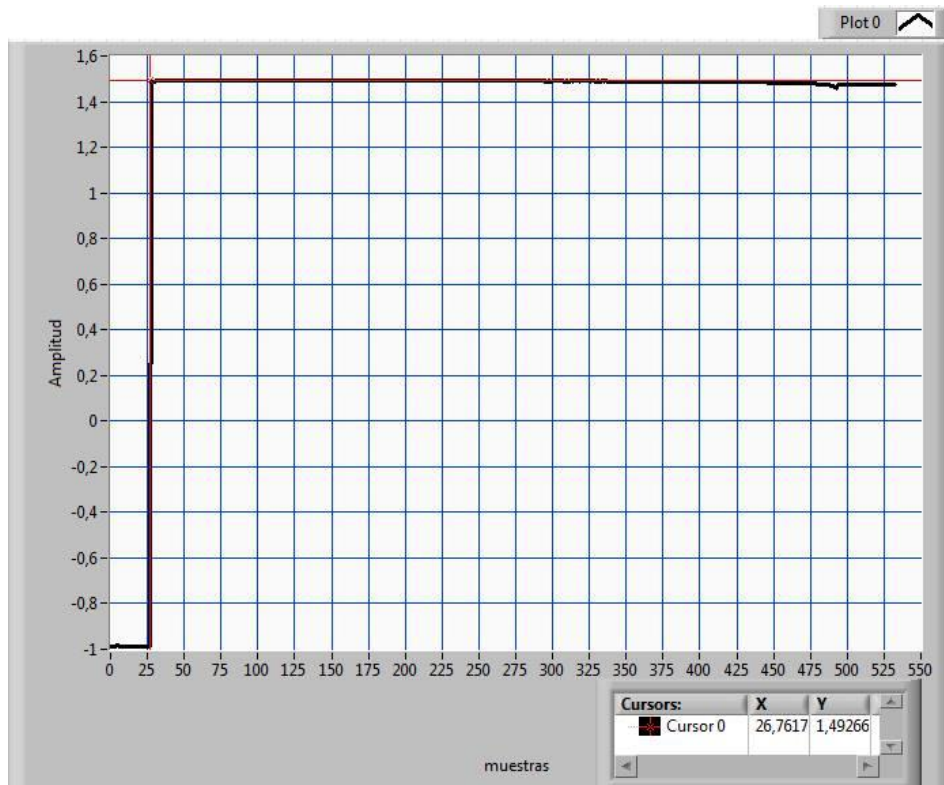
La tercera rama del diagrama de flujo (a la derecha de la Figura 30) muestra la lógica del modo de operación de Bipotenciostato, el cual difiere de las dos ramas descritas anteriormente en que: la primera parte de la prueba el μC utiliza los recursos del galvanostato para realizar un barrido creciente desde el “punto Inicial” y luego usa los recursos del potenciostato para hacer un barrido decreciente desde el mismo punto.

6.3 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO

Se hicieron dos pruebas para comprobar el funcionamiento de la interfaz gráfica y la programación del micro controlador ya acoplados con las tres tarjetas diseñadas.

En primer lugar se operó el equipo en modo potenciostato y se hizo una prueba estática en la que se excitó el sistema con una tensión fija de 1,46 [V] durante un minuto y se graficaron los resultados guardados en la memoria μSD .

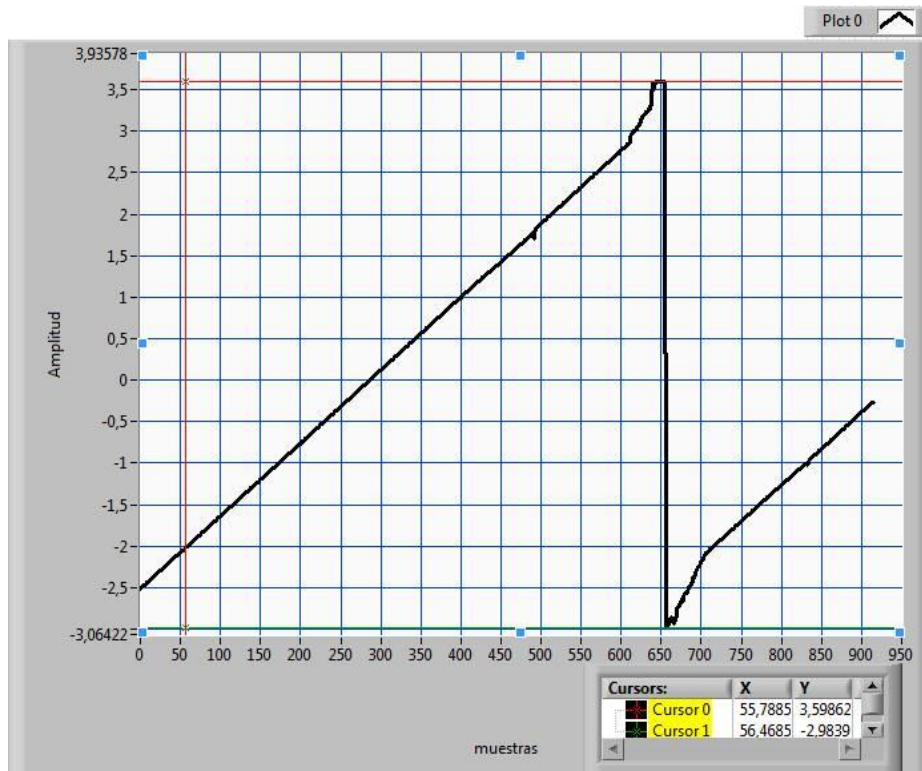
Figura 31. Gráfica en LabVIEW de la prueba estática.



Como se observa en la Figura 31, se graficó la amplitud del dato respecto al número de muestras y el valor resultante es de 1,492[V] arrojando un error en la medida de 2%, este error está dentro de rango esperado, si se tiene en cuenta, que las ecuaciones 1 y 2 con las que se trataron los datos son aproximaciones derivadas de una calibración del equipo en la que los instrumentos de medición utilizados agregan este nivel de incertidumbre.

A continuación se hizo una prueba dinámica, también en modo potencióstato, en el que se envió un barrido de tensión que va desde $-V_{REF}$ hasta V_{REF} (Tensión de referencia del DAC8831) y se graficaron los resultados.

Figura 32. Gráfica en *LabVIEW* de la prueba Dinámica.



En la Figura 32 se muestran los resultados de la prueba dinámica realizada en los que se evidencia que el conversor DAC8831 pierde linealidad en los extremos, por lo que se decidió limitar el intervalo de operación del equipo de -2[V] a 2[V] para garantizar que los datos correspondan con los valores esperados,

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Se entregó un instrumento funcional que opera en tres modos diferentes: Potenciostato, Galvanostato y Bipotenciostato al cual le fueron practicadas varias pruebas para caracterizar y comprobar su correcto funcionamiento para los tres modos de operación.
- Se implementó un sistema de tres tarjetas de dos capas (circuitos impresos) interconectadas entre sí, en las que se buscó el mejor diseño posible para optimizar espacio y costos en cada una de ellas. Se optó por esta configuración porque así se facilita el seguimiento de señales, la corrección de errores y reemplazo de elementos dañados sin comprometer el funcionamiento de todas las etapas o bloques que componen un equipo de este tipo.
- Mediante una cuidadosa comparación de los Micro controladores ofrecidos en el mercado actualmente, se logró acoplar al equipo, expuesto en este documento, el controlador que más se ajusta a las necesidades del proyecto, ya que el sistema de desarrollo *Stellaris Launchpad* LM4F120 (de *Texas Instrument*), no solo es el de menor costo sino que es lo suficientemente robusto para realizar las tareas requeridas y ofrece, como una ventaja frente a sistemas de desarrollo similares de otros fabricantes, la opción de ser programado mediante la herramienta *Energía IDE* que es un software de código abierto y libre (no requiere licencia para su uso).
- La tarjeta *Stellaris Launchpad* utilizada para el control del equipo tiene integrada una conexión que convierte uno de los bloques de comunicación serial UART del controlador en una comunicación USB lo que permitió una fácil conexión del instrumento con el computador mediante este protocolo de comunicación,

además, la plataforma *Energía IDE* permitió enviar las ordenes que se necesiten al controlador mediante programación en lenguaje C.

- Los porcentajes de error existentes en la generación y medición de señal están dentro de los rangos esperados, teniendo en cuenta la resolución del DAC8831 de 16 [Bits] (Teóricos) y de los ADS del micro controlador de 12 [Bits] (Teóricos) que no exceden el 4%, lo que garantiza tanto una buena precisión de los datos adquiridos como la repetibilidad de los resultados obtenidos.
- Se entrega una interfaz gráfica elaborada en *LabVIEW* capaz de comunicarse, a través del puerto USB de cualquier computador, con la tarjeta *Stellaris Launchpad* para enviarle órdenes y programar el micro controlador para poner en funcionamiento el equipo. Con esta plataforma el usuario puede comprobar el funcionamiento del equipo para cualquier modo de operación.
- La interfaz gráfica desarrollada en *LabVIEW* tiene el propósito de mostrar el funcionamiento de cada uno de los modos de operación del equipo, es por esto que la plataforma está sujeta a cambios futuros para que realice las pruebas que se necesiten en un laboratorio.
- El dispositivo inicialmente fue diseñado empleando conversores externos a la stellaris, pero dado que la resolución de los conversores internos es lo suficientemente buena para la implementación de este proyecto, se optó por dejar estos para no aumentar el costo.
- Fue necesario colocar, entre la salida de cada canal del OPA2727 y tierra, resistencias de carga para evitar que la tensión analógica generada por los DAC8831 tuviera oscilaciones indeseadas que pueden dañar el funcionamiento del sistema digital; se hicieron varias pruebas y se encontró que para un valor

de 100 $[\Omega]$ (con resistencias de precisión de 0,1%) las oscilaciones desaparecieron casi completamente.

- El equipo desarrollado en este proyecto trabaja en el rango de tensión de ± 2 [V], maneja cuatro escalas de corriente que son ± 2 [mA], ± 200 [μ A], ± 20 [μ A] y ± 2 [μ A] y soporta cargas cuya impedancia equivalente está en el rango de 1[K Ω] hasta 1[Meg Ω].

8. RECOMENDACIONES

- Para elevar la precisión de los datos en la etapa de adquisición, en trabajos futuros, es necesario implementar conversores Analógico Digitales (ADC) externos al micro controlador que cuenten con mayor resolución y rutinas de calibración para ajustar sus curvas características a las necesidades de la aplicación, además, estos conversores suelen trabajar con referencias de alta precisión que garantizan una mejor conversión de las señales; y de esta forma eliminar la etapa de acondicionamiento de señal.
- La programación del dispositivo está diseñada para que desde un equipo de cómputo externo se envíen señales de configuración de las pruebas; Se agregó una memoria μ SD para que dicho equipo no se mantenga ocupado durante las tareas que realice el instrumento, que pueden durar prolongados periodos de tiempo. Se podría añadir al equipo un módulo *Bluetooth* para darle mayor conectividad y mejorar el funcionamiento del instrumento desarrollado utilizando, en lugar de un computador personal (PC), un dispositivo móvil para que haga el control.
- Para trabajos futuros, la interfaz gráfica debe ser acondicionada de tal forma que se puedan realizar pruebas electroquímicas específicas como las requiera el usuario final, que en este caso es el laboratorio de corrosión de la Escuela de Metalúrgica de Universidad Industrial de Santander. Ya que en esta tesis se dio un mayor énfasis en mostrar todos los recursos del dispositivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TEXAS INSTRUMENTS. Hoja de datos DAC8831. Disponible en www.ti.com
- [2] TEXAS INSTRUMENTS. Hoja de datos REF5030. Disponible en www.ti.com
- [3] ING. J. A. Cala, “Diseño, simulación y caracterización de un bipotenciostato de precisión”, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [4] R. A. Cañas, “Generación, adquisición y visualización de señales para un potenciostato de precisión”, Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [5] ANALOG DEVICES. Hoja de datos ADG1413. Disponible en www.analog.com
- [6] ANALOG DEVICES. Hoja de datos ADG1419. Disponible en www.analog.com
- [7] TEXAS INSTRUMENTS. Hoja de datos OPA192. Disponible en www.ti.com
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. Hoja de datos OPA4140. Disponible en www.ti.com
- [9] TEXAS INSTRUMENTS. Guía de Usuario *Stellaris Launchpad*. Disponible en www.ti.com
- [10] Ronald W Larsen, LabVIEW for Engineers, 1st ed. Pearson, 2011

BIBLIOGRAFÍA

ANALOG DEVICES. Hoja de datos ADG1419. Disponible en www.analog.com

_____. Hoja de datos ADG1413. Disponible en www.analog.com

CALA, J. A. “Diseño, simulación y caracterización de un bipotenciostato de precisión”, Universidad Industrial de Santander, 2011.

R. A. Cañas, “Generación, adquisición y visualización de señales para un potenciostato de precisión”, Universidad Industrial de Santander, 2012.

LARSEN, Ronald W. LabVIEW for Engineers, 1st ed. Pearson, 2011

TEXAS INSTRUMENTS. Guía de Usuario *Stellaris Launchpad*. Disponible en www.ti.com

_____. Hoja de datos DAC8831. Disponible en www.ti.com

_____. Hoja de datos OPA192. Disponible en www.ti.com

_____. Hoja de datos OPA4140. Disponible en www.ti.com

_____. Hoja de datos REF5030. Disponible en www.ti.com

ANEXOS

ANEXO A. Selección del microcontrolador

A continuación en la Tabla 11. Se presenta el cuadro comparativo de las características más relevantes para la aplicación de los Micro controladores ofrecidos en el mercado local y que pueden llegar a cumplir con las especificaciones deseadas.

Tabla 11. Familias de Micro-controladores (μ C)

Micro Controlador	Familia	ADC (Bits)	SPI (Canales)	Conversión Uart/USB	Numero Pines	Software de Desarrollo	Precio(USD)
MCF51QE128	Freescale	12	2	NP ³¹	64	Code Warrior	2.88
LPC1768	Mbed	12	2	SP ³²	40	PW ³³	54.95
Stellaris LM4F120H5QR	T.I.	12	4	SP	40	Code Composer Studio Energia	12.99
PIC18F4550	Microchip	10	2	NP	40	MicroC PRO	10

Como se observa en la Tabla 11, todos los μ C's seleccionados cuentan con una cantidad de pines suficiente para desarrollar la aplicación; También se hace evidente que todos ellos tienen una resolución de 12 [bits] en los ADC, exceptuando el PIC18F4550 que solo posee 10 [bits], esta cantidad de bits resulta

³¹ No presenta este parámetro en su hoja de datos.

³² SI presenta este parámetro en su hoja de datos

³³ Página web del fabricante <http://developer.mbed.org>

suficiente para la adquisición de las señales analógicas que vienen del circuito potencioestático sin el riesgo de perder muestras.

De lo anterior se puede inferir que los aspectos más importantes para seleccionar el μ C son:

El costo: A primera vista parece que el μ C ofrecido por *Freescale*, el MCF51QE128, es el más barato, apenas USD 2.88, pero este valor solo se refiere al integrado del μ C, es decir, no tiene en cuenta el costo del circuito de la comunicación USB, ni el valor de la PCB (*Print Circuit Board*) que se debe diseñar para poder usarlo; algo similar ocurre con el μ C de Microchip, el PIC18F4550, el cual tiene un precio más elevado y es necesario adquirir la programadora PICKIT 2 o 3 que oscilan entre los USD 50 y USD 60 para poder cargar los códigos en él.

Conversión UART/USB: Es importante que el μ C tenga este arreglo que se encargan de hacer la conversión de serial UART a USB, debido a que la comunicación del μ C con su software de desarrollo y con LabVIEW se debe hacer por USB; De los μ C presentados en la Tabla 11 los que poseen esta característica son el LPC1768 de *Mbed* y la *Stellaris* LM4F120H5QR de Texas Instruments.

Plataforma de desarrollo: Se entiende por plataforma de desarrollo al *software* que los fabricantes de determinado μ C proporcionan para llevar a cabo la programación del mismo. Se consideró este aspecto como uno de los más importantes ya que en las facilidades de manejo, librerías y módulos pre-programados que se tengan radica en gran medida la amigabilidad del *software*, haciendo que el desarrollo de la aplicación sea más rápido, fácil y eficiente.

ANEXO B. Selección del conversor digital/analógico

En la Tabla 12 se muestran algunos conversores ofrecidos en el mercado con las características que se consideraron más relevantes para la aplicación.

Tabla 12. Comparativo de Conversores Digital/Analógico (DAC)

Componente	Resolución (Bits)	Canales	Encapsulado	Protocolo	output noise [1/Hz]	precio (USD/1k u) ³⁴	Fabricante
DAC1282	24	1	tssop	SPI	1,5 [uv]	24,85	Texas
DAC1280	24	1	tssop	<i>Bitstream</i>	No Reporta	18,45	Texas
DAC9881	18	1	vqnf	SPI	30 [nv]	16,9	Texas
DAC8532	16	2	vssop	SPI	No Reporta	5,35	Texas
MAX5621	16	16	lqfp	SPI	No Reporta	49,95	Maxim
TLC2758	18	2	lqfp 48	SPI	13 [nv]		Linear
DAC8831	16	1		SPI	10 [nv]	7,94	texas

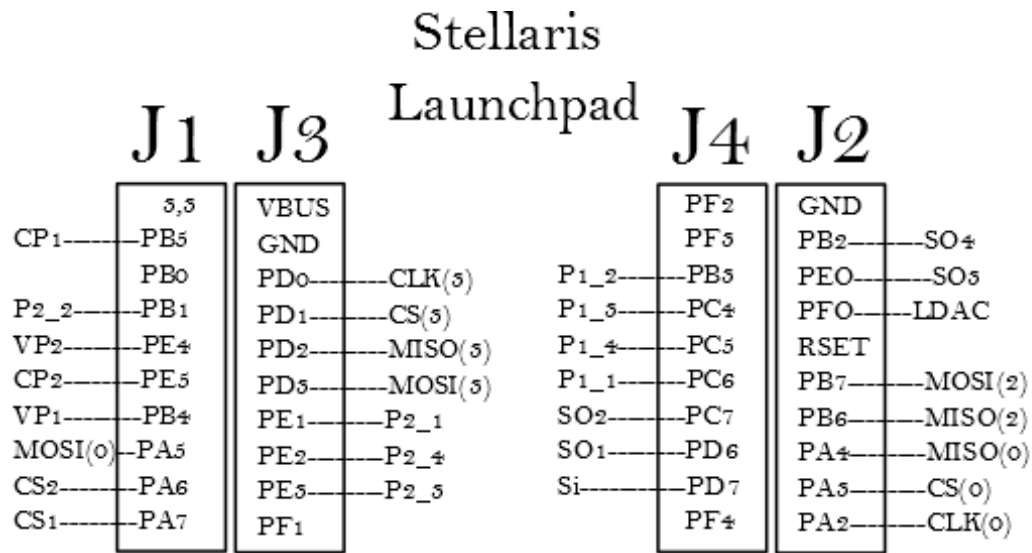
Como se observa en la Tabla 12, el conversor que más se ajusta a los requerimientos del proyecto, es el DAC8831 el cual a pesar de no tener el máximo de bits de resolución es el que menos nivel de ruido presenta, su precio es bajo comparándolo con los demás y ofrece una configuración para trabajar con tensiones bipolares.

³⁴ Precio en dólares por cada mil unidades

ANEXO C. Acople de la Stellaris Launchpad

Se elaboró un circuito impreso para facilitar el acceso a los pines de la tarjeta *Stellaris Launchpad* distribuyéndolos en cuatro bloques de conectores que transportan las señales a las demás tarjetas a través de tres correas. Un bloque contiene las salidas del protocolo SPI de 16 [bits] que controla los DAC8831 y los pines de entrada de los conversores análogo digitales de la *Stellaris Launchpad* que corresponden a las señales que se miden de la celda electroquímica; un segundo bloque contiene todas las señales que irán hacia los pines digitales de los interruptores para su control, siendo estas básicamente altos o bajos; un tercer bloque consta de las señales que componen el protocolo SPI de 8 [bits] que maneja la memoria micro SD. En la Figura 33 se muestra el uso de pines de la *Stellaris Launchpad* necesarios para el desarrollo de este proyecto.

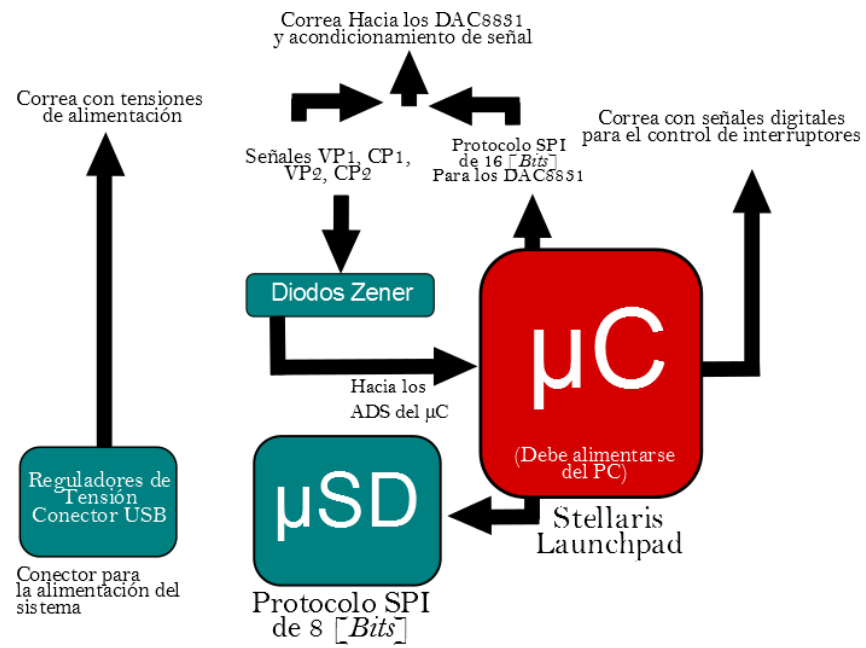
Figura 33. Distribución y uso de pines de la *Stellaris Launchpad*.



P1_1, P1_2, P1_5, P1_4-----Señales de "switched" del Potenciostato 1
P2_1, P2_2, P2_5, P2_4-----Señales de "switched" del Potenciostato 2
Si, SO1, SO2, SO5, SO4-----Señales de "switched" para el modo de operación
VP1, CP1, VP2, CP2-----Convertores Analógicos/digitales
CS1, CS2, CLK(0), LDAC, MOSI(0)-----Protocolo SPI para el control de los DAC8851
CS(5), CLK(5), MISO(5), MOSI(5)-----Protocolo SPI para el control de la Memoria Micro SD

Un cuarto bloque de conectores contiene las salidas de tensión que corresponden a la alimentación del instrumento. En la Figura 34 se puede ver el esquema completo de conexión del circuito impreso para acoplar la *Stellaris Launchpad*. También como protección para el micro controlador se agregaron diodos zener de 3.3 [V] entre cada pin de sus conversores análogo digitales para que nunca puedan llegar al μ C tensiones superiores que puedan dañarlo.

Figura 34. Esquema de conexión de la tarjeta de acople y alimentación.



ANEXO D. Resultados caracterización del equipo

CARACTERIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE SEÑAL:

Tabla 13. Generación de tensión de los DAC8831

Dato Enviado [HEX]	Tensión Equivalente teórica [V]		
		EN1 [V]	EN2 [V]
2664	-1,81	-1,78	-1,78
3330	-1,52	-1,48	-1,48
3FFC	-1,22	-1,16	-1,16
4CC8	-0,919	-0,875	-0,874
5994	-0,609	-0,615	-0,615
6660	-0,333	-0,313	-0,329
732C	-0,039	-0,037	-0,038
7FF8	0,27	0,25	0,28
8CC4	0,565	0,570	0,571
9990	0,853	0,869	0,865
A65C	1,16	1,20	1,18
B328	1,47	1,44	1,46
BFF4	1,77	1,76	1,76
CCC0	2,05	2,07	2,06
D98C	2,35	2,36	2,34

A los dos convertidores les llega la misma tensión de referencia de 3 [V] para reducir la diferencia entre las tensiones que genera cada DAC, también, de las mediciones realizadas para la caracterización se encontró que la relación de conversión de tensión de estos integrados no es lineal en los extremos, es decir, en las tensiones cercanas a V_{REF} y $-V_{REF}$ y por eso se excluyeron de la Tabla

10 y del cálculo de la ecuación de la recta que describe el comportamiento de cada DAC. A pesar de que el rango de operación de los conversores se redujo de -2 [V] a 2 [V], como se muestra en la Tabla 13, resulta suficiente para la aplicación; además en este rango los dos conversores generan tensiones prácticamente iguales lo que posibilita controlarlos con una misma ecuación.

En Tabla 14 se observa el porcentaje de error existente entre los valores de tensión teóricos y los medidos a la salida de los DAC8831, específicamente en EN2 (teniendo en cuenta que para EN1 deben ser valores similares), estos porcentajes indican la variación promedio de las señales generadas y que tan precisas son.

Tabla 14. Porcentaje de error para la generación de señal

Tensión teórica [V]	EN2 [V]	Error(%)
-1,81	-1,78	1,65
-1,50	-1,48	1,33
-1,18	-1,16	1,69
-0,890	-0,874	1,79
-0,609	-0,615	0,98
-0,333	-0,329	1,2
-0,039	-0,038	2,5
0,27	0,28	3,7
0,565	0,571	1,1
0,853	0,865	1,4
1,16	1,18	1,7
1,47	1,46	0,68
1,77	1,76	0,56
2,05	2,06	0,48
2,35	2,34	0,42

CARACTERIZACIÓN DE LA ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL:

Se enviaron al sumador del acondicionamiento de señal las tensiones provenientes del circuito potencioestático para conocer exactamente las tensiones que van a llegar a los conversores analógico/digitales del micro controlador. En la Tabla 15 se registran los valores para las salidas del potencioestato 2 en la escala de 1[KΩ] o 3[mA] (teniendo en cuenta que para el potencioestato 1 los valores deben ser iguales bajo las mismas condiciones).

Tabla 15 . Acondicionamiento de la las señales del potencioestato

Señal de entrada al Potencioestato	Señales Bipolares que salen Del Potencioestato		Señales Unipolares que salen del Acondicionamiento	
EN2 [V]	VP2 [V]	CP2 [V]	CP2 [V]	VP2 [V]
-1,78	2,35	-1,72	0,817	2,85
-1,48	2,05	-1,45	0,945	2,63
-1,16	1,76	-1,15	1,09	2,58
-0,874	1,47	-0,844	1,24	2,35
-0,615	1,16	-0,587	1,38	2,26
-0,329	0,878	-0,306	1,51	2,13
-0,038	0,580	-0,00283	1,69	1,95
0,28	0,00	0,00	1,68	1,65
0,571	0,00132	0,580	1,98	1,70
0,865	-0,301	0,878	2,1	1,50
1,18	-0,588	1,15	2,25	1,38
1,46	-0,878	1,44	2,38	1,26
1,76	-1,17E	1,74	2,58	1,10
2,06	-1,45	2,01	2,67	0,947
2,34	-1,75	2,31	2,83	0,813

La señal VP2 es la tensión que arroja el electrómetro del potencioestato y debe ser inversa a la tensión del amplificador de control (EN2), la tensión CP2 corresponde a la salida del amplificador de transimpedancia y debe seguir a la tensión EN2. En

la Tabla 16 se muestra el porcentaje de error entre el valor unipolar teórico esperado en CP2 y el valor medido.

Tabla 16. Porcentaje de error en el acondicionamiento de señal.

Valor Teórico	Valor Medido	Porcentaje de error
CP2[V]	CP2 [V]	Error [%]
0,79	0,817	3,4
0,925	0,945	2,16
1,075	1,09	1,39
1,228	1,24	0,97
1,3565	1,38	1,76
1,497	1,51	0,86
1,648	1,69	2,5
1,65	1,68	1,18
1,94	1,98	2,06
2,089	2,1	0,52
2,225	2,25	1,12
2,37	2,38	0,42
2,52	2,58	2,38
2,655	2,67	0,56
2,805	2,83	0,89

CARACTERIZACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE SEÑAL

Para comprobar y caracterizar el funcionamiento de los ADC del micro controlador se generaron las mismas tensiones para EN2 (señal bipolar) vistas en la Tabla 15, se midió con el osciloscopio la salida del acondicionamiento de señal la tensión CP2 (señal unipolar) y se llevó esta última tensión a los conversores del micro controlador donde mediante la visualización del puerto serial que ofrece *Energía*

IDE se adquirió el numero binario que representa la tensión convertida. En la Tabla 17 se observan estos resultados.

Tabla 17. Caracterización de la Adquisición de señal

Tensión Analógica	Código Hexadecimal	Equivalente decimal del código Hexadecimal
CP2 [V]	CP2[HEX]	CP2[DEC]
0,917	2FF	767
1,07	3B3	947
1,19	466	1126
1,34	51B	1307
1,47	5CF	1487
1,61	68F	1679
1,77	743	1859
1,92	7F7	2039
2,07	8BB	2235
2,20	967	2407
2,35	A1b	2587
2,80	XXX	XXX
2,61	XXX	XXX
2,80	C40	3136
2,95	CF5	3317

Con los datos de la Tabla 17 y el uso de la herramienta de regresión lineal de Excel se produjo la curva característica de los conversores del micro controlador y con ésta se calculó la ecuación que modela su comportamiento.

ANEXO E. Manual de la interfaz para el usuario

Las instrucciones generales que se deben enviar desde la interfaz gráfica hacia el μC son las mismas para cada modo de operación del instrumento, es decir, que para el potencióstato, el galvanostato y el Bipotenciostato es necesario medir el punto inicial, seleccionar la escala de medición y generación, el tipo de prueba y los valores de excitación, por eso, a continuación se expone un breve manual de uso cuando el equipo está funcionando como potencióstato. Teniendo presente que para el resto de modos de operación el proceso similar.

Las Figuras mostradas a continuación han sido modificadas para comentar todas las opciones que el usuario tiene que operar para poner en funcionamiento el equipo y como debe hacerlo.

1. Tipo de dispositivo, el usuario debe seleccionar una de las tres opciones que aparecen en este menú.
2. La opción marcada con este número sirve para seleccionar la escala a la cual se desea trabajar (impedancia que produce cada escala).
3. Indicador de escala, muestra la escala a la que se está trabajando con el dispositivo, también muestra una señal de alerta que le indica al usuario que debe pulsar el botón "Puntos iniciales".
4. Aquí se muestran dos indicadores en los cuales se visualiza el voltaje y la corriente de corrosión.

5. El botón “Puntos iniciales potenciostato” debe pulsarse después de haber seleccionado la escala deseada ya que cuando sea presionado el programa va a pasar medir E_{corr} e I_{corr} .

Figura 35. Parte superior de GUI para el Potenciostato



6. La lista desplegable mostrada con el número 6 garantiza que el usuario escoja uno de los dos Tipos de pruebas (pruebas estáticas o dinámicas).
7. En el indicador “condición de la prueba” muestra señales de alerta si el usuario no ha oprimido el botón inicio.
8. La perilla mostrada con el indicador 8 sirve para seleccionar el nivel de continua deseado en una prueba dinámica.
9. Aquí se muestran las listas desplegables para seleccionar los límites del barrido y el paso de dicho barrido si en el numeral 6 se escoge dinámica.
10. Este botón sirve para dar inicio a la prueba configurada. Dicho botón debe ser presionado después de configurar la prueba.

Figura 36. Parte superior de GUI para el Potenciostato



Figura 37. Diagrama de flujo de la plataforma de *LabView* para el modo Galvanostato

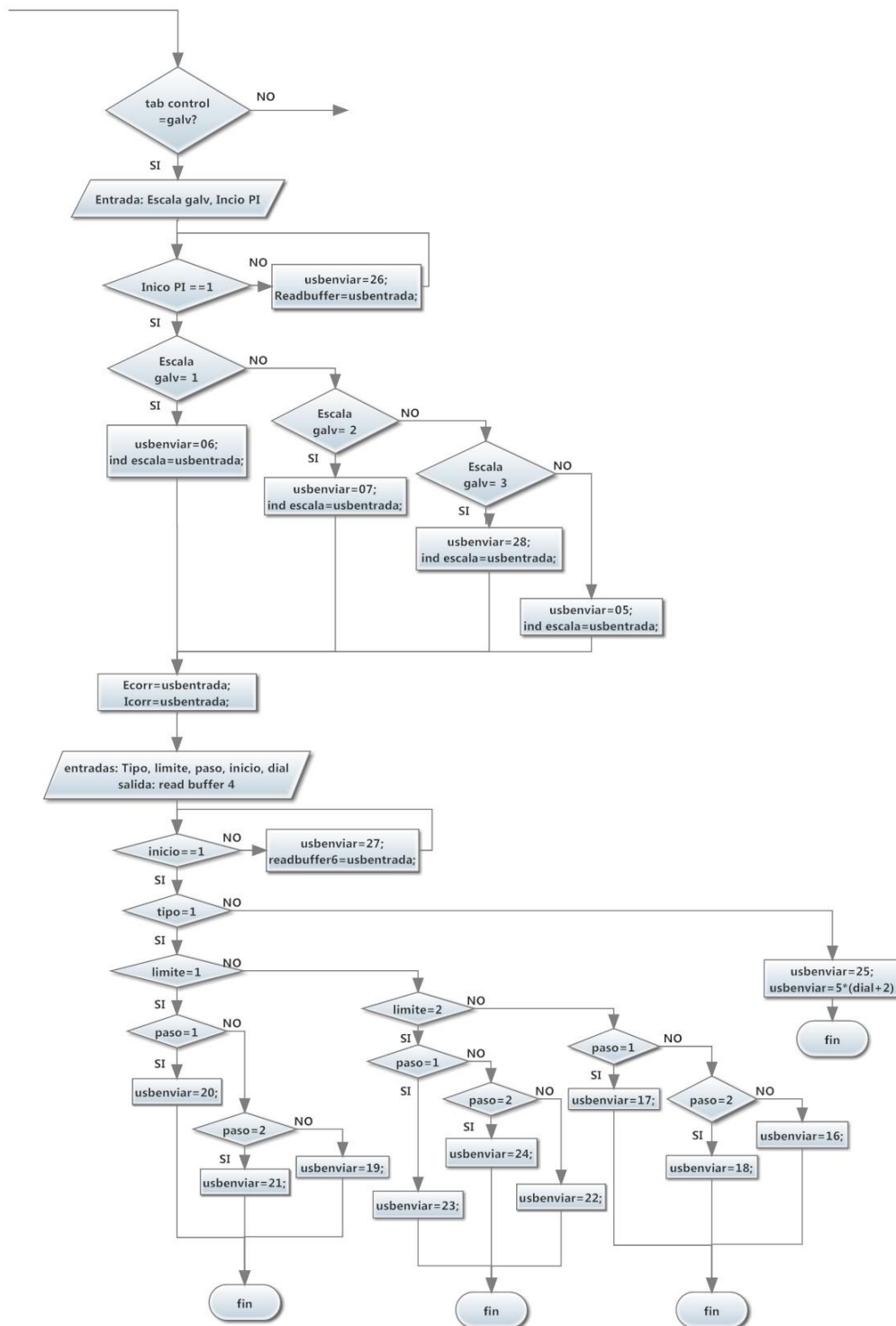
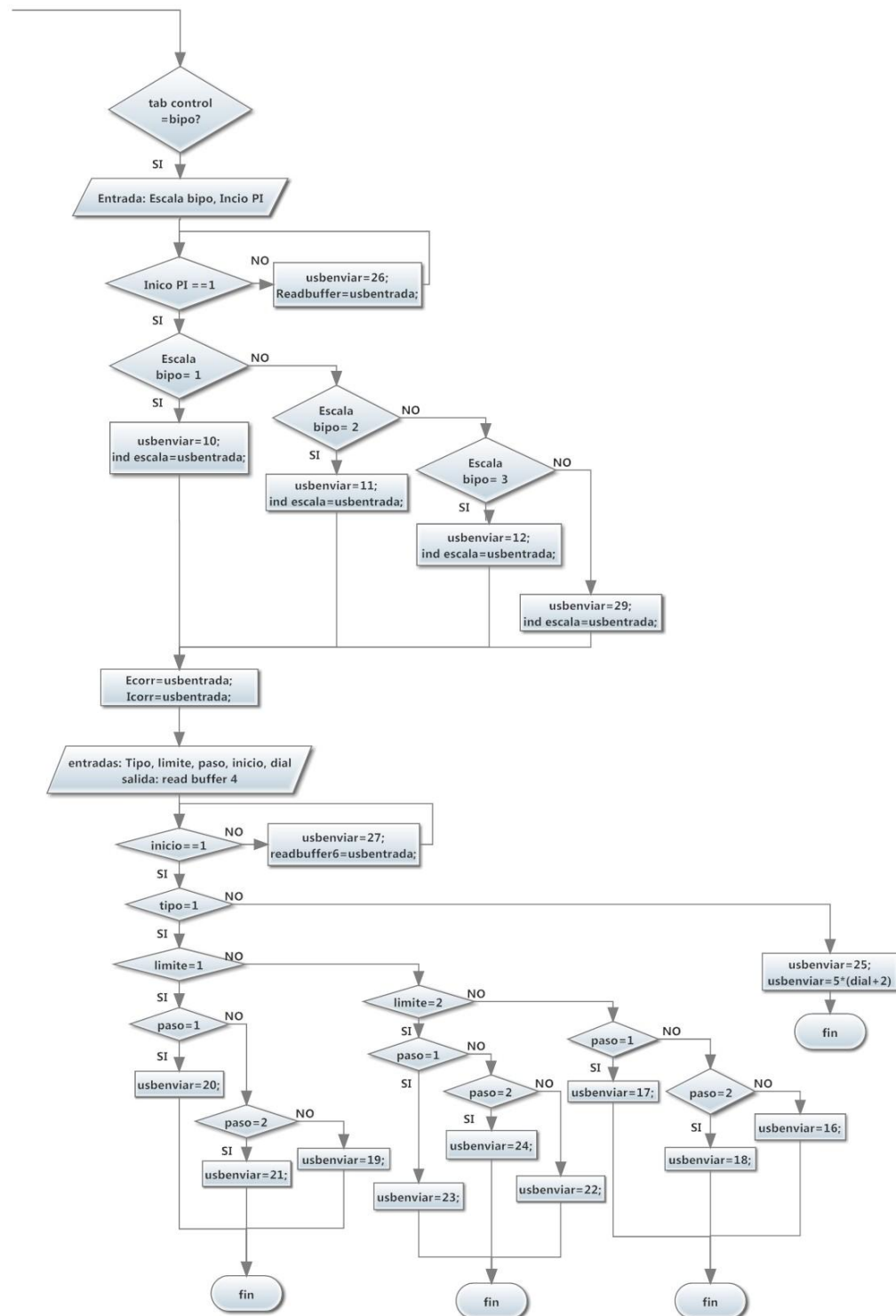


Figura 38. Diagrama de flujo de la plataforma de *LabView* para el modo Galvanostato



ANEXO F. *LAYOUT* de las tarjetas diseñadas

Figura 39. Layout PCB del Sistema digital del equipo (CAPA1)

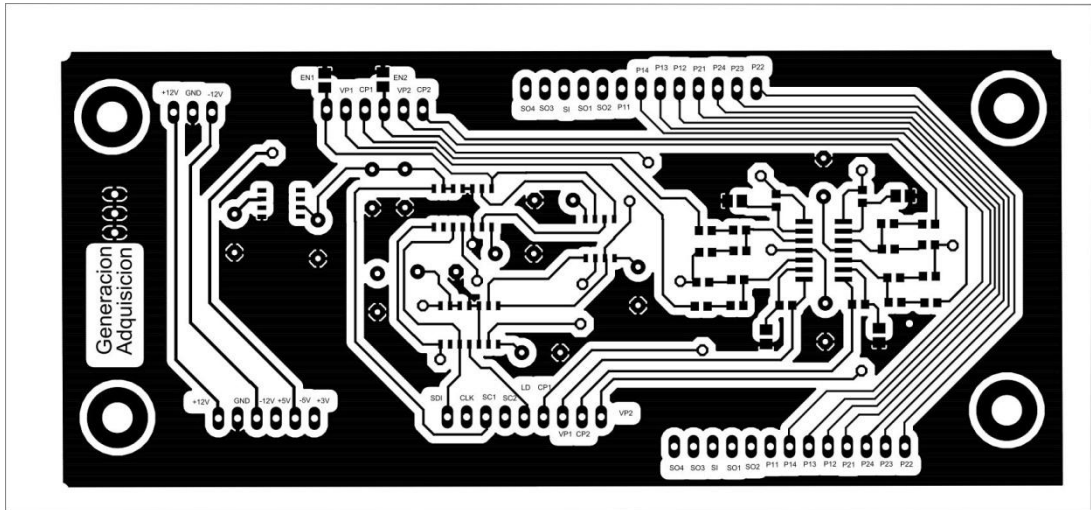


Figura 40. Layout PCB del Sistema digital del equipo (CAPA2)

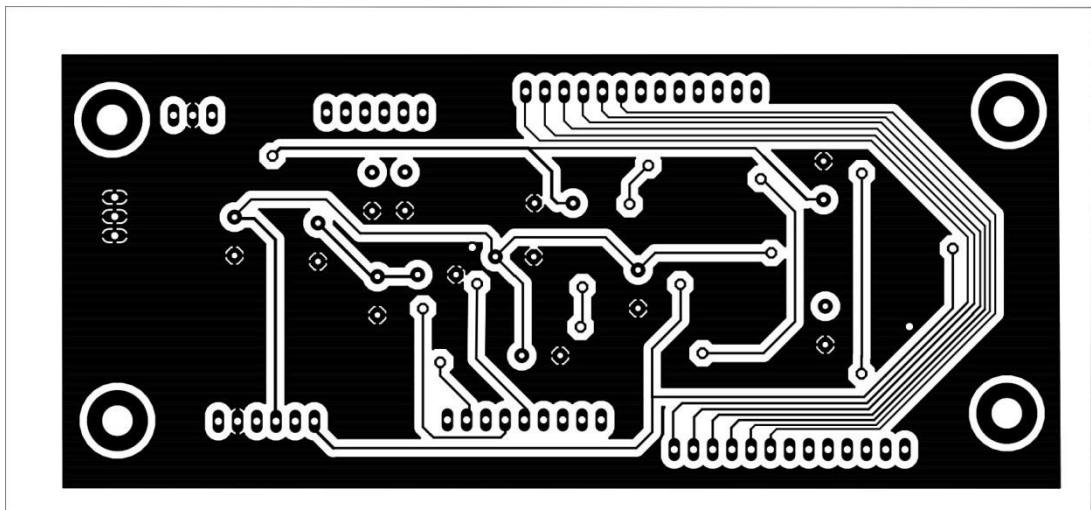


Figura 41. Layout PCB del Acoplamiento de la *Stellaris Lunhcad*, Alimentación y Celda Electroquímica (CAPA1)

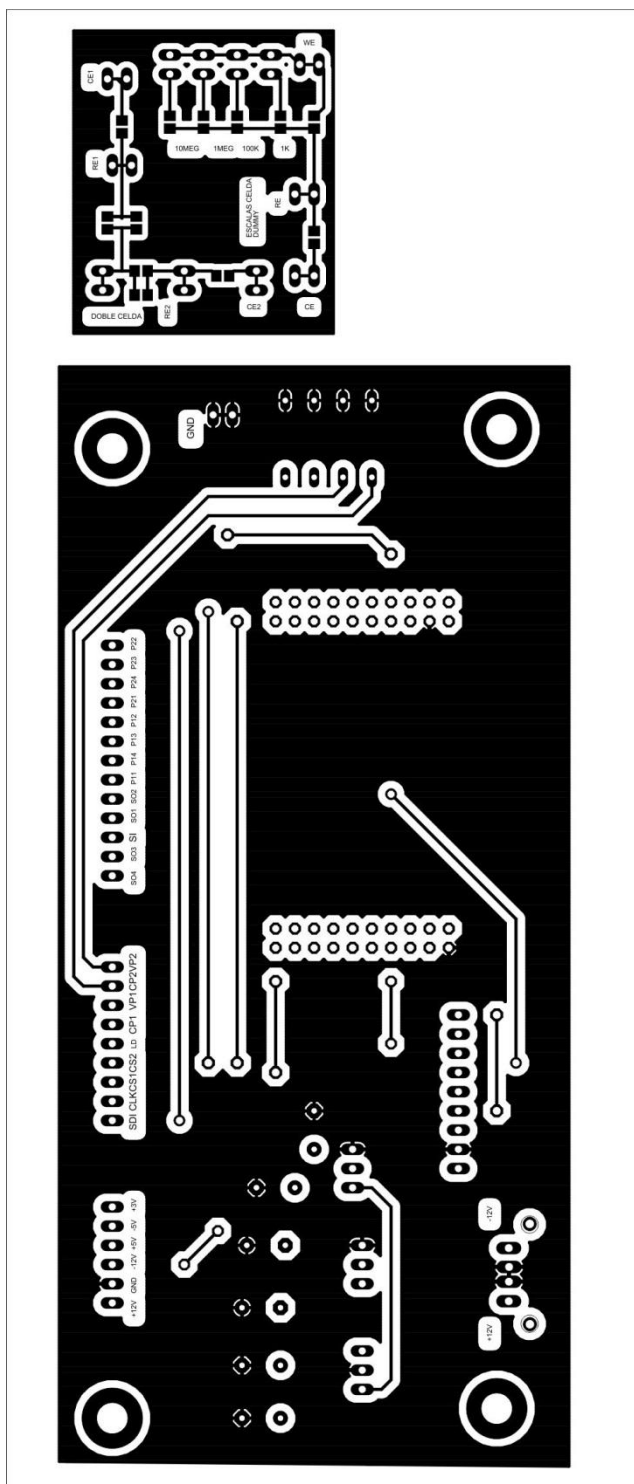


Figura 42. Layout PCB del Acoplamiento de la *Stellaris Lunhcpad*, Alimentación y Celda Electroquímica (CAPA2)

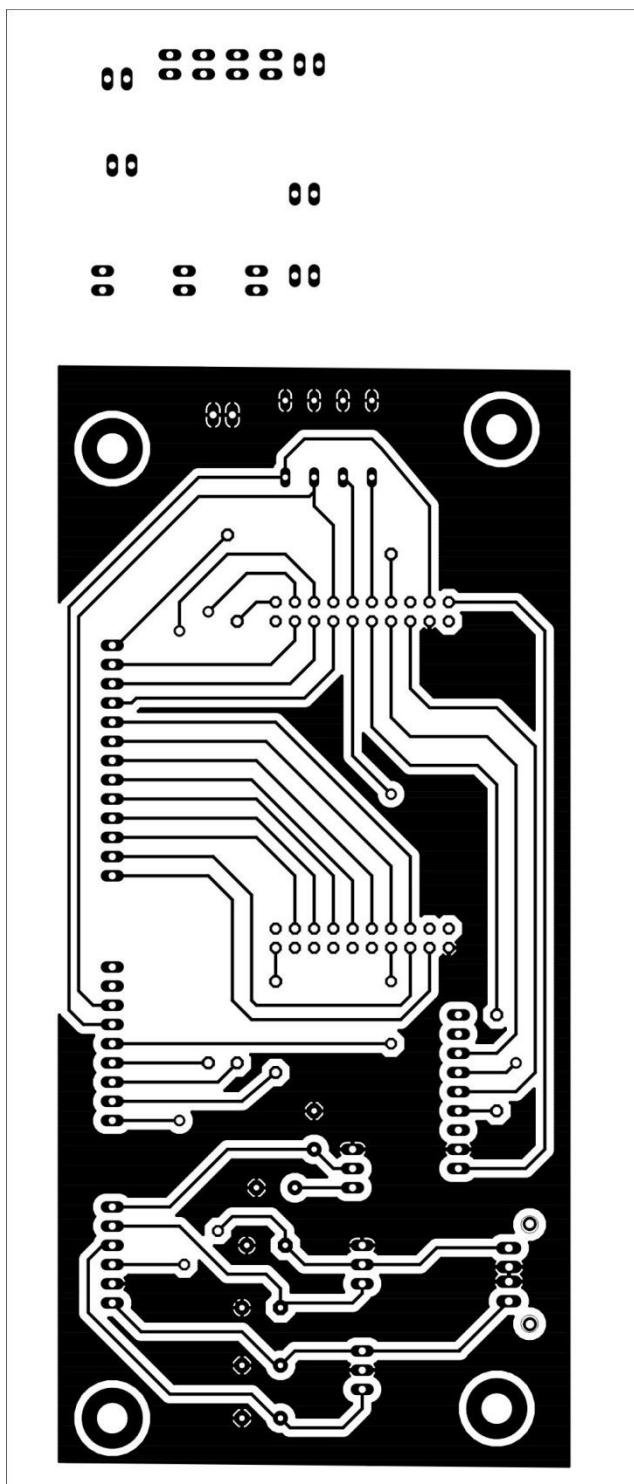


Figura 43. Layout PCB del Sistema analógico (CAPA1)

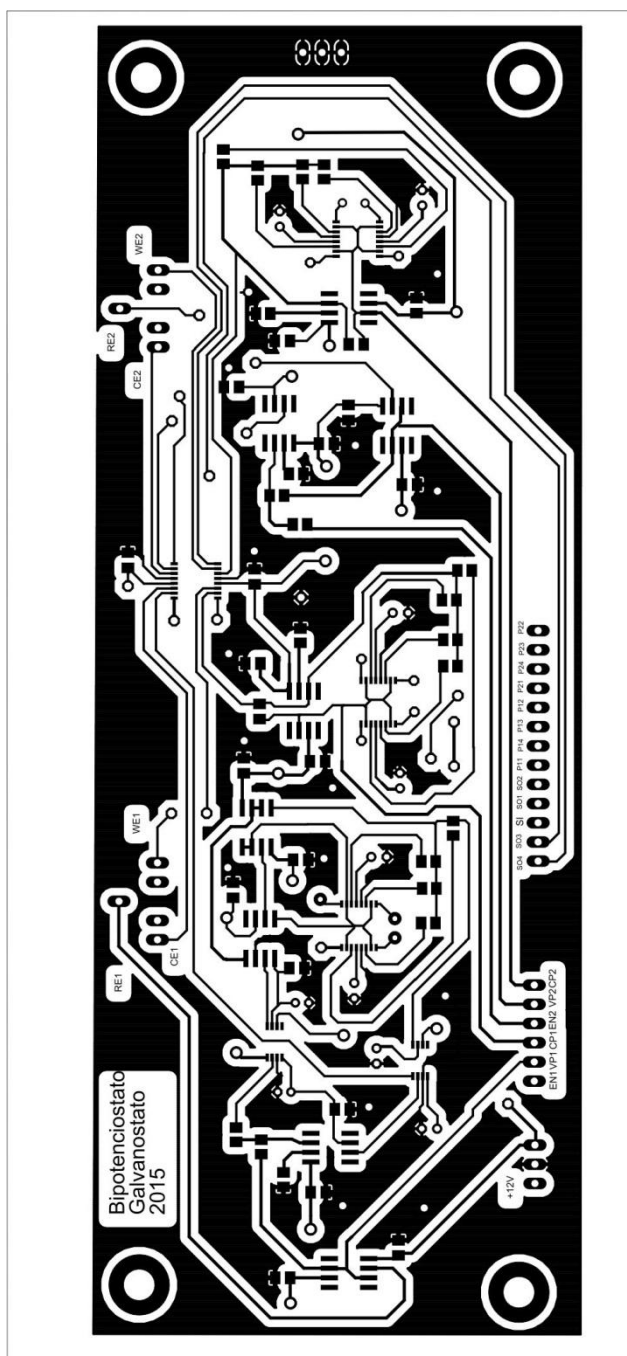
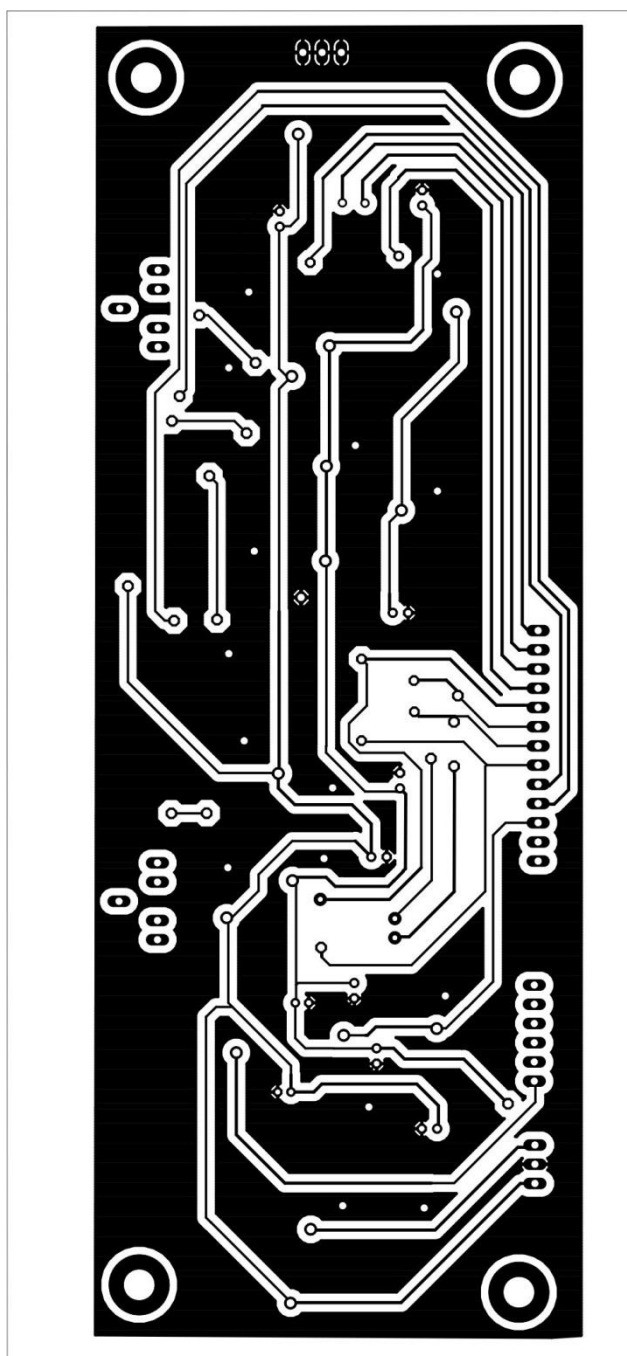


Figura 44. Layout PCB del Sistema analógico (CAPA2)



ANEXO G. Diagramas de flujo para la programación del μ C

En las Figuras 45, 46 y 47, se muestra la función para la configuración de escalas, dentro del μ C, dependiendo de los códigos enviados por la plataforma de monitoreo de *LabVIEW* correspondientes a la Tabla 10.

Figura 45. Escalas para el Potenciostato

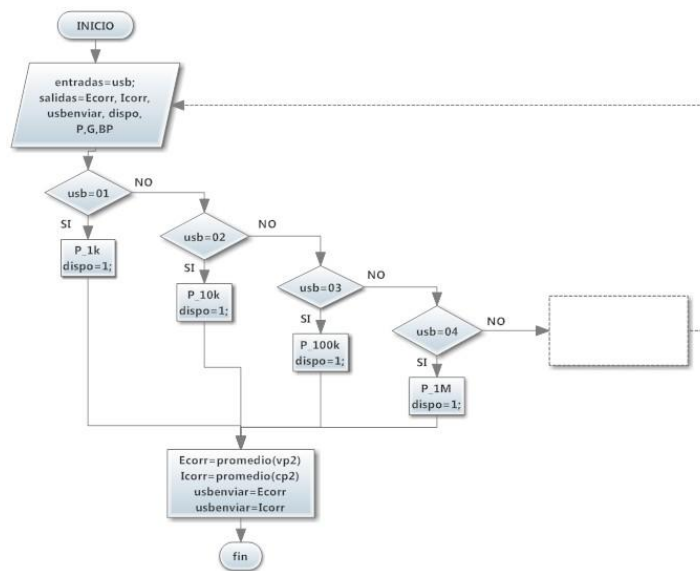


Figura 46. Escalas para el Galvanostato

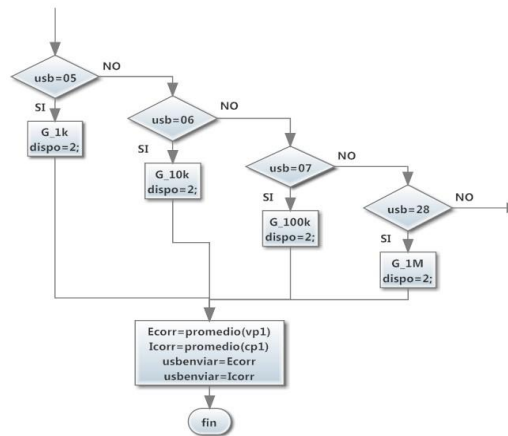
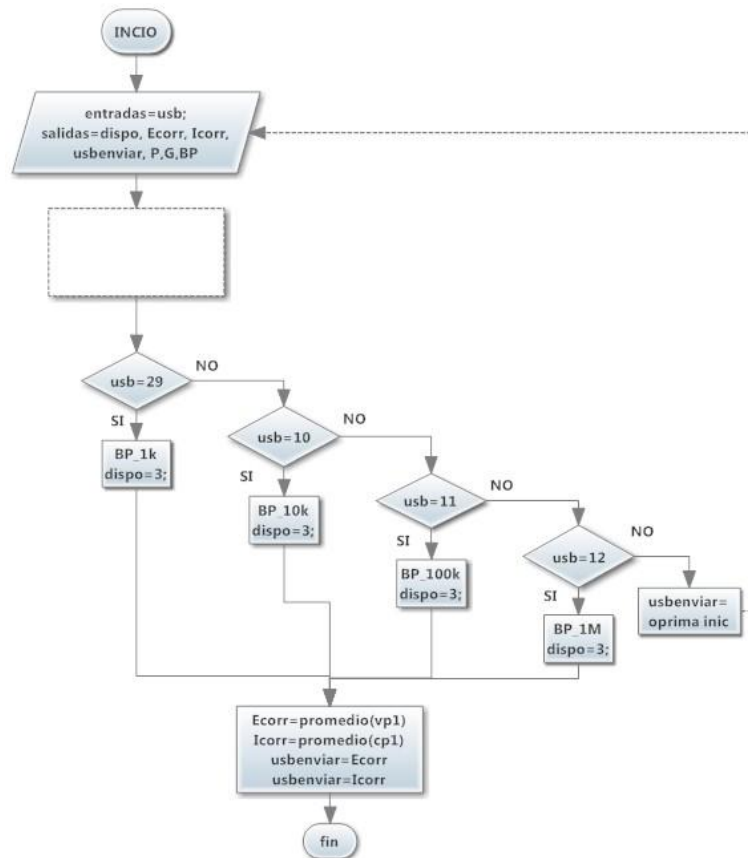


Figura 47. Escalas para el Bipotenciostato



En las Figuras 48,49 y 50 se observa la lógica secuencial para configurar el tipo de pruebas, los límites de la prueba, el paso del barrido para todos los modos de operación del equipo desarrollado; si se llega a seleccionar la prueba estática el micro controlador espera directamente por la orden que le envíe el usuario a través de la plataforma de monitoreo.

Figura 48. Función Tipo (sección 1)

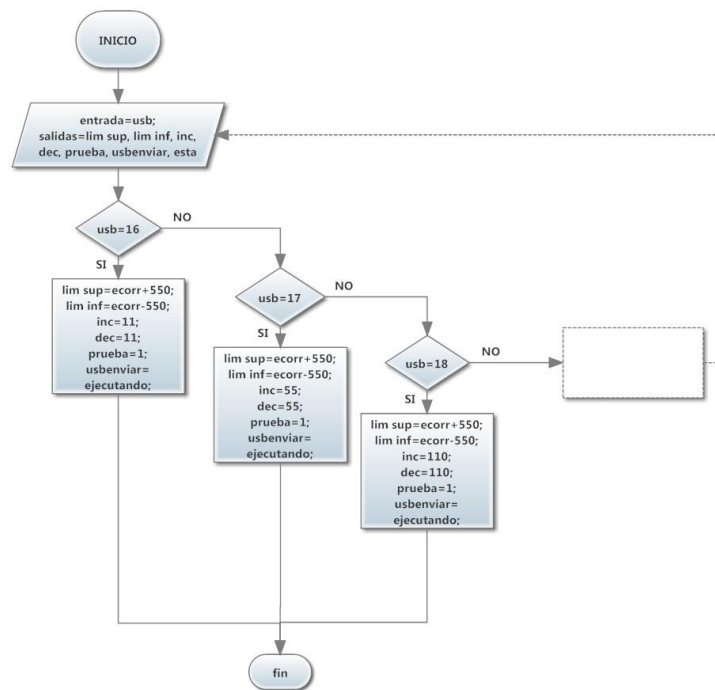


Figura 49. Función Tipo (sección 2)

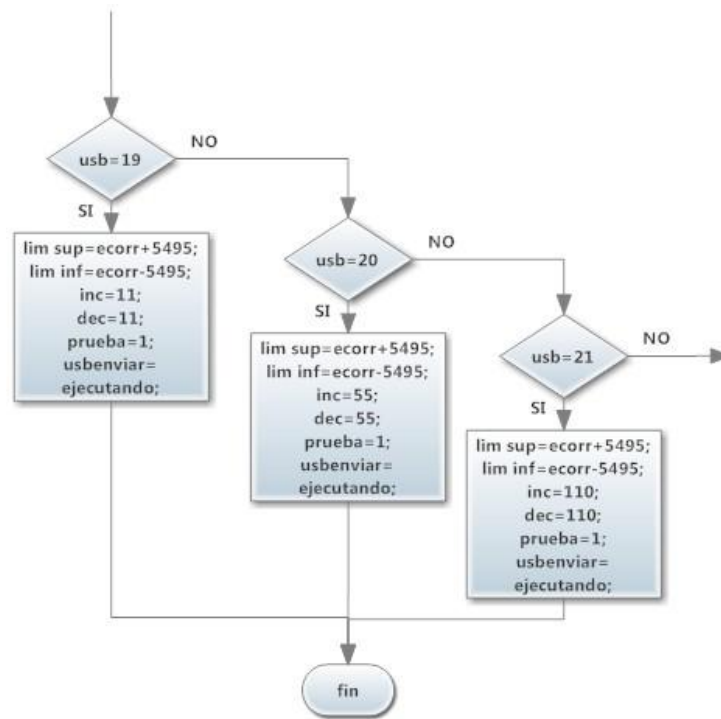


Figura 50. Función Tipo (sección 3)

