

**GENERACIÓN, ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE SEÑALES PARA UN
POTENCIOSTATO DE PRECISIÓN**

RICARDO ADOLFO CAÑAS MENDOZA

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

2013

**GENERACIÓN, ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE SEÑALES PARA UN
POTENCIOSTATO DE PRECISIÓN**

RICARDO ADOLFO CAÑAS MENDOZA

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Director

Ing. MPE. JAIME GUILLERMO BARRERO PEREZ

Codirector

Ing. MsC (C) JAIRO AUGUSTO CALA RODRIGUEZ

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

2013

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos quienes hicieron posible la ejecución de este proyecto, de manera especial al Director de tesis Mpe. Jaime Barrero y el respectivo Codirector Ing. Jairo Augusto Cala, por su confianza y su aporte intelectual.

A la Universidad Industrial de Santander, por los medios proporcionados en su planta física y por la preparación académica que me suministro para llevar a buen término la ejecución de este proyecto.

A mi familia, quien siempre estuvo al pendiente de mi progreso y me alentó continuamente hasta concluirlo.

A Dios, compañero fiel en mi camino, y aliciente en mis diarias luchas, quien desde su palabra me instruye para concluir mis pendientes, pues ya bien allí se encuentra: Eclesiastés 7:8a “Más vale el término de una cosa que su comienzo”.

A mi familia, que a pesar de las adversas circunstancias siempre ha depositado su confianza en cada una de mis empresas, y me anima a continuar de forma incondicional.

A mis más cercanos amigos que con el paso del tiempo se reducen a unos pocos, pero que debido a ello son más valiosos, incondicionales, y por quien vale la pena elevar una plegaría más que ocasionalmente, Jairo Cala, Jhon Pio, y aquellos que conformaron el grupo de investigación donde forje este proyecto; quizá solo aquellos comprenden lo que costó finalizarlo.

Ricardo Cañas.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 CORROSIÓN	16
1.2 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA.....	18
1.3 MODELADO DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA.....	20
1.4 POTENCIAL DE CORROSIÓN.....	22
1.5 POTENCIOSTATOS	23
2. PROGRAMACIÓN EN BAJO NIVEL	25
2.1 GENERACIÓN DE SEÑAL	25
2.1.1 Selección de frecuencia de reloj	26
2.1.2 Protocolo de generación	27
2.1.3 Diagrama de generación.....	27
2.2 ADQUISICIÓN DE SEÑALES.....	28
2.2.1 Consideraciones de control.....	30
2.2.2 Escritura de un registro	31
2.2.3 Lectura de un registro	32
2.2.4 Selección de frecuencia de reloj	32
2.2.5 Puesta a punto del convertidor	34
2.2.6 Adquisición del convertidor	37
2.3 TRANSMISIÓN DE DATOS.....	38
2.4 CONTROL DE RANGOS E INDICADORES.....	39
3. PROGRAMACIÓN EN ALTO NIVEL	41

3.1 JERARQUÍA	42
3.2 PANELES DE CONTROL Y VISUALIZACIÓN	43
4. PRUEBAS Y RESULTADOS	47
5. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Procesos de transformación y corrosión de un metal	17
Figura 2. Comparación de la reactividad de algunos metales.	18
Figura 3. Operación de una celda electroquímica.....	19
Figura 4. Modelo de una celda electroquímica.	20
Figura 5. Capacitancia de doble capa eléctrica para un metal en corrosión.....	21
Figura 6. Impedancia equivalente de la celda electroquímica.	22
Figura 7. Potenciales de electrodo estándar a 25°C.....	23
Figura 8. Diagrama de conexión entre el microcontrolador y el DAC8871	26
Figura 9. Señal de reloj para generación de tensión en el DAC8871	27
Figura 10. Proceso de generación de señal para el DAC8871	27
Figura 11. Diagrama de flujo para la generación de señal de tensión	28
Figura 12. Esquema de adquisición de señal en el ADS1213.	31
Figura 13. Protocolo de escritura de registro.	32
Figura 14. Protocolo de lectura de un registro	32
Figura 15. Diagrama de tiempos para la señal SCLK aplicada al ADS1213.....	33
Figura 16. Características de la señal de reloj f_{SCLK}	34
Figura 17. Señal DRDY por defecto y luego de la puesta a punto.....	35
Figura 18. Diagrama de flujo de la rutina de puesta a punto	36
Figura 19. Proceso de adquisición por canal para la primera muestra.	37
Figura 20. Diagrama de flujo para la adquisición de datos	38
Figura 21. Esquema de transmisión de datos.....	39
Figura 22. Jerarquía de nivel superior para el BISTAT 2012.....	42
Figura 23. Jerarquía multinivel para prueba potencioestática.....	43
Figura 24. Panel de control para prueba potencioestática.....	44
Figura 25. Panel de visualización para prueba potencioestática.	45

Figura 26. Panel de control para la prueba galvanostática.	46
Figura 27. Panel de control prueba potencioestática.	48
Figura 28. Respuesta de tensión para prueba potencioestática.	48
Figura 29. Prueba Tafel Anódica.	49
Figura 30. Barrido de tensión para prueba tafel anódica.	49
Figura 31. Gráfico XY para prueba tafel anódica (abcisa logarítmica).....	50
Figura 32. Prueba de polarización anódica total.....	50
Figura 33. Gráfico XY para la prueba de polarización anódica.....	51
Figura 34. Panel de control para prueba galvanodinámica catódica.....	51
Figura 35. Corriente contra tiempo prueba galvanodinámica catódica.	52
Figura 36. Tensión contra tiempo prueba galvanodinámica catódica.	52
Figura 37. Gráfico XY prueba galvanodinámica catódica.	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rango de fondo escala vs ganancia programable.....	29
Tabla 2. Pines de control para el ADS1213	30
Tabla 3. Rangos de generación y medición del sistema.....	40

RESUMEN

TÍTULO: GENERACIÓN, ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE SEÑALES PARA UN POTENCIOSTATO DE PRECISIÓN*

AUTOR: Ricardo Adolfo Cañas Mendoza**

Palabras Clave: Corrosión, celda electroquímica, potencial de corrosión, potencióstato, galvanostato, adquisición de datos, convertidores digitales analógicos, convertidores analógicos digitales, programación en alto nivel.

En el presente trabajo se describe el proceso de diseño y construcción de un sistema de generación, adquisición y visualización de señales para un potencióstato de precisión, cuyo objetivo fundamental es el de permitir caracterizar procesos corrosivos inherentes a los metales.

Inicialmente se presenta una breve introducción a la teoría de corrosión, comportamiento y modelado de una celda electroquímica, con el fin de comprender los fenómenos electroquímicos que se llevan a cabo en un metal en presencia de un medio acuoso.

Seguidamente se explica la operación de un potencióstato y el diseño e implementación de los módulos de generación y adquisición de señales para su correcto funcionamiento.

Posteriormente se presentan los rangos de generación y medición del sistema, tanto para la operación del equipo en modo potencióstato como en modo galvanostato.

Finalmente, para el control en la generación, la selección del tipo de equipo a utilizar (potencióstato o galvanostato), la visualización e interpretación de los datos adquiridos, se presenta el diseño de la interfaz computarizada que en programación de lenguaje de alto nivel, permitirá realizar las correspondientes pruebas señaladas. Finalmente, para el control en la generación, la selección del tipo de equipo a utilizar (potencióstato o galvanostato), la visualización e interpretación de los datos adquiridos, se presenta el diseño de la interfaz computarizada que en programación de lenguaje de alto nivel, permitirá realizar las correspondientes pruebas señaladas.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Mpe. Jaime Guillermo Barrera Pérez.

ABSTRACT

TITLE: GENERATION, ACQUISITION AND VISUALIZATION OF SIGNALS FOR A POTENTIOSTAT OF PRECISION*.

AUTHOR: Ricardo Adolfo Cañas Mendoza**

KEYWORDS: Corrosion, electrochemical cell, corrosion potential, potentiostat, galvanostat, data acquisition, digital to analog converter, analog to digital converter, high level programming.

This work describes the process of designing and building a generation, acquisition and signal visualization system for a precision potentiostat whose fundamental aim is to permit to characterize corrosive process inherent to metals.

Initially, a brief introduction to the corrosion, behavior and modeling theory of an electrochemical cell, in order to understand the electrochemical phenomena that takes place in the presence of a metal in an aqueous medium.

Then, it is explained the operation of a potentiostat and the design and implementation of modules for generating and signal acquisition for its proper operation.

After that, it is presented the ranges generation and measurement system, both for the operation of equipment in potentiostat mode and galvanostat mode. Finally, for the generation control, selection of the type of equipment to use (potentiostat or galvanostat), visualization and interpretation of the acquired data, it is presented the interface design in programming computerized, that in high-level language, will enable to do the relevant specified tests.

After that, it is presented the ranges generation and measurement system, both for the operation of equipment in potentiostat mode and galvanostat mode. Finally, for the generation control, selection of the type of equipment to use (potentiostat or galvanostat), visualization and interpretation of the acquired data, it is presented the interface design in programming computerized, that in high-level language, will enable to do the relevant specified tests.

* Project of grade

** Faculty of Engineering physicomechanical, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Directed Mpe. Jaime Guillermo Barrera Pérez.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de industrialización involucran la implementación de nuevas tecnologías que buscan como fin último, la optimización de las cadenas productivas. Estas tecnologías, en la mayoría de los casos son implementadas físicamente, razón por la cual se pueden llegar a presentar fallas debido a los procesos corrosivos inherentes a los materiales utilizados, que desembocan en grandes pérdidas económicas ya sea de forma directa o indirecta.

Las pérdidas directas se refieren a la reposición de elementos, maquinarias, tuberías, entre otras, las cuales de alguna manera son cuantificables. Las pérdidas indirectas, son por lo general de una dimensión mayor, ya que pueden involucrar desde el rediseño de un proyecto, pasando por la suspensión de procesos, llegando incluso a generar pérdidas humanas que no son cuantificables.

Algunos estudios sugieren que cada pocos segundos, se disuelven casi 5 toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanómetros o picómetros no perceptibles individualmente, pero que en conjunto representan una cantidad considerable de material. Por lo anterior, el desarrollo de equipos de precisión que permitan la caracterización de un material desde sus estadios incipientes de corrosión se convierte en una herramienta poderosa para los investigadores de la industria de la corrosión.

La escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones en su misión formadora orientada al desarrollo sostenible del país y enfocada a dar respuesta a problemas tecnológicos y económicos de la sociedad colombiana, se compromete a aportar soluciones ingenieriles al sector público y privado cumpliendo con los requerimientos del caso, como lo es el desarrollo del actual proyecto el cual se

enmarca dentro de la caracterización de procesos corrosivos inherentes a los metales.

En el presente trabajo, se dará una breve introducción a la teoría de corrosión, lo cual se considera importante para entender el propósito del proyecto, para luego continuar con la programación realizada en el controlador del sistema, para terminar con una explicación de la programación realizada en alto nivel para la visualización de los datos adquiridos.

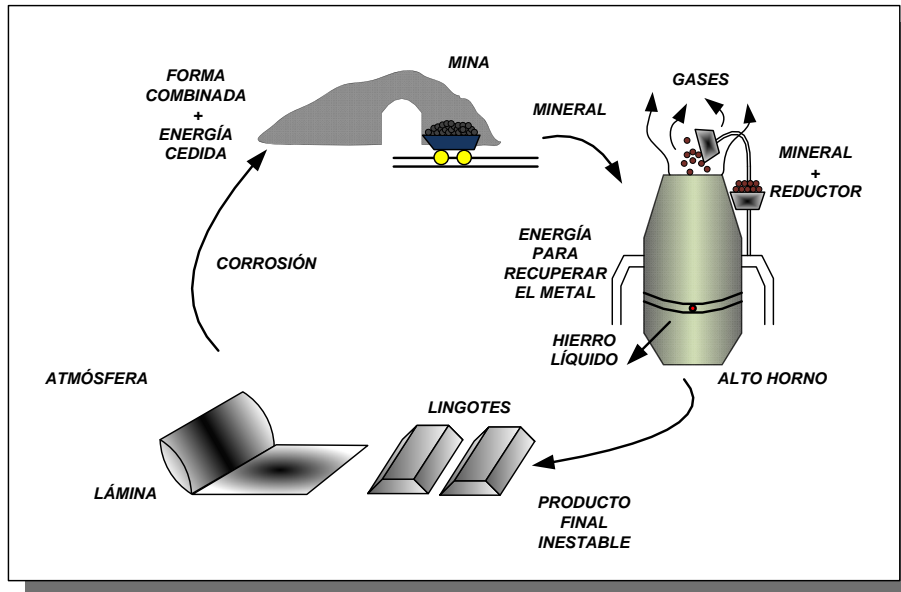
1. MARCO TEÓRICO

Con el fin de entender el objetivo del presente documento, a continuación se relacionarán una serie de conceptos básicos, necesarios para comprender la naturaleza de los fenómenos de corrosión, y de allí entender la importancia de los distintos estudios electroquímicos que se realizan para lograr identificar un problema incipiente de corrosión o para determinar los métodos de control para un problema en desarrollo.

1.1 CORROSIÓN

La corrosión podría definirse de manera sencilla como el ataque destructivo de un metal por la reacción química o electroquímica con el ambiente que lo rodea. Este proceso, es natural e irreversible y ocurre por la transformación de un elemento metálico a un compuesto más estable que es un óxido, según se observa en la figura 1.

Figura 1. Procesos de transformación y corrosión de un metal

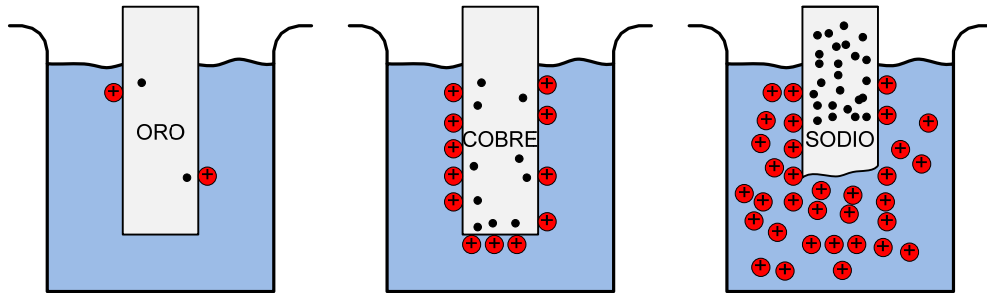


Fuente: Autor

Existen dos tipos de corrosión: la corrosión seca y la húmeda, siendo la primera producida por una reacción química en ausencia de corriente eléctrica, y la segunda cuando hay presencia de una corriente en el medio corrosivo.

La existencia de una corriente eléctrica depende de la presencia de electrones libres, y, en el caso de la corrosión, éstos aparecen a partir de la ionización de los átomos del material afectado. Algunos metales tienen mayor tendencia a perder electrones que otros y a esta característica se le denomina reactividad; los materiales más propensos a corroerse, son aquellos que presentan una mayor reactividad ante un medio específico. A manera de ejemplo, en la figura 2, se muestra la reactividad de algunos metales en el agua.

Figura 2. Comparación de la reactividad de algunos metales.

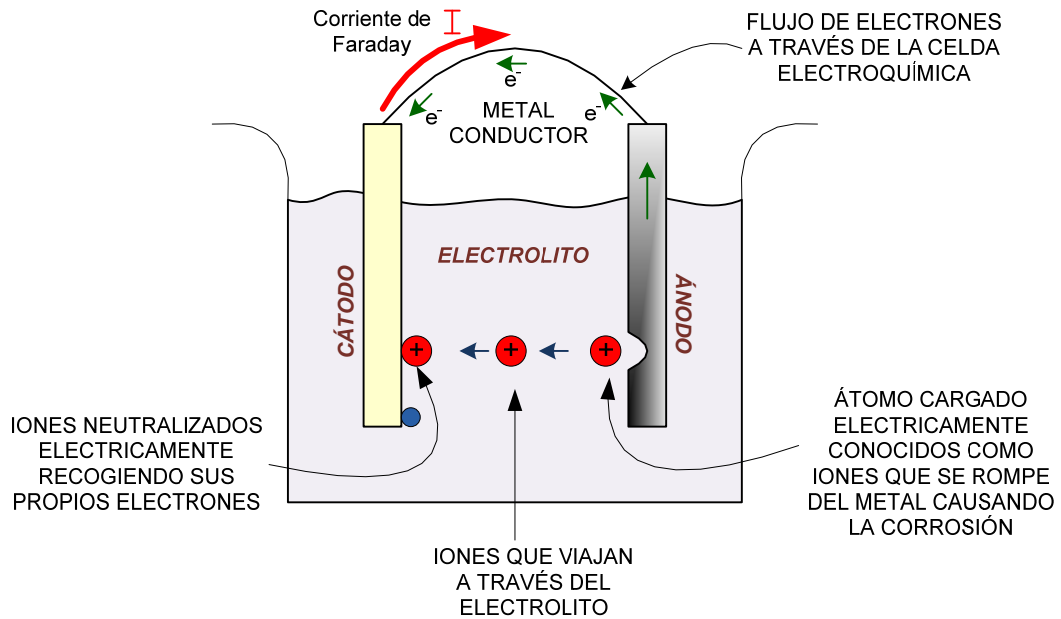


Fuente: Autor

1.2 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

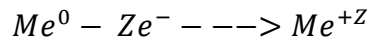
Para que exista una corrosión de tipo electroquímica han de existir tres elementos fundamentales: un metal en el que se presente la corrosión llamado ánodo, el cual emite electrones (reacción de oxidación); un metal que no se corroe, llamado cátodo, el cual recibe los electrones (reacción de reducción), y el medio de conducción de iones o solución acuosa comúnmente llamado electrolito. Cuando estos tres elementos existen, se forma una celda electroquímica, cuyo funcionamiento se explica en la figura 3.

Figura 3. Operación de una celda electroquímica.

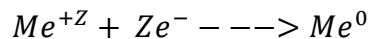


Fuente: Autor

La corriente producida por el movimiento de los electrones, se conoce como corriente de Faraday y es directamente proporcional a la corrosión existente en la superficie anódica del material. En un sistema en corrosión, como se explicó anteriormente, siempre existirán reacciones de oxidación y reducción; la primera produce la liberación de electrones y de manera general se puede expresar por la siguiente ecuación:

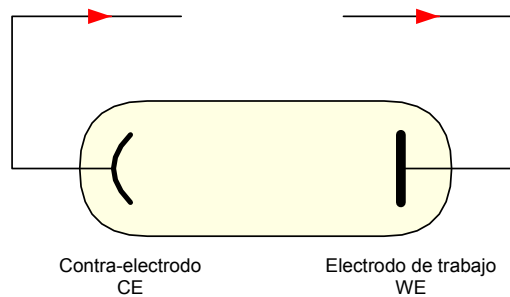


La reacción de reducción mediante la cual se absorben electrones, se puede representar por la siguiente ecuación:



Para estudios de laboratorio, se utiliza como ánodo una muestra del material donde se produce el fenómeno corrosivo, la cual se denomina como Electrodo de Trabajo (WE)¹. Como cátodo, se utiliza una muestra de un material no reactivo como grafito o platino que se conoce como Electrodo Auxiliar o Contra Electrodo (CE)² y es utilizado para cerrar el circuito permitiendo el flujo de electrones. La celda electroquímica anteriormente descrita se muestra gráficamente en la figura 4.

Figura 4. Modelo de una celda electroquímica.



Fuente: Autor

1.3 MODELADO DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA

Existen cuatro componentes fundamentales que se oponen a la libre circulación de la corriente a través de la celda electroquímica, los cuales se explican a continuación:

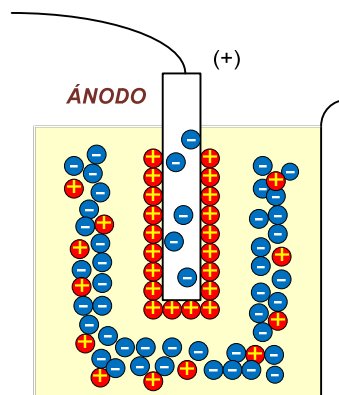
- i. **Resistencia de Faraday (R_f):** Esta resistencia surge de la oposición de los iones a separarse en el ánodo, y se ubica entre la superficie anódica y el electrolito.

¹ WE es el acrónimo de “Working Electrode” o Electrodo de Trabajo.

² CE es el acrónimo de “Counter Electrodo” o Contra Electrodo.

- ii. **Resistencia del electrolito (R_e):** Es la resistencia del camino de conducción. Una vez se separan los iones de la superficie anódica, deben seguir su curso hacia el cátodo y deben hacerlo a través del electrolito.
- iii. **Resistencia del contra electrodo (R):** Una vez en la superficie catódica, los iones transportados han de combinarse con los electrones, y existirá una resistencia a este efecto en la superficie del cátodo. Sin embargo, debido a la gran superficie de contacto, esta resistencia es muy pequeña comparada con las anteriores, por lo cual puede incluso ser despreciada.
- iv. **Doble capa eléctrica (C_{dl}):** Al sumergir el electrodo de trabajo en el electrolito, el metal se ioniza y se forma una capa móvil difusa en las cercanías de éste debido a la atracción que los iones ejercen sobre los electrones presentes en el electrolito. La capa posee algunos iones pero la carga neta total es de valor negativo debido a la predominancia de electrones. Dicha capa se comporta como un capacitor de placas paralelas y se encuentra ubicada entre el electrodo de trabajo y el electrolito, por lo cual se forma una red paralela con la resistencia de Faraday. En la figura 5, se muestra gráficamente el concepto de doble capa eléctrica.

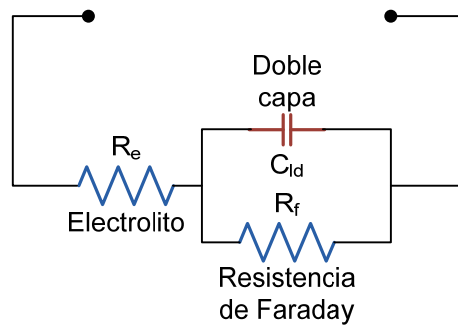
Figura 5. Capacitancia de doble capa eléctrica para un metal en corrosión.



Fuente: Autor

Entonces, debido a que la celda electroquímica presenta comportamientos similares a los presentados por elementos eléctricos, es posible modelarla mediante un diagrama circuitual que involucre los fenómenos de conducción en la misma. La representación del equivalente eléctrico de una celda electroquímica se muestra en la figura 6.

Figura 6. Impedancia equivalente de la celda electroquímica.



Fuente: Autor

1.4 POTENCIAL DE CORROSIÓN

El potencial medido entre un electrodo y un medio acuoso de sus propios iones en equilibrio se conoce como potencial de electrodo. La medida de dicho potencial se toma fijando como referencia la mitad de una celda de hidrógeno conocida como electrodo de hidrógeno estándar (SHE)³, utilizando una celda electroquímica y un instrumento de medida.

Todo metal presenta una tendencia diferente a la corrosión dependiendo del medio en el que se encuentre, por esto, un método para comparar la tendencia a formar iones en una solución acuosa, es comparar los potenciales de reducción u oxidación de un material respecto a un potencial conocido. Este valor patrón de medida (cero voltios), es el valor de potencial del electrodo de hidrógeno estándar.

³ Acrónimo de Standard Reference Electrode.

En la figura 7, se muestran los potenciales de algunas reacciones en medio acuoso comparadas con el SHE.

Figura 7. Potenciales de electrodo estándar a 25°C.

	Reacción de oxidación (corrosión)	Potencial de electrodo, E ⁰ (voltios frente a electrodo estándar de hidrógeno)
Más catódico (menor tendencia a la corrosión)	Au → Au ³⁺ + 3e ⁻	+ 1,498
	2H ₂ O → O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻	+ 1,229
	Pt → Pt ²⁺ + 2e ⁻	+ 1,200
	Ag → Ag ⁺ + e ⁻	+ 0,799
	2Hg → Hg ₂ ²⁺ + 2e ⁻	+ 0,788
	Fe ²⁺ → Fe ³⁺ + e ⁻	+ 0,771
	4(OH) ⁻ → O ₂ + 2H ₂ O + 4e ⁻	+ 0,401
	Cu → Cu ²⁺ + 2e ⁻	+ 0,337
	Sn ²⁺ → Sn ⁴⁺ + 2e ⁻	+ 0,150
	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	+ 0,000
	Más anódico (mayor tendencia a la corrosión)	Pb → Pb ²⁺ + 2e ⁻
Sn → Sn ²⁺ + 2e ⁻		- 0,136
Ni → Ni ²⁺ + 2e ⁻		- 0,250
Co → Co ²⁺ + 2e ⁻		- 0,277
Cd → Cd ²⁺ + 2e ⁻		- 0,403
Fe → Fe ²⁺ + 2e ⁻		- 0,440
Cr → Cr ³⁺ + 3e ⁻		- 0,744
Zn → Zn ²⁺ + 2e ⁻		- 0,763
Al → Al ³⁺ + 3e ⁻		- 1,662
Mg → Mg ²⁺ + 2e ⁻		- 2,636
Na → Na ⁺ + e ⁻		- 2,714

Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Cuadernos de laboratorio – Fundamentos de Ciencia de los Materiales. Unidad 12. Fundamentos de Corrosión y Protección. Disponible en <http://www.upv.es/materiales/Fcm/Pdf/Practicas/fcm12trb.pdf>

1.5 POTENCIOSTATOS

Un potencióstato es el instrumento básico para realizar pruebas electroquímicas y puede escalar en complejidad desde un simple amplificador operacional, hasta un sistema de precisión dependiendo del diseño propuesto y de las necesidades de la aplicación desarrollada. Sin embargo, a pesar de las diferencias entre algunos equipos, las funciones básicas que desempeña son dos: la primera es el control de la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo (WE) y electrodo de referencia (RE) y la segunda es la medición del flujo de corriente entre el electrodo de trabajo (WE) y el contraelectrodo (CE).

También existen equipos diseñados para realizar la función complementaria a un potencióstato, es decir, controlar la corriente entre WE y CE, a la vez que miden la tensión entre WE y RE; estos instrumentos son llamados galvanostatos y la mayoría de equipos actuales brindan la posibilidad de funcionar como Potencióstatos/Galvanostatos.

2. PROGRAMACIÓN EN BAJO NIVEL

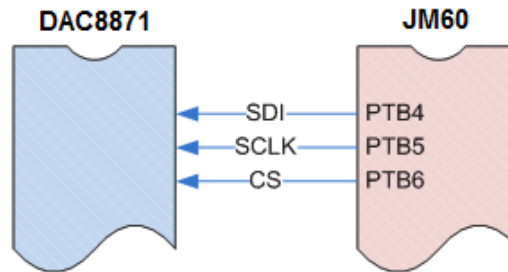
Algunas tareas propuestas para el presente proyecto, involucran la programación de un dispositivo controlador que gestione las tareas básicas del instrumento a desarrollar como proyecto de maestría. Estas tareas se pueden dividir en cuatro grandes bloques que se explicarán a continuación: generación de señal, adquisición de señal, control de rangos e indicadores e interfaz de comunicación. Para este trabajo, se seleccionó un microcontrolador Motorola de ocho bits con número interno HCS08JM60, conocido popularmente como JM60.

2.1 GENERACIÓN DE SEÑAL

Para la generación de señales, fue seleccionado un convertidor digital a analógico de 16 bits con número interno DAC8871, el cual permite generar tensiones entre los valores proporcionados como referencia positiva y negativa de tensión ($\pm V_{REF}$). Aprovechando ésta característica, se implementaron dos rangos de generación de tensión ($\pm 2,5V$ y $\pm 5V$) utilizando las referencias de tensión MAX6225 y MAX6250 respectivamente.

El proceso de generación de señal se lleva a cabo a través de una interfaz serial por un bus de datos de tres líneas de modo unidireccional desde el microcontrolador hacia el convertidor DAC8871 de acuerdo a la figura 8.

Figura 8. Diagrama de conexión entre el microcontrolador y el DAC8871



Fuente: Autor

2.1.1 Selección de frecuencia de reloj Las restricciones de comunicación inician con la selección de frecuencia o periodo para el envío de registros al convertidor digital analógico, de acuerdo con las especificaciones del diagrama de tiempos mostrado en la hoja de datos del dispositivo:

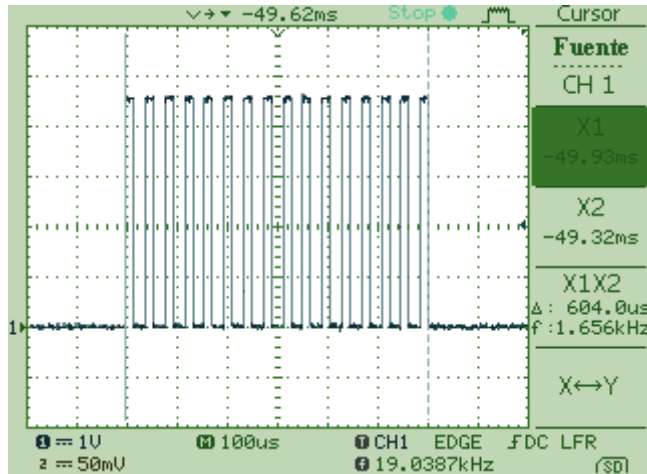
$$t_H > 10 \text{ nS} \quad y \quad t_L > 10 \text{ nS}$$

Por consiguiente:

$$T > 20 \text{ nS} \quad y \quad f < 50 \text{ kHz}$$

Teniendo en cuenta las anteriores restricciones se selecciona una frecuencia de señal de $f_{SCLK} = 1.6 \text{ kHz}$.

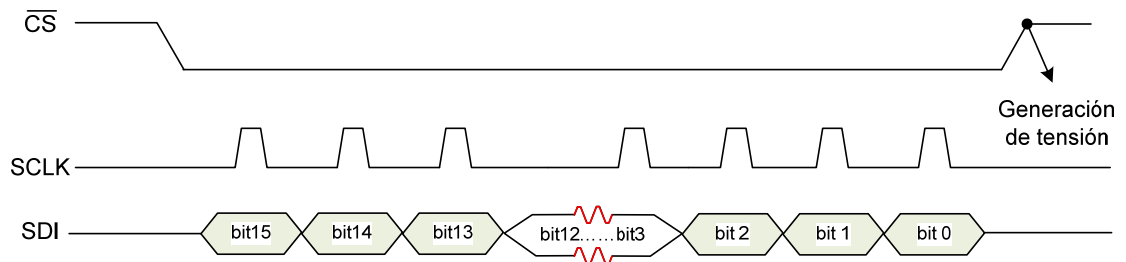
Figura 9. Señal de reloj para generación de tensión en el DAC8871



Fuente: Autor

2.1.2 Protocolo de generación Para llevar a cabo el proceso de generación, se deben seguir los siguientes pasos: generar un flanco descendente en la línea de control CS, seguidamente, se producen 16 ciclos de reloj en la línea SCLK correspondientes a 16 datos que se cargan en la línea SDI, como se ilustra en la figura 10.

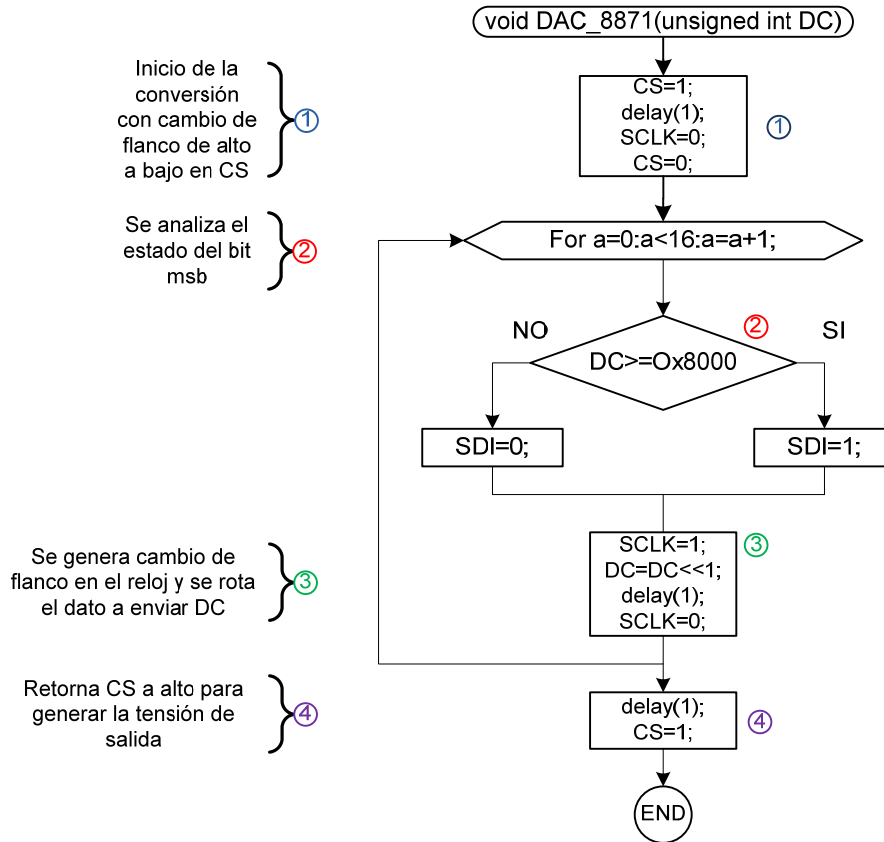
Figura 10. Proceso de generación de señal para el DAC8871



Fuente: Autor

2.1.3 Diagrama de generación El proceso de generación de señal puede ser fácilmente ilustrado a partir del diagrama de flujo que describe el proceso. Este diagrama se muestra en la figura 11.

Figura 11. Diagrama de flujo para la generación de señal de tensión



Fuente: Autor

2.2 ADQUISICIÓN DE SEÑALES

Para la adquisición de señales analógicas, fue seleccionado un convertidor analógico a digital sigma-delta de 24 bits con número interno ADS1213, el cual presenta las siguientes características:

- Resolución de 22 bits sin pérdida de código
- 20 Bits de resolución efectiva a 10 Hz y 16 Bits a 1 kHz.
- Bajo consumo de potencia 1.4 mW
- Cuatro canales de entrada diferenciales multiplexadas.
- Comunicación compatible con el protocolo SPI.

- Frecuencia de corte del filtro interno superior a 6.25 kHz.
- Referencia de tensión interna o externa según las opciones elegidas de diseño.
- Calibración interna por medio de rutinas de programación.

Para la correcta maniobrabilidad del convertidor, es necesario elegir el valor de cuatro parámetros fundamentales que definen la puesta a punto del dispositivo. Estos parámetros son: la frecuencia de cristal externo (f_{XIN}), el valor de ganancia programable (PGA), la velocidad del modo turbo (TMR), y la razón de diezmado. Esta última selecciona la cantidad de moduladores usados en el filtro digital para calcular y promediar el resultado de las conversiones.

El rango de la señal de entrada se puede seleccionar a partir de la combinación entre la ganancia programable y la utilización de una tensión de polarización interna disponible (V_{BIAS}) como se aprecia en la tabla 1. Debido a las características diseñadas para el sistema, se escogió una ganancia de PGA unitaria, por lo cual la señal adquirida tendrá un rango de entrada de ± 10 V lo que se traduce en una tensión de máxima escala de 40V ya que la topología del convertidor es diferencial.

Tabla 1. Rango de fondo escala vs ganancia programable.

GANANCIA SELECCIONADA PGA	ENTRADA ANALÓGICA			
	V_{BIAS} INACTIVO		V_{BIAS} ACTIVO	
	RANGO A FULL ESCALA (V)	EJEMPLO DE RANGO DE TENSIÓN (V)	RANGO A FULL ESCALA (V)	EJEMPLO DE RANGO DE TENSIÓN (V)
1	10	0 A 5	40	± 10
2	5	1.25 A 3.75	20	± 5
4	2.5	1.88 A 3.75	10	± 2.5
8	1.25	2.19 A 2.81	5	± 1.25
16	0.625	2.34 A 2.66	2.5	± 0.625

Fuente: Hoja de datos del dispositivo.

Debido a que la tensión adquirida de la celda electroquímica estará referenciada a tierra y no será de tipo diferencial, la entrada inversora de cada canal del convertidor debe ser aterrizada, reduciendo con esto la máxima escala de entrada a la mitad.

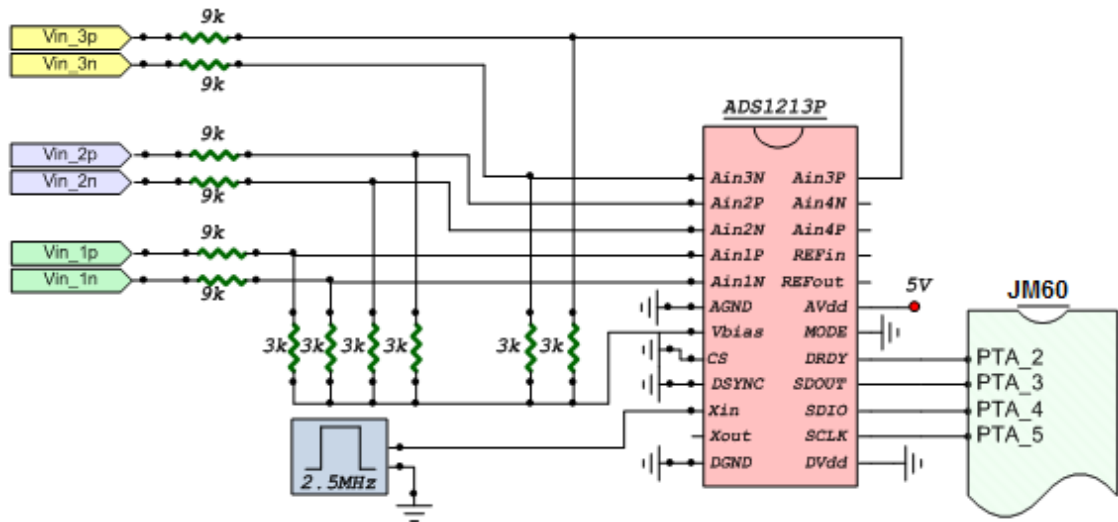
2.2.1 Consideraciones de control Para la comunicación con el dispositivo microcontrolador se selecciona un bus de cuatro líneas, las cuales se describen en la tabla 2. En la figura 12, se muestra el esquema de conexiones y adquisición de señal para el ADS1213.

Tabla 2. Pines de control para el ADS1213

PIN DE CONTROL	CONFIGURACIÓN	DESCRIPCIÓN
DRDY	Salida	Señal de monitoreo que con flanco descendente indica que el convertidor se halla listo para recibir comando o entregar datos de una conversión.
SDOUT	Salida	Línea dedicada a entregar el resultado de una conversión ó estado de un registro.
SDIO	Entrada	Línea dedicada a recibir comandos o instrucciones de calibración, conversión, revisión de registros internos.
SCLK	Entrada	Señal de reloj que sincroniza la recepción de comandos, instrucciones o datos resultantes de una conversión.

Fuente: Autor

Figura 12. Esquema de adquisición de señal en el ADS1213.

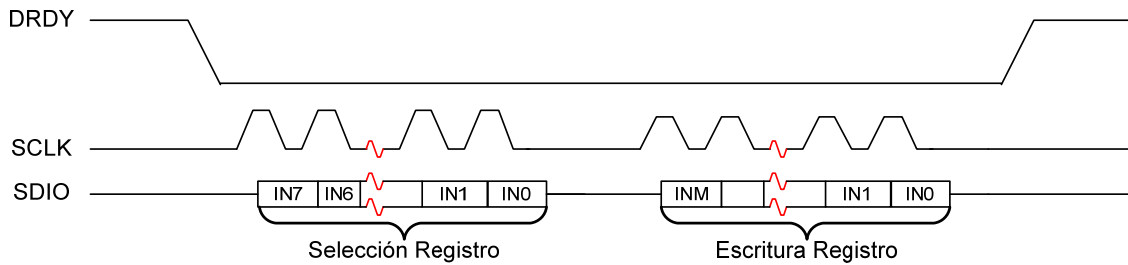


Fuente: Autor

La señal DRDY, es la que indica, por medio de un flanco de bajada, que el dispositivo se halla listo para iniciar comunicación con el microcontrolador. El protocolo de comunicación establecido para la adquisición de datos se especifica en los numerales siguientes.

2.2.2 Escritura de un registro Este protocolo permite modificar el valor de un registro interno para realizar cambios en el canal de adquisición, tipo de calibración, ganancia, selección de modo turbo, etc. Para acceder a un registro en particular se debe enviar un comando de instrucción de un byte el cual contiene la información del registro a acceder; dependiendo de la longitud del registro de acceso se hacen indispensables el envío de M señales de reloj para enviar bit a bit la información pertinente al mismo. Al finalizar la información del registro, la señal DRDY retorna a su estado alto para iniciar un nuevo proceso de comunicación.

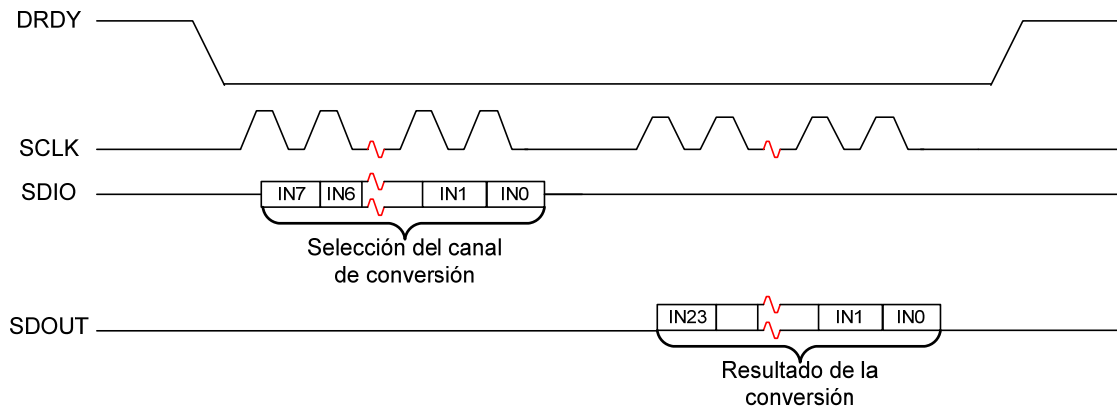
Figura 13. Protocolo de escritura de registro.



Fuente: Autor

2.2.3 Lectura de un registro Este protocolo serial permite acceder a la información almacenada en los registros internos tales como valores de adquisición de un canal, valor de calibración, estado de los registros de configuración, etc.

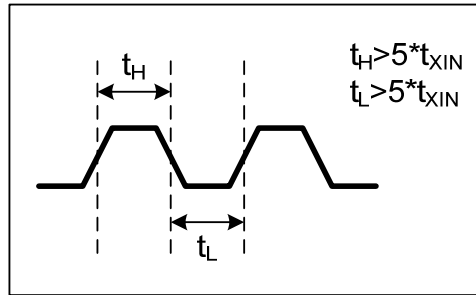
Figura 14. Protocolo de lectura de un registro



Fuente: Autor

2.2.4 Selección de frecuencia de reloj Las restricciones de comunicación con el dispositivo inician con los tiempos de sincronía en el envío y recepción de datos al convertidor. La frecuencia de la línea de reloj tiene unos parámetros de operación especificados por la hoja de datos como se muestra en la figura 15.

Figura 15. Diagrama de tiempos para la señal SCLK aplicada al ADS1213



Fuente: Hoja de datos del dispositivo.

Teniendo en cuenta que la señal de cristal externo seleccionada es de 2,4576MHz, el periodo de la misma será de:

$$t_{XIN} = \frac{1}{f_{XIN}} = \frac{1}{2.4576 * 10^6} \approx 407 \text{ nS}$$

Por consiguiente se tendrá que:

$$t_H > 2.035 \mu\text{S} \rightarrow t_L > 2.035 \mu\text{S}$$

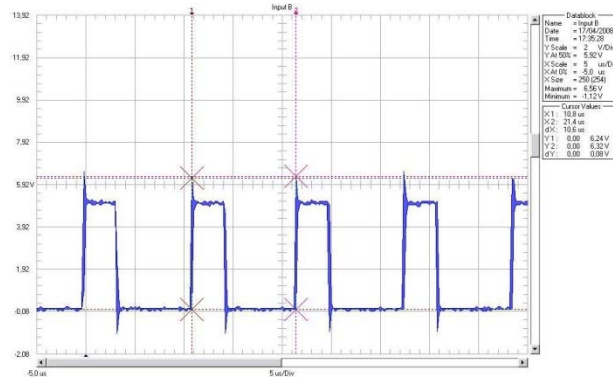
$$t_{SCLK} > 2.035 \mu\text{S} + 2.025 \mu\text{S} > 4.07 \mu\text{S}$$

$$f_{SCLK} < \frac{1}{t_{SCLK}} < \frac{1}{4.07 * 10^{-6}} \approx 246 \text{ kHz}$$

Teniendo en cuenta las anteriores restricciones se selecciona la frecuencia de señal para SCLK como:

$$f_{SCLK} = 94.34 \text{ kHz}$$

Figura 16. Características de la señal de reloj fsCLK

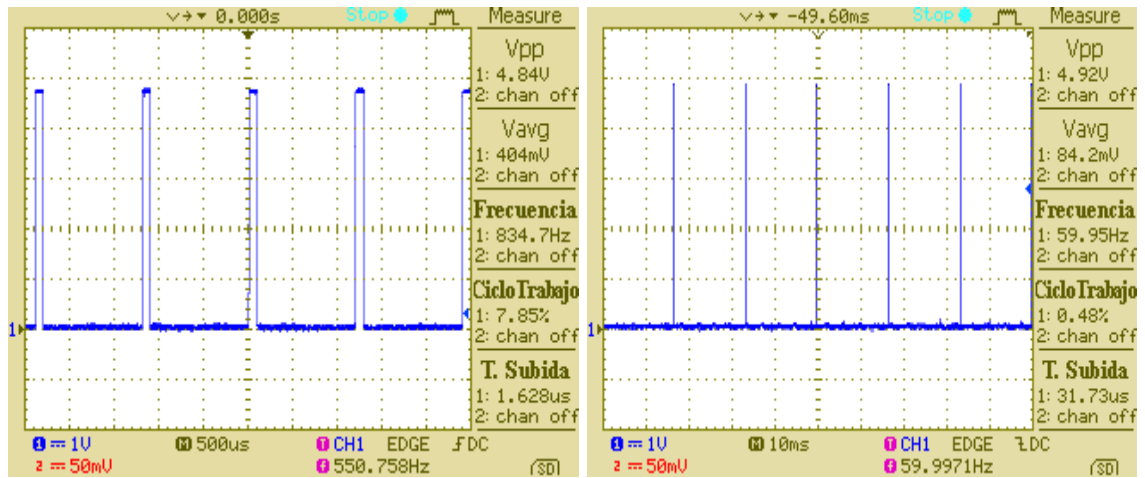


Fuente: Autor

2.2.5 Puesta a punto del convertidor Para realizar un proceso de puesta a punto correcto, se deben seleccionar los parámetros primarios de operación como lo son la habilitación de la tensión de polarización para lograr adquirir señales bipolares, la selección del tipo de referencia externa, el formato de salida de datos, el orden de acceso a los registros, el tipo de calibración, la ganancia, el canal, el valor del modulador turbo y la razón de diezmado. La configuración de estos parámetros iniciales se halla en el registro de comandos en sus 4 bytes configurados siguiendo las indicaciones de la hoja de datos proporcionada por el fabricante.

Para verificar que el dispositivo haya sido configurado correctamente, la frecuencia de la señal DRDY debe ser de 60Hz (a partir a los parámetros de selección), adicionalmente la salida en el pin V_{BIAS} debe ser de 3.3 voltios, la cual corresponde a la tensión de polarización para adquisición de señales bipolares.

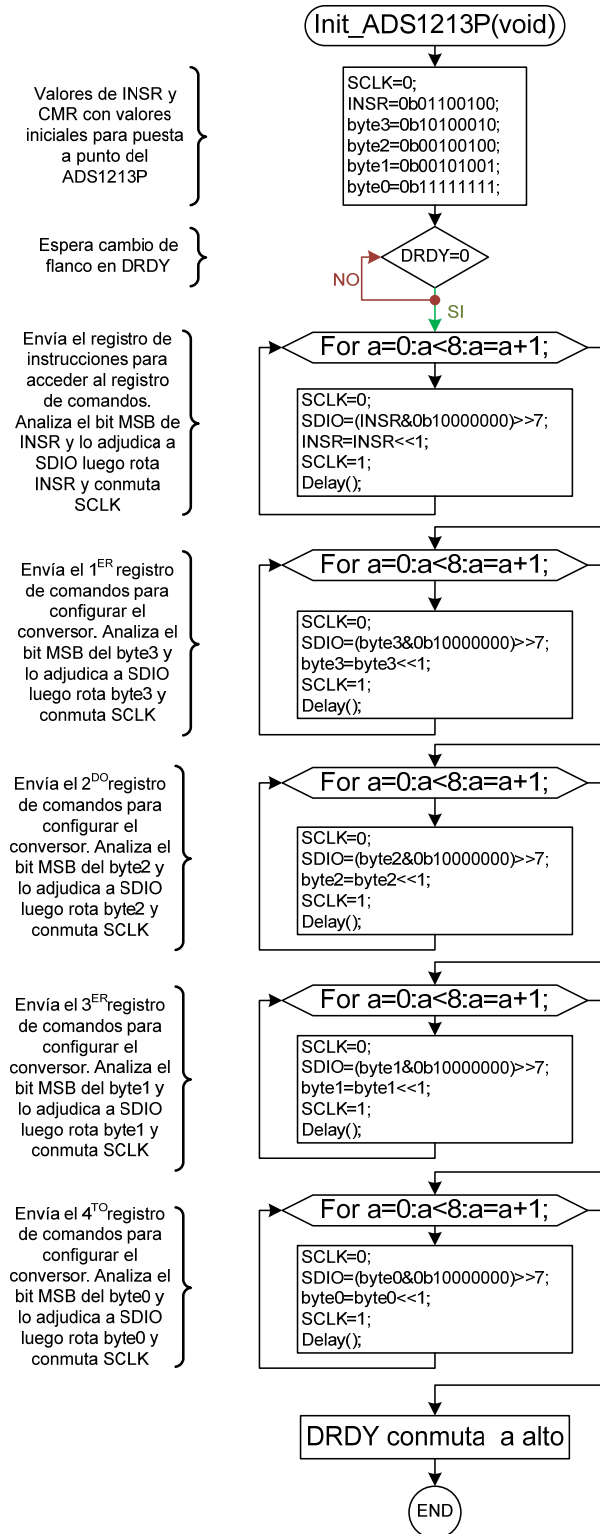
Figura 17. Señal DRDY por defecto y luego de la puesta a punto.



Fuente: Autor

El manejo de la rutina de puesta a punto se puede apreciar gráficamente a partir del diagrama de flujo que se presenta en la figura 18.

Figura 18. Diagrama de flujo de la rutina de puesta a punto

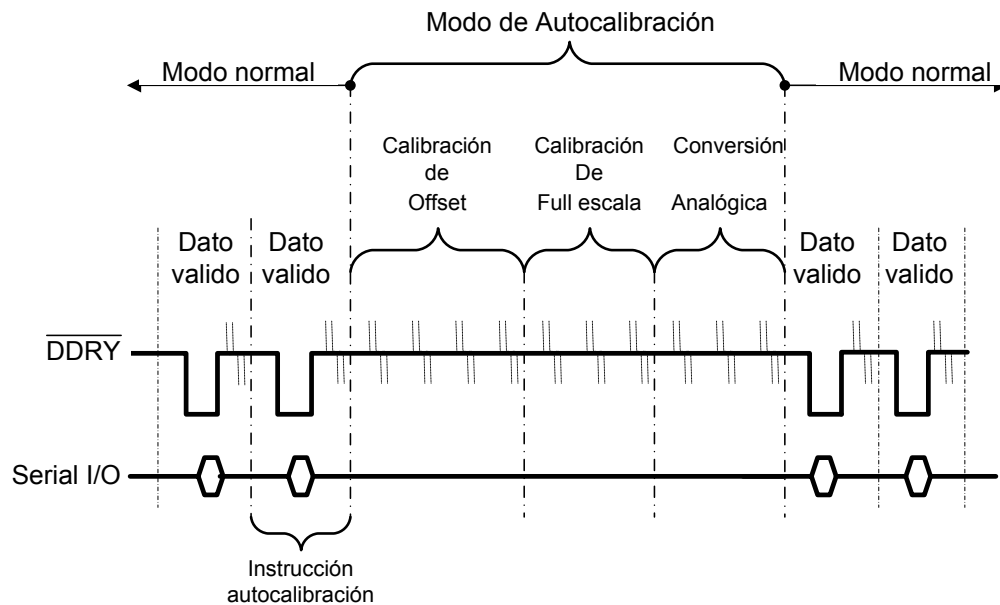


Fuente: Autor

2.2.6 Adquisición del convertidor Para realizar el proceso de adquisición se emplea el mismo proceso anterior enviando la información de adquisición a través del registro de instrucciones y recibiendo los datos de la conversión por intermedio de la línea SDIO.

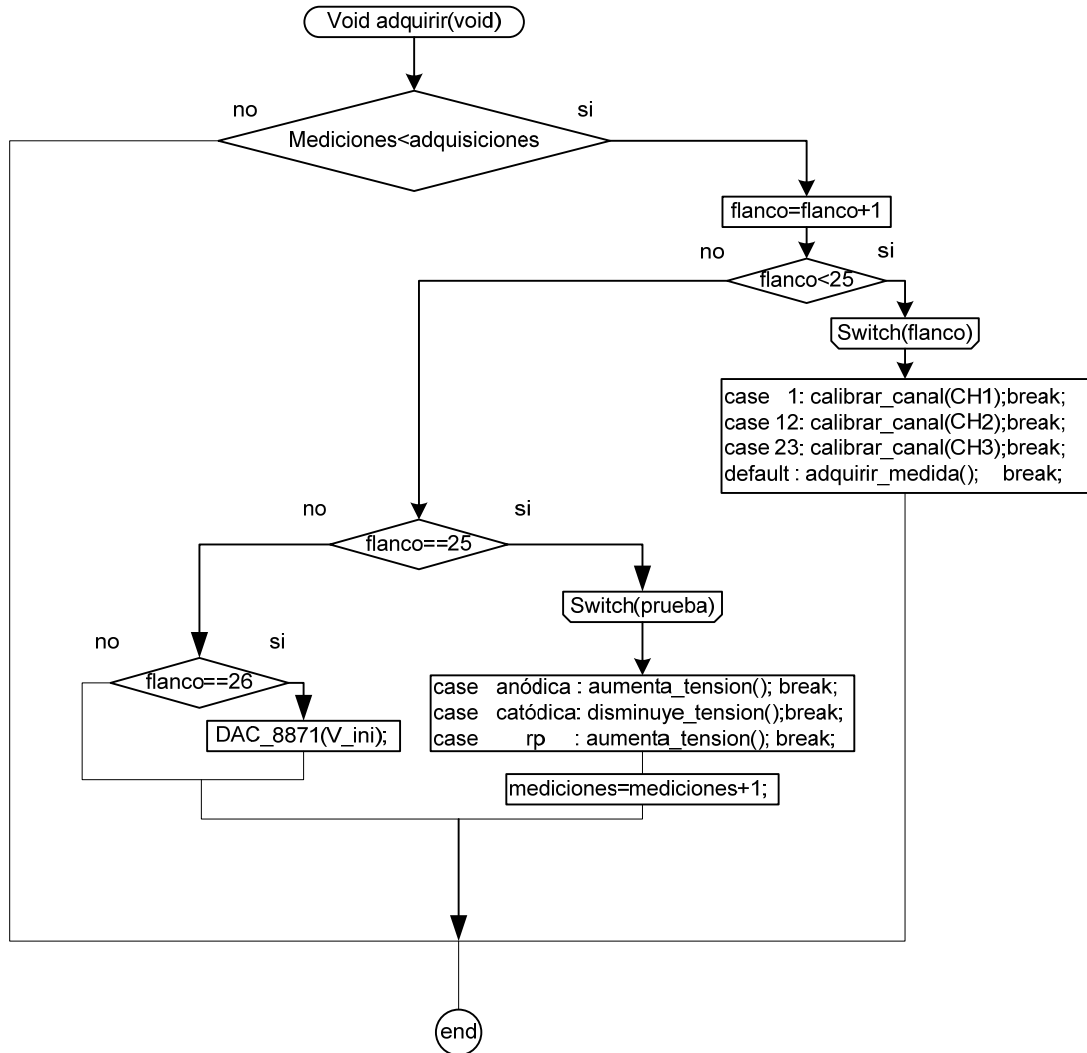
Para que una conversión se realice es necesario que el modulador se llene con las muestras necesarias, las cuales consumen tres ciclos de operación del convertidor; adicionalmente se elige un proceso de auto-calibración en cada cambio de canal el cual consume cuatro ciclos para la calibración de “offset” y tres para calibración de “full-scale” llegando a un total de 11 ciclos para la primera adquisición por canal de acuerdo al siguiente esquema:

Figura 19. Proceso de adquisición por canal para la primera muestra.



El diagrama de flujo para la adquisición de las señales analógicas a la entrada del ADS1213 se muestra en la figura 20.

Figura 20. Diagrama de flujo para la adquisición de datos



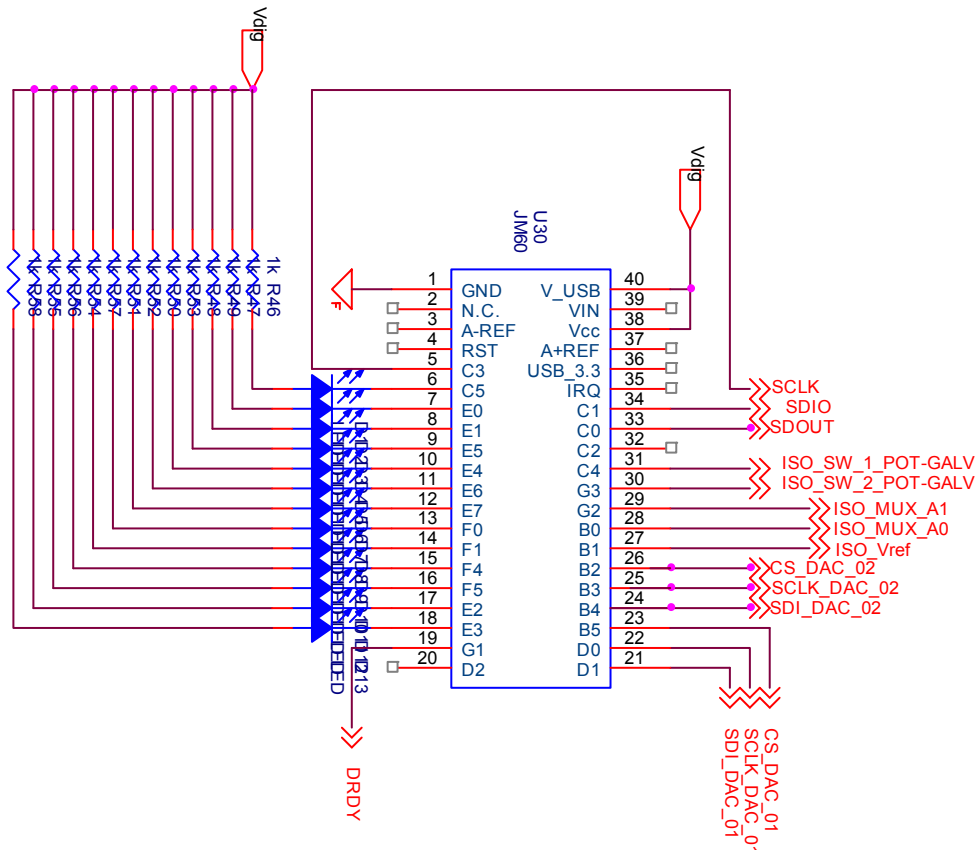
Fuente: Autor

2.3 TRANSMISIÓN DE DATOS

La transmisión de datos se realiza por interfaz de puerto serial universal versión 2.0 (USB 2.0), a una velocidad de 38400 baudios sin ningún tipo de control de flujo. Es importante destacar que debido al diseño del equipo, la comunicación que se realiza en todo momento es bidireccional entre el equipo (JM60) y el computador donde se encuentra instalado el módulo de visualización (Labview).

Además de lo anterior, el sistema cuenta con una rutina de escaneo de puertos, la cual permite una identificación automática del puerto de conexión.

Figura 21. Esquema de transmisión de datos.



Fuente: Autor

2.4 CONTROL DE RANGOS E INDICADORES

La tarea menos especializada realizada por el microcontrolador, es la referente a la selección de rangos y al manejo de los indicadores del sistema. Sin embargo, es la que le permite una gran flexibilidad al equipo, un alto nivel de integración y además entrega información visual valiosa para el operario.

Los interruptores utilizados y su utilidad se explican a continuación:

- i. **TS5A3160:** Es un interruptor SPDT para seleccionar la referencia de tensión a utilizar para la generación de señal (2,5 o 5V).
- ii. **ADG1419:** Es un interruptor SPDT para la selección de modo. En el sistema, se utilizan dos dispositivos de este tipo, el primero se coloca a la salida del DAC8871 y el otro se coloca en la carga (Contraelectrodo) para la inyección de corriente (ya sea en el modo potencióstato por el amplificador de control o en el modo galvanostato por la fuente de corriente)⁴
- iii. **ADG1413:** Es un interruptor cuádruple SPST que se utiliza para la selección de rango de corriente, tanto de generación como de medición. Haciendo uso de este dispositivo, será posible generar ocho rangos de corriente y medir cuatro rangos de corriente en el sistema. Los rangos de generación se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Rangos de generación y medición del sistema.

Generación		Medición	
R _F	Rango ⁵	R _F	Rango
1kΩ	±5 mA	1kΩ	±10 mA
100kΩ	±50 μA	100kΩ	±100 μA
1MΩ	±5 μA	1MΩ	±10 μA
10MΩ	±500 nA	10MΩ	±1 μA

Fuente: Autor

⁴ Para entender mejor el funcionamiento de estos modos de trabajo, se recomienda leer la tesis de maestría DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN BIPOTENCIÓSTATO DE PRECISIÓN, ya que el presente proyecto hace parte del desarrollo de la tesis anteriormente mencionada.

⁵ Los rangos mostrados son para la generación de tensión de 5V. Además, existirán otros cuatro rangos de tensión cuando se utilice la referencia de 2,5V, equivalentes a la mitad de los valores expresados en la tabla 3.

3. PROGRAMACIÓN EN ALTO NIVEL

Para la visualización de los datos adquiridos, y teniendo en cuenta que el equipo desarrollado fue especificado como un equipo de laboratorio, se necesitaba desarrollar una aplicación en lenguaje de alto nivel que permitiera realizar la descarga de datos y la visualización en modo online. La principal motivación de esta interfaz gráfica, fue la facilidad de manejo por parte del usuario, de manera que no necesitara conocimientos previos en electrónica ni en sistemas para realizar la manipulación del instrumento.

Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió hacer la aplicación en Labview, aprovechando que tanto la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, como la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales poseen la licencia de funcionamiento del mencionado software. Dentro de las características especiales del software, está la forma de programación, ya que se realiza en lenguaje orientado a gráficos.

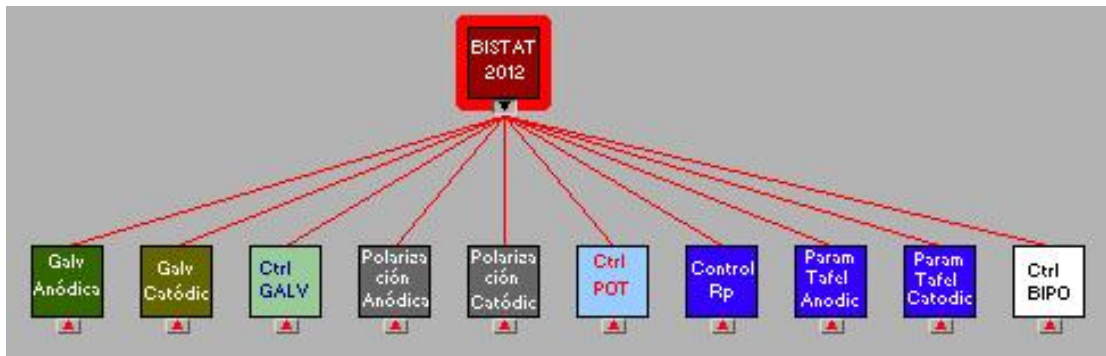
Cuando se diseñan programas con Labview, se trabaja sobre estructuras denominadas Instrumentos Virtuales (VI)⁶, debido a que el panel frontal de cada aplicación puede llegarse a parecer en su presentación a los aparatos de instrumentación utilizados usualmente. Estos instrumentos virtuales, pueden ser llamados en otras aplicaciones como una subfunción (SubVI) dentro de un programa general, lo que facilitará la programación haciéndola más ordenada, modular y fácil de entender.

⁶ Acrónimo de Virtual Instrument

3.1 JERARQUÍA

Cuando se utilizan VIs dentro de otros VIs, se van estableciendo niveles de llamado entre los mismos y se va creando una jerarquía de VIs. Esta jerarquía, organizada por niveles bien definidos es la que permite estructurar de manera adecuada una programación centralizada que depende de un único archivo principal. En la figura 22, se muestra la jerarquía de nivel superior del sistema y se aprecia el VI superior (BISTAT 2012)

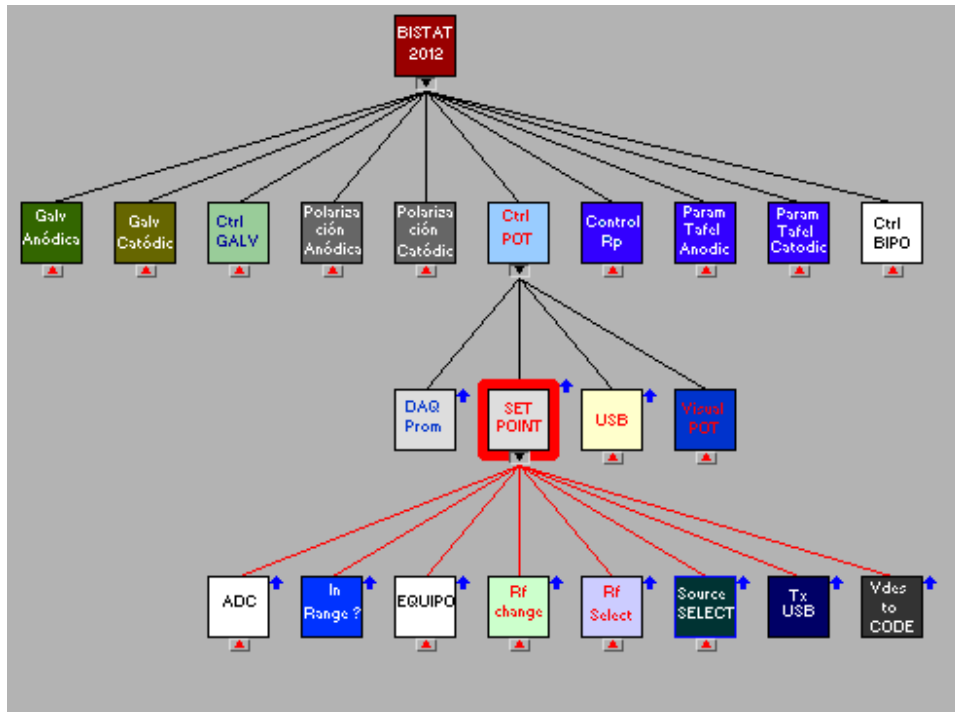
Figura 22. Jerarquía de nivel superior para el BISTAT 2012.



Fuente: Autor

En la figura anterior, se puede apreciar que el VI principal, se apoya en 10 SubVI de segundo nivel, que corresponden a las pruebas que permite realizar el equipo y que serán mencionadas mas adelante. Cada uno de éstos SubVI, al estar activos, realizarán llamados a VIs de niveles inferiores para llevar a cabo la función determinada por el programador. A manera de ejemplo, en la figura 23, se aprecia la jerarquía involucrada en la realización de una prueba potenciostática, y se aprecia el llamado a rutinas como: setpoint, USB, visualización, adquisición del ADC, rango de entrada, selección de resistencia de retroalimentación en el equipo, selección de fuente, entre otras.

Figura 23. Jerarquía multinivel para prueba potencioestática.



Fuente: Autor

3.2 PANELES DE CONTROL Y VISUALIZACIÓN

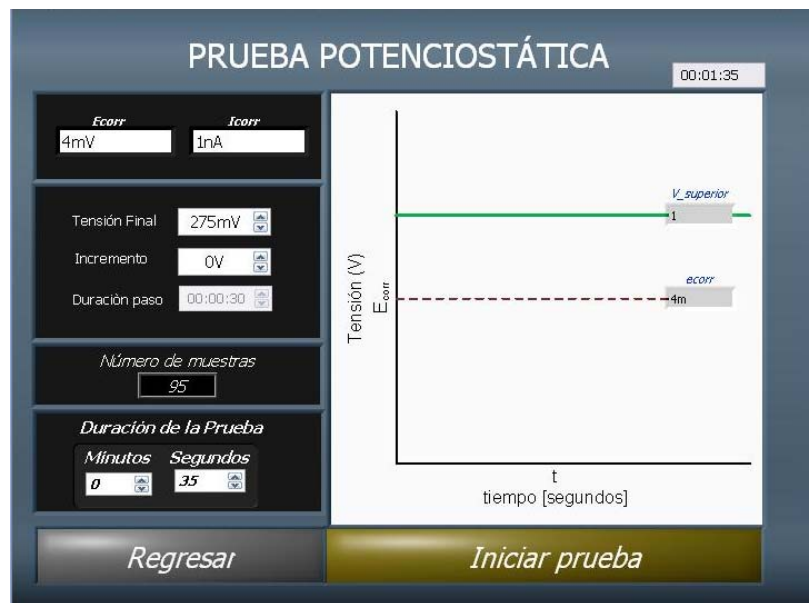
Cada una de las pruebas implementadas contiene dos paneles, uno de control, encargado de la selección de los parámetros de la prueba electroquímica y otro de visualización, donde se aprecian los resultados de los fenómenos presentados. A continuación, se muestra una lista de las pruebas realizadas por el equipo y después de ello, algunos ejemplos de paneles de control y visualización que serán explicados con mayor detalle:

- Prueba potencioestática
- Resistencia a la polarización
- Prueba de Tafel (Anódica, Catódica y total)
- Polarización anódica y catódica
- Polarización cíclica

- Prueba galvanostática
- Prueba galvanodinámica

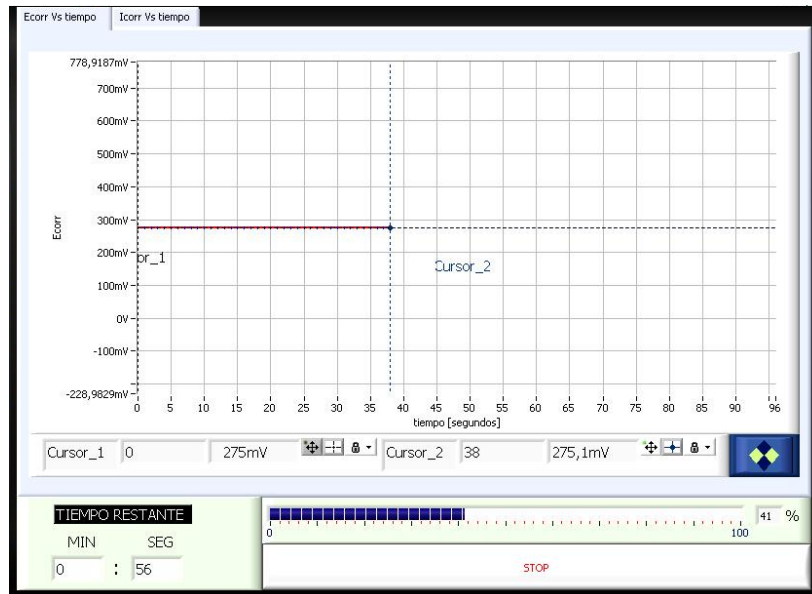
En la figura 24, se muestra el panel de control para una prueba potencioestática; para realizarla, se necesita de un valor de inicio (E_{CORR}), el cual es detectado por el instrumento, y de la selección de tres variables (tensión final, paso de tensión y duración del mismo). Una vez seleccionados estos valores, se inicia la prueba y se carga el panel de visualización que se aprecia en la figura 25.

Figura 24. Panel de control para prueba potencioestática



Fuente: Autor

Figura 25. Panel de visualización para prueba potencioestática.

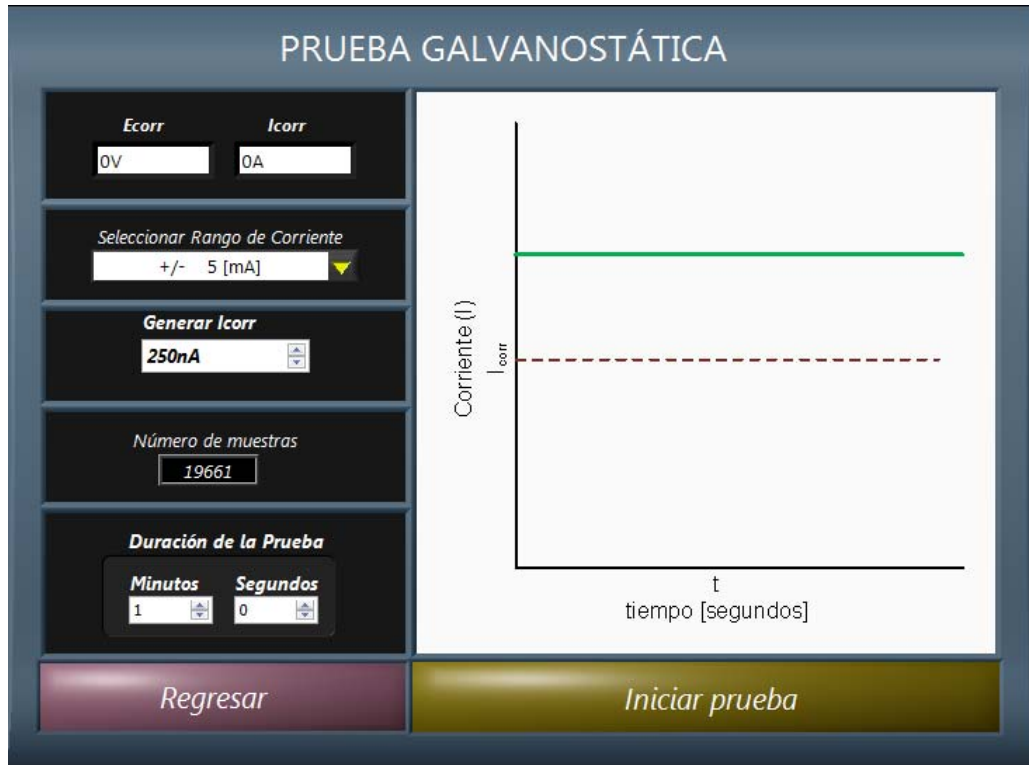


Fuente: Autor

Un ejemplo de las condiciones de una prueba potencioestática, se encuentra en la norma ASTM G5 para un acero inoxidable tipo 4300; en ésta, se describe que la tensión debe comenzar en el potencial de corrosión (E_{CORR}) y presentar pasos de tensión de 50mV hasta llegar a una tensión final de 1,6V vs el electrodo de referencia.

Teniendo en cuenta que el instrumento funcionará como potencioestato y como galvanostato, también se mostrará como ejemplo el panel frontal de una prueba galvanostática, por medio de la cual se pueden hacer experimentos de coulombimetría para medir la cantidad de materia transformada en un proceso de electrólisis. Para este tipo de prueba, el usuario debe seleccionar el rango de corriente del sistema (entre 8 rangos posibles), la corriente deseada y la duración de la prueba; una vez elegidos los parámetros, se carga el panel de visualización de la prueba.

Figura 26. Panel de control para la prueba galvanostática.



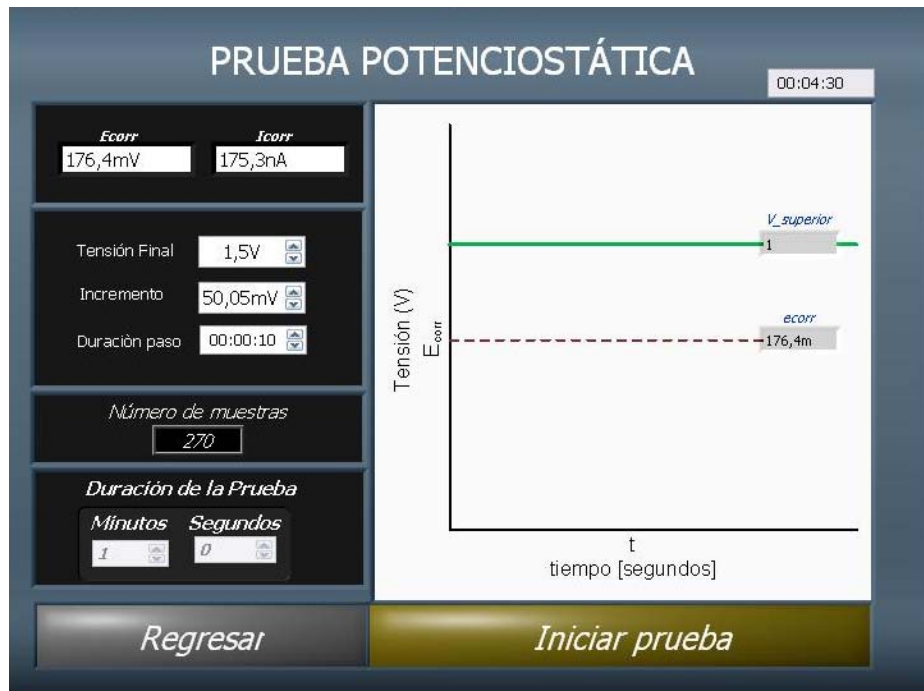
Fuente: Autor

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez concluidas las etapas de programación tanto en bajo como en alto nivel, es necesario realizar pruebas al equipo para demostrar la validez de la respuesta del instrumento, y con ello, el buen comportamiento de las funciones de generación, adquisición, transmisión y visualización de datos, que en últimas, corresponden a los objetivos propuestos para el presente proyecto.

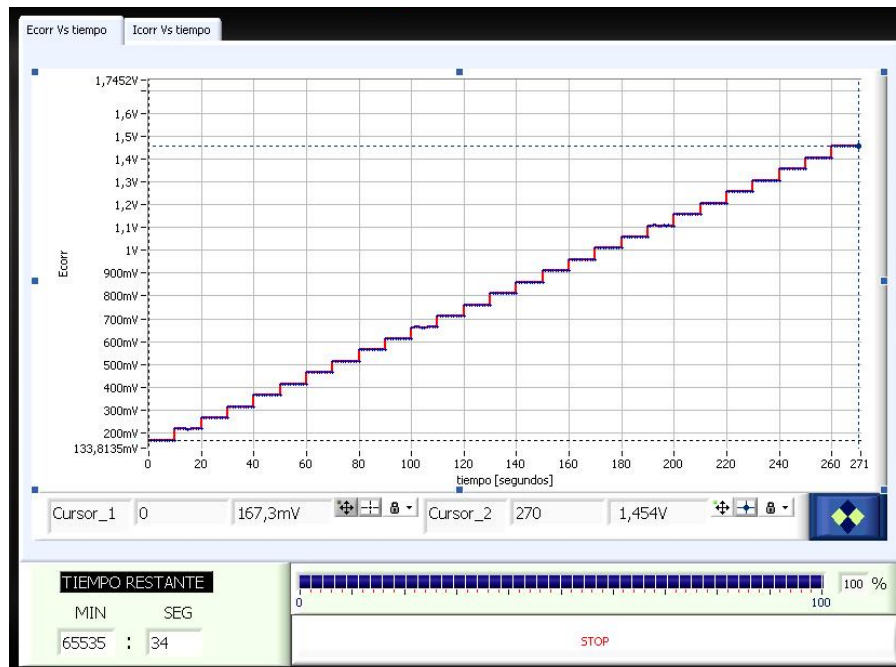
Para comprobar el correcto funcionamiento del equipo, se mostrarán los paneles de control con las condiciones específicas de las pruebas realizadas con celdas “*dummy*” y la respuesta gráfica correspondiente en el panel de visualización. Es importante destacar que éstas pruebas fueron realizadas sin ningún tipo de calibración o suavizado, con el objetivo de evaluar la respuesta verdadera del equipo y observar la adecuada adquisición y transmisión de datos (monotonía, rangos, resolución, etc)

Figura 27. Panel de control prueba potenciostática.



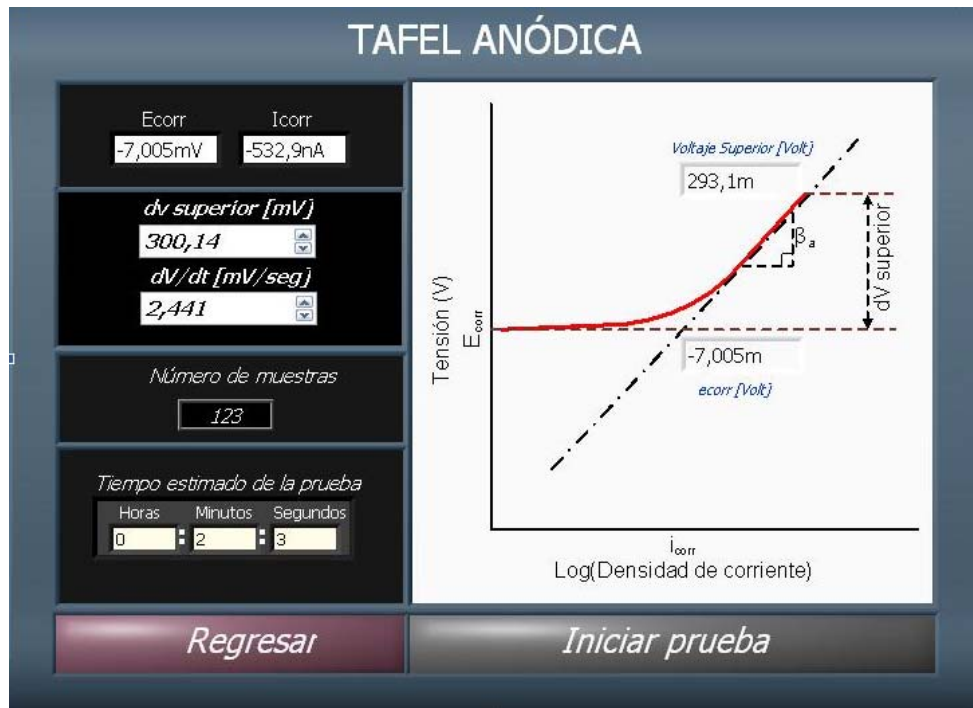
Fuente: Autor

Figura 28. Respuesta de tensión para prueba potenciostática.



Fuente: Autor

Figura 29. Prueba Tafel Anódica.



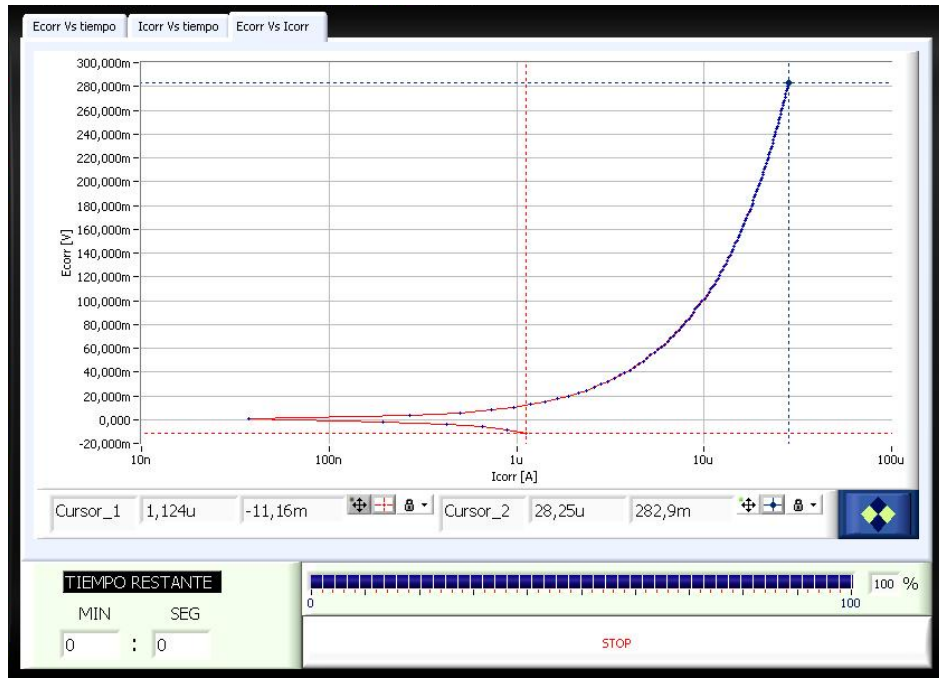
Fuente: Autor

Figura 30. Barrido de tensión para prueba tafel anódica.



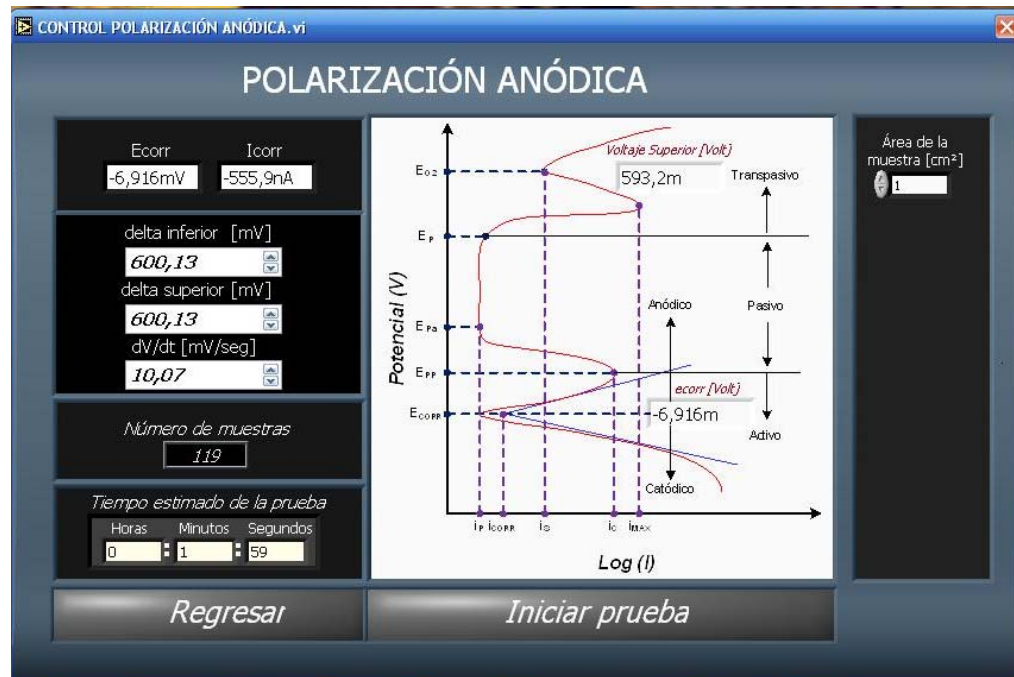
Fuente: Autor

Figura 31. Gráfico XY para prueba tafel anódica (abcisa logarítmica)



Fuente: Autor

Figura 32. Prueba de polarización anódica total



Fuente: Autor

Figura 33. Gráfico XY para la prueba de polarización anódica.

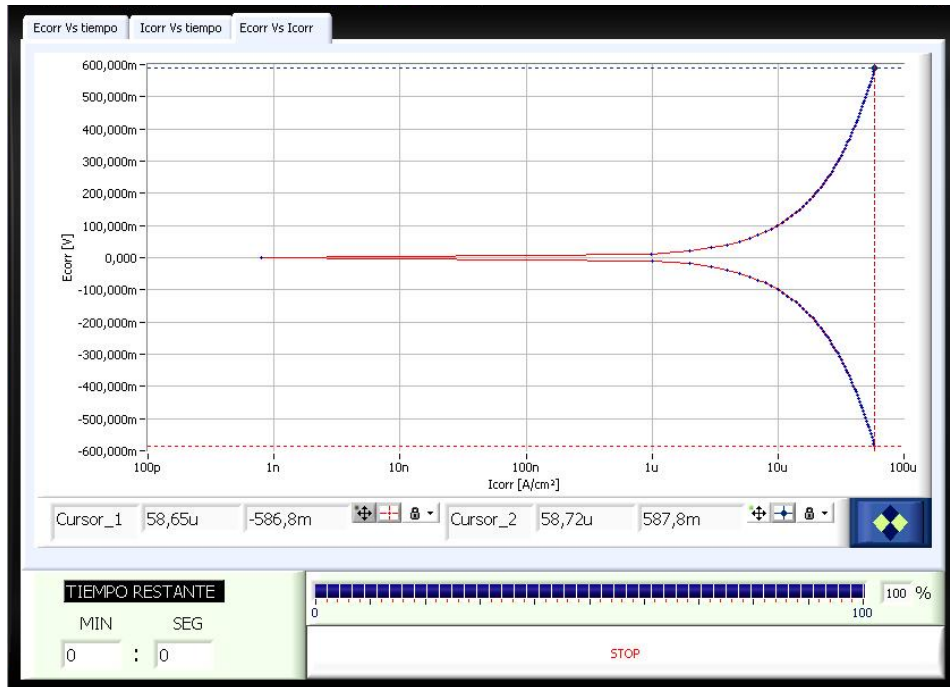
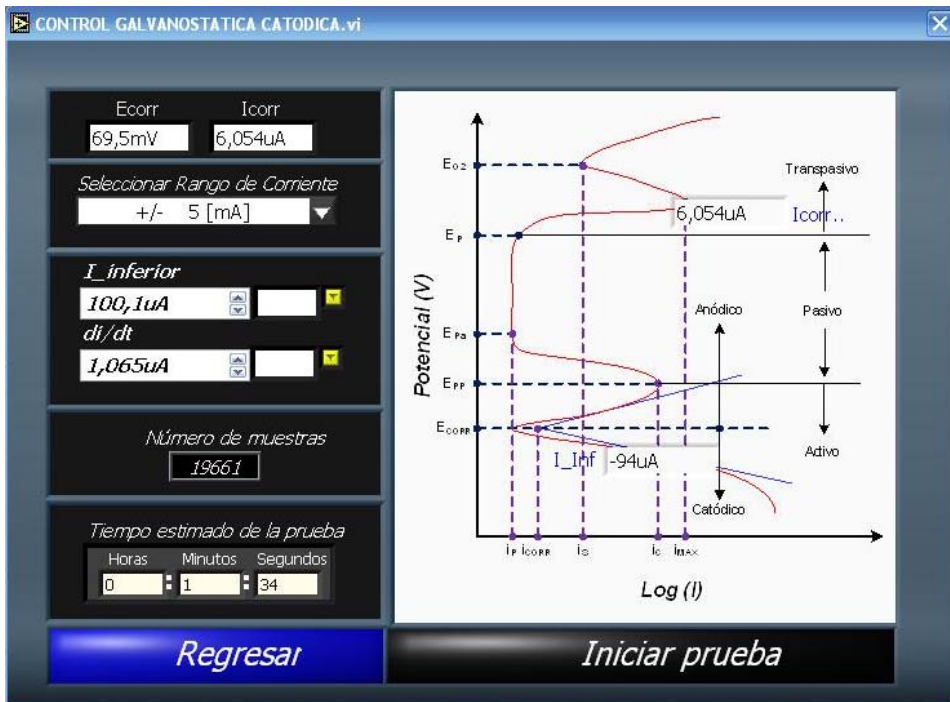
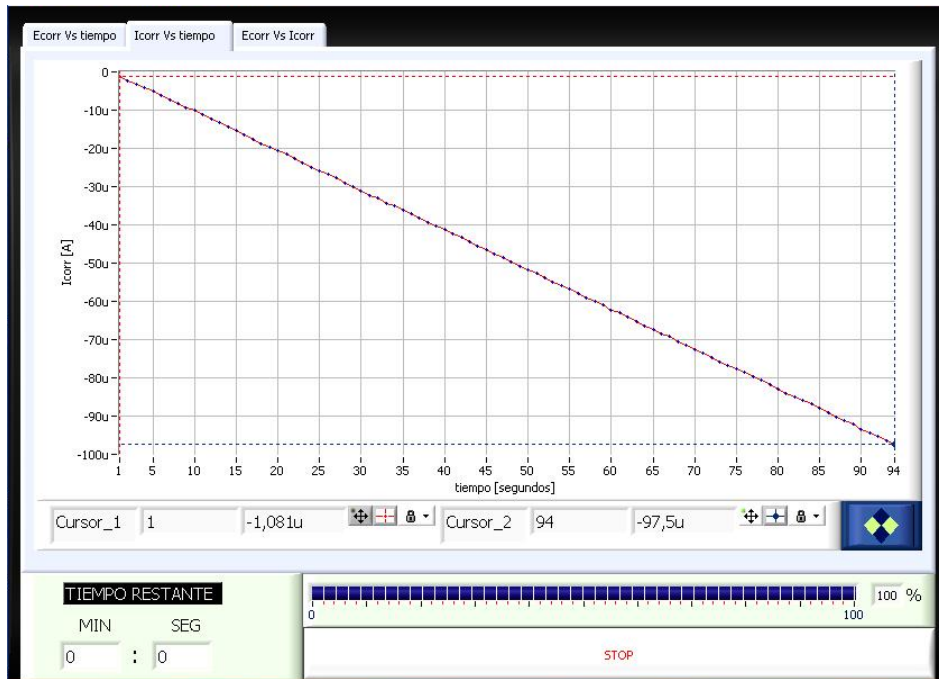


Figura 34. Panel de control para prueba galvanodinámica catódica.



Fuente: Autor

Figura 35. Corriente contra tiempo prueba galvanodinámica catódica.



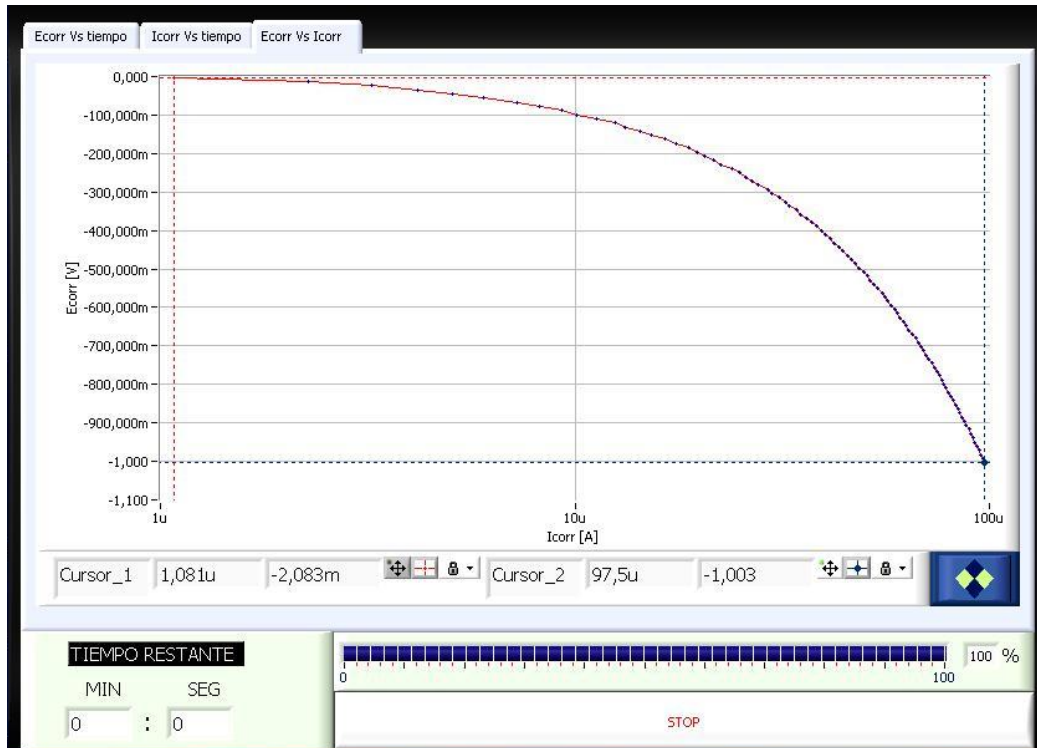
Fuente: Autor

Figura 36. Tensión contra tiempo prueba galvanodinámica catódica.



Fuente: Autor

Figura 37. Gráfico XY prueba galvanodinámica catódica.



5. CONCLUSIONES

- Se desarrolló una programación en bajo nivel (lenguaje C), sobre el microcontrolador JM60, que realiza los procesos de generación y adquisición de señal, manejo automático de rangos e indicadores y transmisión serial por puerto USB.
- Se alcanzó una alta velocidad de transmisión de datos en el equipo, debido a que el microcontrolador utilizado posee características tales como sensado de velocidad de transmisión y control de flujo de datos (paridad, longitud de la trama de datos, bit de parada, entre otros).
- Se entrega un sistema de desarrollo para pruebas electroquímicas basado en Labview, que permite no solo la transmisión de datos USB hacia el computador, sino además la programación del controlador por éste mismo puerto.
- Se definió una estructura jerárquica organizada en Labview, con el fin de facilitar los procesos de mejora del equipo o diagnóstico de fallas en la comunicación o visualización de datos.
- Aprovechando que se estaba desarrollando un instrumento para laboratorio, se definió que el control del mismo fuera realizado enteramente por Labview, para obtener mayor capacidad de almacenamiento, versatilidad y sobre todo, facilidad de manejo para el usuario final.
- El instrumento final, funciona como un dispositivo “*plug & play*” debido a que el JM60 posee un manejador que permite que Labview lo reconozca como un puerto virtual de comunicación.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. Designation G5-94. 12p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. Designation G59-97. 3p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys. Designation G61-87. 5p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. G102-89. 7p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Evaluation of Hydrogen Uptake, Permeation, and Transport in Metals by an Electrochemical Technique. G148-97. 10p.

ANALOG DEVICES. Hoja de datos ADG1413. Disponible en www.analog.com

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

FREESCALE. Hoja de datos MC9S08JM60. Disponible en www.freescale.com

LAFFERTY, Tim. Comparing Digital Signals Isolation Techniques [online]. Texas Instruments Inc. Training event video. Disponible en <http://focus.ti.com/docs/training/catalog/events/event.jhtml?sku=OLT410007>

PRINCETON APPLIED RESEARCH. Basics of Corrosion Measurements [online]. Nota de aplicación CORR1. Disponible en <http://www.princetonappliedresearch.com/Literature/index.aspx>

PRINCETON APPLIED RESEARCH. Electrochemistry and Corrosion Overview and Techniques [online]. Nota de aplicación CORR4. Disponible en <http://www.princetonappliedresearch.com/Literature/index.aspx>

SOLARTRON ANALYTICAL. Understanding Electrochemical Cells [online]. Reporte técnico 17. Disponible en <http://www.solartronanalytical.com/Pages/ApplicationTechnicalNotes.htm>

TEXAS INSTRUMENTS. Hoja de datos ADS1213. Disponible en www.ti.com

TEXAS INSTRUMENTS. Hoja de datos DAC8871. Disponible en www.ti.com

TEXAS INSTRUMENTS. Hoja de datos TS5A3160. Disponible en www.ti.com