

Universidad de la República
Facultad de Ingeniería

MECEHA

Medidor Electrónico de la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado

Proyecto de Fin de Carrera de Ingeniería Eléctrica

Alberto Arce, Fernando Bagalciague, Federico Davoine

Tutor: Juan Pablo Oliver

Montevideo, Uruguay

Diciembre 2009

Resumen

*El proyecto **Medidor Electrónico de la Corrosión de Estructuras de Hormigón Armado** (MECEHA) consistió en el desarrollo de un dispositivo portátil y configurable, para realizar medidas de la corrosión de estructuras de hormigón armado, en laboratorio y en campo. Surgió del interés de los ingenieros Gerardo Rodríguez, Miguel Pedrón y Patricia Vila del Instituto de Estructuras y Transporte de contar con un equipo para llevarlas a cabo, tanto a nivel de investigación como de asesoramientos profesionales.*

MECEHA es un sistema que inyecta corriente y mide potencial, cuya interfaz con el hormigón consiste en un electrodo que se conecta a la estructura. La electrónica consta de una placa comercial de adquisición y control y una placa electrónica de adaptación de señales desarrollada en el presente proyecto. La electrónica de MECEHA se conecta via puerto USB a una computadora, en la que corre software especialmente diseñado para realizar los ensayos de interés y cálculo de resultados de los mismos.

Los errores en la medida de este equipo fueron medidos con equipos de laboratorio del Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE), y resultaron estar dentro de los rangos esperados. Se llevó a cabo una contrastación con un equipo que actualmente realiza mediciones de corrosión en probetas de hormigón, obteniendo resultados satisfactorios.

Agradecimientos

Este proyecto se llevó a cabo gracias a la generosa contribución de muchas personas, entre las cuales queremos agradecer especialmente a:

Miguel Pedrón

Patricia Vila

Juan Pablo Oliver

Andrés Merello

Agustín Villavedra

Carlos Santana

Gabriel Otonelli

Marcelo Gómez

Julio Arzuaga

Pedro Arzuaga

Fernando Silveira

Hernán Rubio

Cecilia Ciria

Índice general

Título	I
Resumen	II
Agradecimientos	III
Tabla de contenidos	IV
1. Introducción	1
1.1. Corrosión de estructuras de hormigón armado	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organización del documento	4
2. Introducción a la corrosión	6
2.1. Modelado del fenómeno de la corrosión	6
2.2. Métodos de medida de la corrosión en armaduras	9
2.2.1. Potencial libre de corrosión	9
2.2.2. Medida de resistividad	10
2.2.3. Pulso galvanostático	10
2.2.4. Guarda de corriente	14
2.2.5. Otros métodos de medida de la velocidad de corrosión	17
2.2.6. Modelado eléctrico de la configuración de medida	20
2.3. Antecedentes	23
2.3.1. Gecor 6 y Gecor 8	23
2.3.2. Galvapulse	25
2.3.3. VoltaLab 21	26
3. Especificación	28
3.1. Introducción	28
3.2. Casos de uso	28
3.3. Medición de potencial	31
3.3.1. Rangos de los potenciales medidos	31
3.3.2. Frecuencia de muestreo	31
3.4. Cálculo de rangos de la fuente de corriente	33
3.4.1. Cálculo de resistencias óhmicas límite	33
3.4.2. Cálculo de resistencias de polarización límite	34
3.4.3. Estimación de corrientes máximas y mínimas a aplicar	35

3.5. Medición de temperatura	35
4. Diseño electrónico	37
4.1. Introducción	37
4.2. Alternativas para adquisición y control	39
4.2.1. Osciloscopios USB	39
4.2.2. Placas programables	40
4.2.3. Dispositivo elegido	41
4.3. Labjack U3 -LV	43
4.3.1. Reseña del dispositivo	43
4.3.2. Funciones en el sistema MECEHA	44
4.4. Circuito de I/O	46
4.4.1. Circuito de sensado	46
4.5. Fuente de corriente	53
4.6. Otros componentes	57
4.6.1. Guarda de confinamiento	57
4.6.2. Reguladores de voltaje	57
4.6.3. Protección contra descargas electrostáticos	58
4.6.4. Cortocircuito del capacitor CE-WE	58
4.7. Correcciones de Hardware	60
5. Diseño de software	64
5.1. Elección del lenguaje de programación	64
5.2. Interfaz de usuario	66
5.3. Descripción del software	73
5.3.1. Clases y componentes	73
5.3.2. Principales tareas e implementaciones	74
6. Errores	84
6.1. Incertidumbre en la corriente aplicada	85
6.2. Errores en la medida de voltaje	87
6.2.1. Error en la medida de E_{corr}	87
6.2.2. Error en la medida de la tensión asociada a R_P	88
6.3. Errores en la autocalibración	88
6.3.1. Caída en las llaves	90
6.3.2. Offset en amplificadores	90
6.3.3. Error de cuantización	90
6.3.4. Incertidumbre total en la autocalibración	91
6.4. Incertidumbre total en i_{corr}	92
7. Ensayos y calibración	94
7.1. Fuente de corriente	96
7.2. Circuito de sensado	102
7.3. Ensayo con modelo de Randle	104

7.4. Medidas en hormigón	106
8. Costo	116
9. Conclusiones y Perspectivas	117
Bibliografía	121
A. Código de la rutina de cálculo de errores	125
B. Costo del proyecto	130
C. Diseño alternativo de la electrónica de la etapa de I/O	133
C.1. Circuito de sensado	133
C.2. Fuente de corriente	134
D. Configuración de pines	138
E. Formato de registro de ensayo	139
F. PCB	142
G. Hoja de datos	145

Capítulo 1

Introducción

1.1. Corrosión de estructuras de hormigón armado

El hormigón armado es un material de construcción ampliamente utilizado y de larga duración. En estado normal, su armadura está protegida por una capa de óxido que se forma en las condiciones alcalinas dentro del hormigón. Sin embargo, este material presenta permeabilidad y, estando expuesto a agentes corrosivos éstos pueden alcanzar la armadura, la cual se corroe por ataques de cloruros u otros contaminantes. En algunos casos, esto resulta en un rápido deterioro de la resistencia de la estructura, y es la principal causa de daños y fallas tempranas, con grandes costos de mantenimiento, restauración y sustitución. Tanto el mantenimiento, la planificación de restauraciones o la estimación de la vida útil de una estructura requieren técnicas rápidas y no destructivas de inspección, que detecten tempranamente la corrosión de armadura, definan qué área de las estructuras precisan mantenimiento y den una medida de la tasa de corrosión.

El Instituto de Estructuras y Transporte realiza medidas de corrosión en probetas (prismas de hormigón con armaduras metálicas) con el fin de estudiar el fenómeno de la corrosión en estructuras. Las probetas se exponen de forma permanente en dos ambientes diferentes (un centro es en el Prado y otro en La Paloma, Rocha) y estudiando su evolución en el tiempo se deduce qué tan corrosivo es el entorno, información con la que luego se estima el nivel de corrosión de estructuras reales en dicho entorno.

Las medidas se realizan con el potencióstato/galvanostato VoltaLab 21, propiedad del Instituto de Ensayos de Materiales, es un equipo que presenta diversas desventajas respecto al estado del arte en la materia: tiene baja resolución, el software corre sobre sistemas operativos obsoletos y su gran tamaño resulta impráctico. Además, no brinda la posibilidad de realizar medidas directamente sobre estructuras reales, lo cual representa una carencia importante para las necesidades actuales de nuestro cliente, que actualmente realiza este tipo de medidas mediante métodos invasivos que implican extraer muestras de la estructura.

1.2. Objetivos

El proyecto consiste en desarrollar un dispositivo capaz de realizar mediciones eléctricas en estructuras de hormigón armado, con el fin de determinar el nivel de corrosión y la velocidad de corrosión de la armadura, evaluando de esta manera el riesgo potencial de deterioro de las mismas y la eventual necesidad de aplicación de medidas para contrarrestarlo. Esta medida debe poder realizarse en campo además de en probetas de laboratorio, lo que permite evaluar directamente el estado de estructuras reales.

Existen diferentes ensayos que permiten obtener los parámetros de interés. Analizando las diferentes opciones y luego de intercambios con el cliente, definimos que los ensayos a realizar por el dispositivo son:

1. **Medida del Potencial Libre de Corrosión** (también denominado Potencial de Media Celda, *half-cell potential*, en inglés): se mide el potencial E_{corr} de la armadura respecto a un electrodo de referencia. Este ensayo permite adquirir información cualitativa de las áreas de mayor riesgo a estar corroídas, con limitaciones en cuanto a estructuras en ciertas condiciones de humedad. Permite definir áreas de baja probabilidad de corrosión, y áreas con mayor probabilidad, que deben ser estudiadas cuantitativamente.
2. **Pulso Galvanostático**: se aplica un escalón de corriente que genera un cambio en el potencial de armadura, el cual es registrado en el tiempo para determinar los

parámetros relevantes involucrados en el fenómeno electroquímico de la corrosión, a saber:

- Resistencia Óhmica R_{ohm}
- Resistencia de Polarización R_P
- Corriente de Corrosión I_{corr}
- Velocidad de Corrosión o Densidad de Corriente de Corrosión i_{corr}

Este método permite obtener una medida cuantitativa de la corriente de corrosión. Conociendo el área de la armadura que se activa en el ensayo, la densidad de corriente de corrosión determina la velocidad de corrosión. A través de la misma podemos conocer cuantitativamente la corrosión de la armadura, dado que está vinculada unívocamente con el valor de i_{corr} . Por ello, el objetivo principal de MECEHA va a ser calcular i_{corr} de manera precisa, lo que implica un análisis de errores pormenorizado.

Para el caso de estructuras de campo, la corriente tiende a dispersarse por la armadura de la estructura y dicha área no es conocida. Por esta razón, el dispositivo debe implementar un método de confinamiento de corriente que la haga circular a través de una sección conocida, y de esta forma poder evaluar dicho parámetro.

3. **Medida de Resistividad:** se mide la resistencia óhmica del hormigón R_{ohm} , y a partir de la misma, se calcula ρ .

El dispositivo realizará también una estimación de la resistividad del hormigón, utilizando la misma configuración de pulso galvanostático pero por un período de tiempo menor, así como utilizando un electrodo de menor tamaño.

1.3. Organización del documento

Este documento constituye la documentación del proyecto MECEHA, que comienza con la presente introducción. Pasaremos a estudiar el fenómeno de la corrosión, desde un punto de vista puramente electroquímico, para luego abordar su modelado eléctrico. Analizaremos los distintos métodos de medida de la corrosión, en particular la medición del potencial libre de corrosión E_{corr} y de la densidad de corriente de corrosión i_{corr} , así como el confinamiento de la corriente aplicada. Estudiaremos otros equipos que miden corrosión, como Gecor 6, Gecor 8 y Galvapulse.

El problema a resolver es de una gran complejidad, por lo que la especificación técnica de nuestro equipo requirió un estudio pormenorizado. Se trata de trabajar con un amplio espectro de escenarios posibles: probetas de laboratorio, estructuras con una alta densidad de hierros, crucetas, etc. Eso implica diferentes recubrimientos, diámetros de varillas, etc. Estudiando estos casos, determinamos los valores mínimos y máximos de la corriente a inyectar en la estructura. Además, veremos los protocolos de ensayo, que fueron determinados con los clientes.

Más adelante se detalla el diseño de la electrónica para cumplir con la especificación técnica. Primero veremos el estudio de alternativas para la misma, introduciremos la placa de adquisición y control elegida. Estudiaremos la electrónica diseñada para poder implementar los ensayos, tanto los bloques principales como la etapa de medida de voltaje y fuente de corriente, como circuitos accesorios, como la generación de potenciales estables, protección contra descargas electrostáticas, etc.

El software de MECEHA se analiza en otro capítulo. Este software permite al usuario comandar la electrónica de MECEHA, por lo que se analizará la interfaz con el usuario. Asimismo, se realiza procesamiento de las señales, que también será estudiada.

Luego de ver el diseño de MECEHA, calcularemos los errores teóricos debidos a que los componentes no son ideales. MECEHA es básicamente un sistema de electrónica y software que manipula señales de voltaje y corriente, de muy bajo valor y con alta

precisión. Estudiaremos los errores en las señales eléctricas, y su propagación para el parámetro i_{corr} , que es el que brinda una medida cualitativa de la corrosión de la estructura.

Finalmente, veremos los ensayos y calibración de MECEHA, desde el nivel de componentes hasta el nivel de sistema. Analizaremos las medidas con hormigón y su contrastación con medidas por otro instrumento, mediante otro ensayo.

Cerramos con un capítulo de Conclusiones y Perspectivas, donde analizaremos el proyecto a nivel global, y estudiaremos posibles mejoras.

Capítulo 2

Introducción a la corrosión

2.1. Modelado del fenómeno de la corrosión

Los metales se encuentran en la naturaleza, en general, formando compuestos (óxidos, sulfuros, carbonatos, etc) con otros elementos. Sólo los metales llamados “nobles” aparecen normalmente en estado puro.¹ A los metales restantes, para usarlos en su forma elemental, es necesario someterlos a un proceso de reducción, lo que requiere comunicarles una cierta cantidad de energía (incrementar su energía de Gibbs). Así pues, el metal tenderá a perder este suplemento de energía para recobrar su estado termodinámicamente más estable. El proceso por el cual el metal vuelve a su estado natural y que corresponde a una *oxidación* se conoce como corrosión y representa la conversión paulatina del metal en sus formas combinadas.

Los mecanismos por los que puede transcurrir el proceso de corrosión son básicamente dos:

1. a través de una oxidación directa (también llamada corrosión seca) de toda la superficie metálica,
2. mediante la intervención de una solución acuosa que genera la aparición sobre el metal de zonas con diferente comportamiento (conocida como corrosión húmeda)

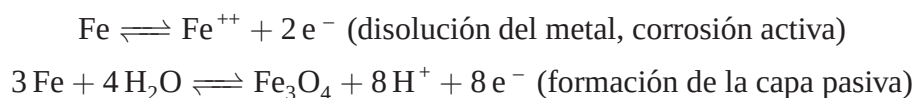
El primero de estos mecanismos ocurre cuando los metales trabajan a altas temperaturas y supone una oxidación de todo el metal (en el sentido estricto de pérdida de

¹Esta sección fue básicamente extraída de los siguientes artículos: [1], [2],[3] y [4]

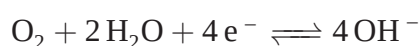
electrones por parte del metal). Es característico de este mecanismo que los productos de corrosión queden adheridos a la superficie, en ocasiones formando una barrera física que se opone al progreso del ataque posterior.

El segundo de los mecanismos es el que ocurre en la mayoría de los casos de corrosión que se detectan, ya que el agua en estado líquido está casi omnipresente en todos los medios naturales o sintéticos que nos rodean. En este caso, el proceso transcurre mediante un mecanismo electroquímico, lo que significa que se generan zonas en las que el metal se disuelve (zonas anódicas) y otras en las que permanece inalterado (catódicas). Se forma así una “batería”, que para que funcione ininterrumpidamente exige que el contacto eléctrico entre ánodo y cátodo se mantenga y, además, se cierre el circuito a través de un electrolito (en nuestro caso, el propio hormigón) mediante la circulación de iones. En cuanto a los productos de la corrosión, éstos se distribuyen, en general, heterogéneamente por la superficie y pueden no tener ningún carácter protector.[1] Debido a que la corrosión acuosa es mucho más frecuente que la oxidación directa, analizaremos solamente la primera a los efectos de esta introducción.

La cantidad de corrosión por unidad de área superficial de armadura, se denomina velocidad de corrosión cuando se relaciona con el tiempo. Este parámetro puede ser medido por diferencia de peso entre antes y después de someter al metal a un ambiente corrosivo. Por otro lado, la corrosión acuosa implica reacciones químicas en las que los reaccionantes intercambian electrones, que viajan de unas regiones del material a otras, formando una corriente eléctrica I_{corr} . La reacción en el ánodo es [2]:



mientras que los electrones liberados viajan a través del metal al cátodo local y son utilizados en la reacción de reducción del oxígeno:



La segunda ley de Faraday (1834-1840), establece la relación entre la pérdida de peso y la corriente eléctrica I_{corr} [3]:

$$\frac{I_{corr}t}{F} = \frac{Z\Delta W}{W_m}$$

Donde

- I_{corr} es la corriente eléctrica en amperes
- t es el tiempo en segundos
- F es la constante de Faraday ($96,5kC$)
- ΔW es la pérdida de peso debido a la corrosión
- W_m es el peso molecular del metal
- Z es su valencia

En lugar de trabajar con la corriente I_{corr} , normalmente se presenta la densidad de corriente i_{corr} , que es denominada *velocidad de corrosión* y se expresa en $\mu A/cm^2$ o $\mu m/año$ asumiendo corrosión uniforme. Esto es, si el ataque es homogéneo, la corriente obtenida en los experimentos se relaciona con la superficie metálica expuesta a la corrosión, y por lo tanto está dada en $\mu A/cm^2$. La conversión a $\mu m/año$ de penetración del ataque se puede hacer usando la densidad del metal.

En síntesis, considerando corrosión uniforme la densidad de corriente de corrosión nos da una medida del estado y la velocidad corrosión del área estudiada. La relación se resume en la tabla 2.1, extraída de [4].

Densidad de corriente de corrosión (i_{corr})	Condición de la armadura
$i_{corr} < 0,1\mu A/cm^2$	Corrosión despreciable
$0,1\mu A/cm^2 < i_{corr} < 0,5\mu A/cm^2$	Corrosión baja
$0,5\mu A/cm^2 < i_{corr} < 1,0\mu A/cm^2$	Corrosión moderada
$i_{corr} > 1,0\mu A/cm^2$	Corrosión alta

2.2. Métodos de medida de la corrosión en armaduras

2.2.1. Potencial libre de corrosión

También llamado potencial de media celda (*half-cell potential*), este ensayo es ampliamente utilizado en medidas de corrosión, ya que revela indicios de zonas afectadas.

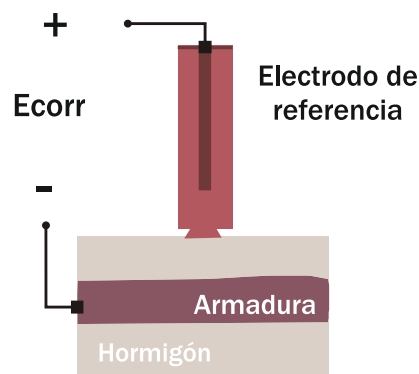


Figura 2.1: Configuración de medida del potencial libre de corrosión E_{corr}

En el ensayo se hace uso de un electrodo de referencia, el cual es colocado sobre la estructura de hormigón, de forma de configurar una celda electrolítica. Se basa en el mismo principio de funcionamiento de una batería, en el que se genera una diferencia de potencial entre dos electrodos de metales diferentes situados en medios electrolíticos, debido a reacciones electroquímicas de oxidación y reducción. En este caso la armadura de la estructura y la barra del electrodo de referencia cumplen el rol de los electrodos metálicos, mientras que el hormigón y la solución del electrodo de referencia lo hacen como medios electrolíticos.

Este ensayo por sí mismo no revela el grado ni la velocidad de corrosión, pero sí el riesgo de que en la zona ensayada esté ocurriendo un proceso de corrosión avanzada. Como valor típico el potencial libre de corrosión es de pocos cientos de mV, y la probabilidad de corrosión aumenta cuanto mayor sea en valor absoluto.[\[1\]](#)

2.2.2. Medida de resistividad

Al igual que el potencial libre de corrosión, la resistividad del hormigón da una medida cualitativa acerca de la corrosión de la armadura en su interior. Resistividades menores implican que el hormigón es más conductor, lo que es síntoma de la presencia de impurezas, cuyos iones facilitan el paso de corriente eléctrica. Estas impurezas son las que atacan la armadura de forma heterogénea, iniciando el proceso de corrosión. O sea que cuanto menor la resistividad, mayor probabilidad de corrosión de las barras.

La mejor forma de calcular la resistividad obviamente sería extraer muestras del hormigón, para medirlas en laboratorio, pero no es práctico en estructuras reales. Los equipos como Gecor 8 lo hacen de forma indirecta.[5] Miden la resistencia óhmica del hormigón inyectando un impulso de corriente, y luego, a través de un *factor de forma* K , calculado empíricamente, obtienen la resistividad del hormigón:

$$\rho = KR_{ohm} \quad (2.1)$$

donde $K = 2D$ usualmente, siendo D el diámetro del contraelectrodo CE, que es mucho más chico que el usado para los demás ensayos. A pesar de ser un método indirecto, está validado por organismos como RILEM². [6]

2.2.3. Pulso galvanostático

Para este ensayo se utiliza la configuración que se muestra en la figura 2.2, en la que se añade a la de potencial de media celda un contraelectrodo, por el cual circula un pulso de corriente que se inyecta en la armadura.

En equilibrio (potencial libre de corrosión E_{corr}) las corrientes anódica y catódica se compensan, debido a la electroneutralidad de la muestra [7], por lo que la corriente inyectada es la corriente neta por la celda.

²Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras, RILEM por su nombre en francés (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*), fundada en junio de 1947 y con grupos de 70 países asociados.

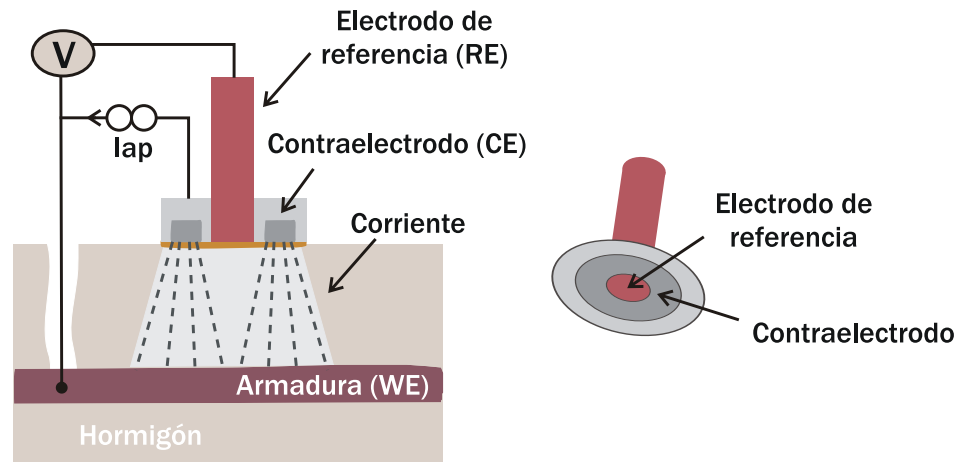


Figura 2.2: Configuración para el ensayo de pulso galvanostático. Las líneas en el hormigón indican la corriente eléctrica.

El pulso de corriente produce un salto en el potencial de media celda (que inicialmente es el potencial libre de corrosión E_{corr}) y luego un aumento gradual hasta un valor límite. El fenómeno puede describirse por el modelo simplificado que se muestra en la figura (modelo de Randle, figura 2.3).

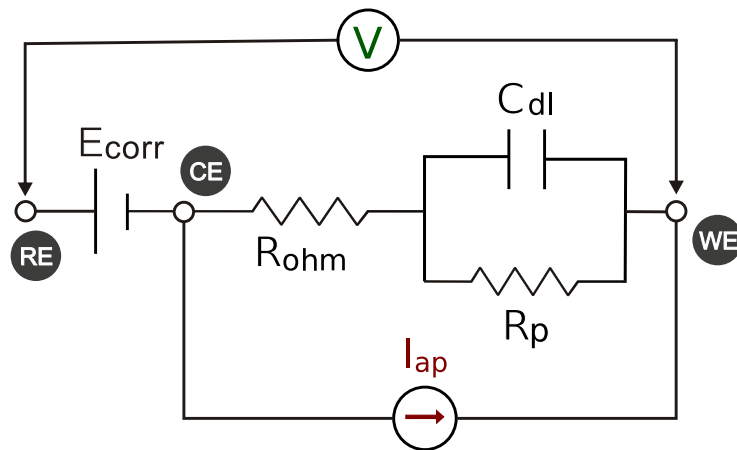


Figura 2.3: Modelo de Randle.

- R_{ohm} : Resistencia óhmica. Representa esencialmente la resistencia del hormigón.
- R_p : Resistencia de polarización. Es una resistencia sin representación física cuyo valor depende del grado de corrosión.

- C_{dl} : Capacitancia de doble capa. Parámetro asociado a la protección de la armadura que describe el comportamiento transitorio del fenómeno.

La resistencia de polarización fue definida por Stern como[2]:

$$R_P = \left(\frac{\Delta I}{\Delta E} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (2.2)$$

donde ΔE es el sobrepotencial, medido desde el potencial de equilibrio E_{corr} y ΔI la corriente circulando por la celda. Este parámetro puede ser vinculado con la corriente de corrosión por medio de la ecuación de Stern-Geary:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_P} \quad (2.3)$$

donde B es una constante, cuyo valor en casos de estructuras con corrosión incipiente es de $50mV$ y en casos de estructuras con corrosión en curso es de $26mV$. [3] En general:

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303 (\beta_a + \beta_c)} \quad (2.4)$$

siendo β_a y β_c las pendientes de las semireacciones anódica y catódica, respectivamente, en coordenadas semilogarítmicas (rectas de Tafel, ver figura 2.4). [7]

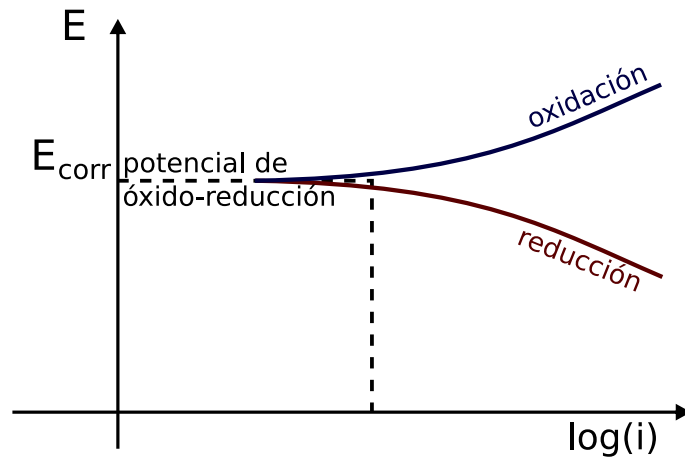


Figura 2.4: Curvas de Tafel. [8]

Si consideramos que inicialmente el condensador C_{dl} se encuentra descargado y no se inyecta corriente en el circuito, la diferencia de potencial medida será igual a E_{corr} .

Al aplicar una corriente constante I_{ap} , ésta circulará por la resistencia óhmica e inicialmente por el condensador C_{dl} que se comporta como un cortocircuito. A medida que éste se carga, la corriente comienza a circular por la resistencia R_P hasta llegar a un estado estacionario en el que el condensador queda cargado y toda la corriente circula por la serie de las dos resistencias R_{ohm} y R_P (ver figura 2.5).

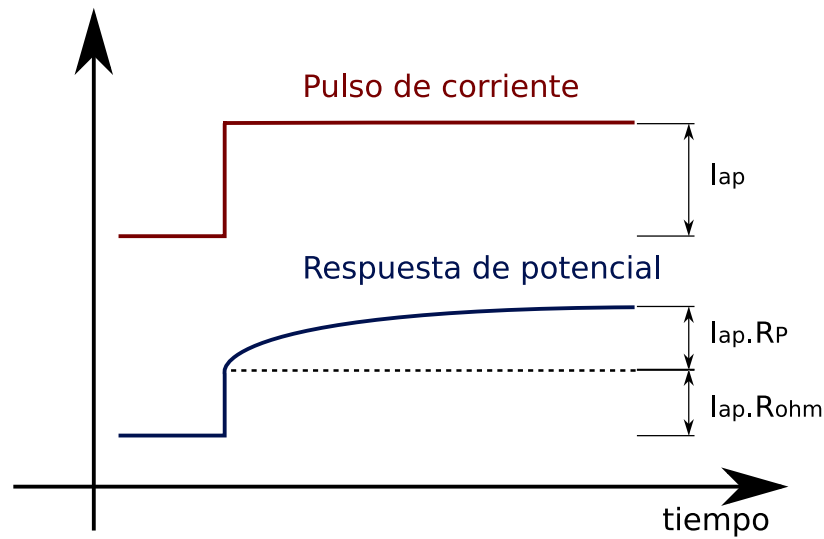


Figura 2.5: Corriente aplicada y respuesta en potencial, en función del tiempo

Del modelo resulta simple notar que el voltaje medido se compone de la caída en ambas resistencias más el potencial E_{corr} :

$$V_{medida} = V_{ohm} + V_P + E_{corr} \quad (2.5)$$

Por la ley de Ohm, se cumple que la caída en la resistencia óhmica es:

$$V_{ohm} = I_{ap} R_{ohm} \quad (2.6)$$

Debido a que I_{ap} es constante esta caída también lo es, y puede ser fácilmente medida en los primeros instantes de aplicar dicha corriente, cuando el condensador actúa como cortocircuito ($V_P = 0$) y se cumple que:

$$V_{medida} = V_{ohm} + E_{corr} \quad (2.7)$$

Conociendo E_{corr} , el valor de V_{ohm} , y por lo tanto el de R_{ohm} , quedan entonces determinados.

Despejando en la ecuación 2.5, obtenemos:

$$V_P = V_{medida} - V_{ohm} - E_{corr} \quad (2.8)$$

Una vez que el régimen es alcanzado y la corriente I_{ap} circula únicamente por la serie de las resistencias R_{ohm} , R_P , aplicando nuevamente la ley de Ohm, tenemos que:

$$R_P = \frac{V_P}{I_{ap}} \quad (2.9)$$

Es decir, que inyectando una corriente conocida I_{ap} y midiendo el potencial de la configuración, podemos determinar R_P y por lo tanto I_{corr} . Debido a esto, si conocemos la superficie de varilla expuesta al pulso de corriente, podemos deducir la densidad de corriente de corrosión, y con ella estimar el grado y la velocidad de corrosión.[9]

MECEHA deberá realizar este ensayo, inyectando el pulso de corriente, relevando el potencial de media celda y calculando a partir de la medición la densidad de corriente de corrosión.

2.2.4. Guarda de corriente

El ensayo de pulso galvanostático devuelve como resultado el valor de la corriente de corrosión (I_{corr}). Para poder determinar a partir de este valor la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) y de esta forma estimar la velocidad de corrosión de la armadura, debemos considerar la superficie de la armadura expuesta a la excitación de corriente.

Cuando el ensayo se realiza en probetas de hormigón pueden delimitarse sectores de la armadura mediante el uso de pinturas aislantes, o en caso de probetas de dimensiones muy reducidas puede considerarse que toda la superficie de la varilla está expuesta. Para el caso de estructuras de campo o probetas de longitudes considerables que no cuentan con delimitación de sectores, ya no es evidente el valor del área expuesta, debido a la dispersión de las líneas de campo eléctrico a lo largo de la varilla.

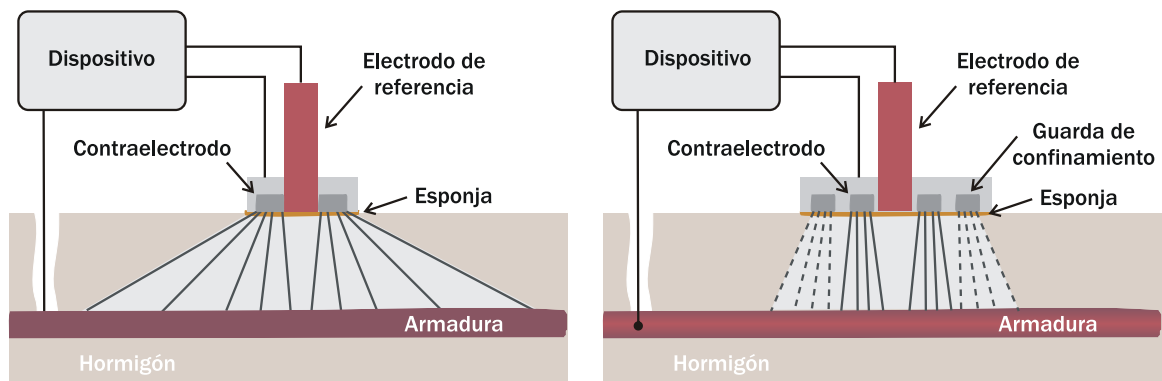


Figura 2.6: Ensayo del pulso galvanostático. Sin guarda de confinamiento (izquierda), con guarda de confinamiento (derecha)

Existen diferentes técnicas para resolver este problema. Una de ellas hace uso de líneas de electrodos de referencia para analizar la atenuación de potencial con la distancia a lo largo de la varilla, y de esta forma poder estimar el área afectada por el ensayo.[10]

Otro enfoque es intentar delimitar el área expuesta confinando el campo eléctrico a cierta área conocida mediante el uso de una guarda de confinamiento o guarda de corriente, que consiste en un electrodo en forma de anillo que rodea al contraelectrodo, y que actúa interfiriendo en el campo eléctrico original restringiendo el área de activación de la armadura.

Existen dos métodos que utilizan guardas de confinamiento. El primero (figura 2.7), que se trata de un *confinamiento no modulado*, se basa en la idea de desplazar los efectos de borde fuera del área de interés mediante la inyección de corrientes que circulan por otro circuito distinto al del ensayo. Para ello se fija el potencial de la guarda al del contraelectrodo mediante alta impedancia, de manera de simular una extensión del electrodo y lograr que el campo original se asimile a uno uniforme en un área similar a la del contraelectrodo. [11] [1] [9] [12].

El otro método, conocido como *confinamiento modulado*, utiliza dos electrodos de referencia auxiliares entre la guarda y el contraelectrodo, formando un circuito tipo ba-



Figura 2.7: Confinamiento no modulado

tería entre los mismos similar al que se establece entre el electrodo de referencia principal y la armadura. La diferencia de potencial que se establece entre estos puntos es monitoreada. En condiciones normales, este potencial debería ser de poca significancia, ya que al tratarse de electrodos de referencia análogos éste se produce solamente por asimetrías de la estructura de hormigón. Mediante un sistema de realimentación, el confinamiento modulado inyecta corriente por la guarda de forma de mantener la diferencia de potencial inicial a lo largo del ensayo, que tendería a variar debido al campo que se dispersa de los límites del contraelectrodo (ver figura 2.8).[12][13]

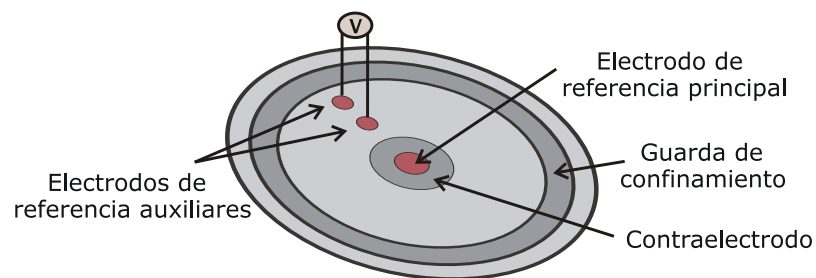


Figura 2.8: Configuración de electrodo para implementar confinamiento modulado. [5]

Debido al interés de que MECEHA pueda ser utilizado en campo, se debió optar entre las técnicas mencionadas anteriormente. Luego de una evaluación en conjunto con el cliente, y considerando tiempos y presupuesto disponible, la decisión fue de implementar el confinamiento no modulado.

2.2.5. Otros métodos de medida de la velocidad de corrosión

Curvas de polarización

El primer método usado para medir I_{corr} fue el “método de intersección” de las curvas de polarización, basándose en la extrapolación a E_{corr} de las ramas anódicas y catódicas de esas curvas (ver figura 2.4). Su uso fue muy limitado, debido a su naturaleza destructiva, obligando a que para cada medida se tuviera que utilizar una nueva barra por las alteraciones producidas durante la polarización de la rama anódica.

Una mejora de este procedimiento, llamada “polarización lineal”, consiste en aplicar un sobrepotencial de manera continua y cuasiestática, registrando la corriente obtenida. La linealidad de la curva tensión-corriente se da en un rango de hasta unos $30mV$, aunque se pueden dar casos donde con $100mV$ de sobrepotencial tengamos una tendencia lineal. La resistencia de polarización se obtiene como en la ecuación 2.2, es decir, la pendiente en torno a E_{corr} . [3]

Al igual que en el ensayo galvanostático, se debe confinar el tramo de armadura polarizado o conocer por algún método la superficie de armadura que participa en el ensayo.

Ruido electroquímico

Esta técnica se basa en analizar pequeñas variaciones en voltaje o corriente (del orden de μV), registradas durante cierto tiempo, en situación de reposo. Este fenómeno ha sido observado especialmente en experimentos relacionados con el proceso de *pitting* (“picaduras” en inglés, corrosión puntual). Después de registrar las fluctuaciones con equipos muy precisos, se le aplica la transformada de Fourier (FFT) a la señal de ruido. El rango de frecuencias registradas va desde los $10\mu Hz$ hasta los Hz . A partir de la transformada de Fourier, se obtiene el valor de i_{corr} . [3]

De todos modos, la validez de este ensayo es cuestionada, dado que no se han publicado muchas medidas en la bibliografía. [4]

Ensayo potencioestático

El recíproco del ensayo galvanostático (implementado por MECEHA) es el potencioestático. En lugar de inyectar corriente y medir potencial, se aplica un sobrepotencial de como máximo $10mV$ (para trabajar en la zona lineal) y se registra la respuesta en corriente (figura 2.9). Es el ensayo que desde hace muchos años vienen realizando nuestros clientes, con el equipo VoltaLab 21. La ventaja de este ensayo es que la sobrepolarización máxima es impuesta, lo que no ocurre en el ensayo galvanostático, donde a priori no se sabe con exactitud la sobrepolarización resultante de un pulso de corriente dado.

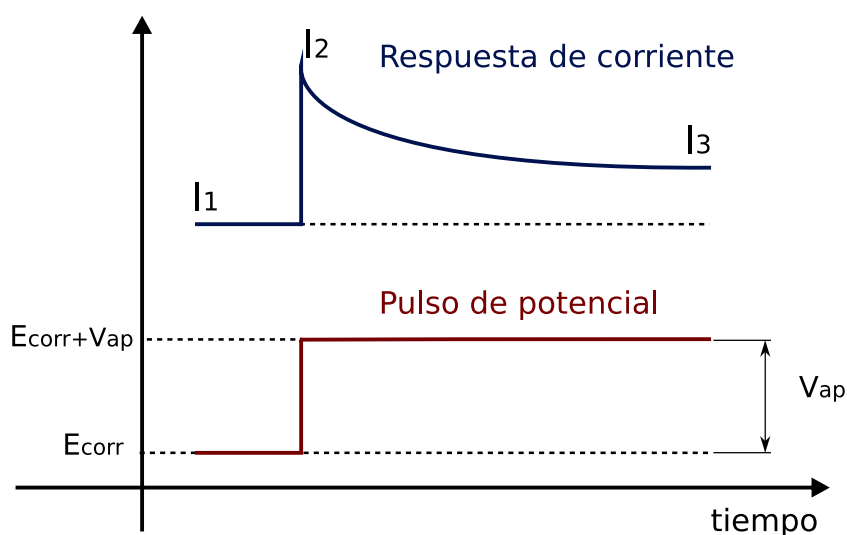


Figura 2.9: Ensayo de pulso potencioestático

Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

Este método se basa en la aplicación de una señal alterna (AC), en lugar de continua a la barra como electrodo de trabajo (WE). La instrumentación requerida es mucho más compleja, dado que se necesita un analizador de espectro para aplicar y analizar la señal de AC.

La técnica consiste en la aplicación al electrodo de trabajo, de una señal de voltaje (o corriente) de pequeña amplitud ($10 - 20mV$ pico a pico, en torno a E_{corr}), en un extenso

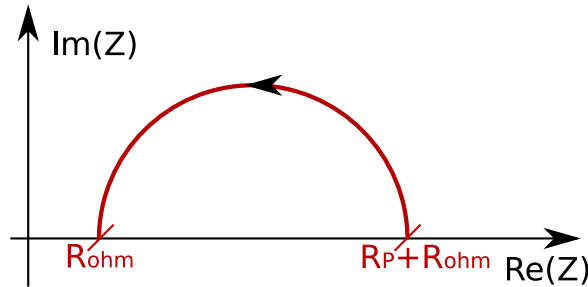


Figura 2.10: Diagrama de Nyquist de la respuesta al ensayo EIS.

rango de frecuencia. La respuesta para cada frecuencia es una señal sinusoidal (debido a la baja amplitud de la excitación, estamos en zona lineal), que tiene distinta amplitud y fase que el estímulo. El cociente $\frac{\Delta E}{\Delta I}$ es ahora la impedancia Z :

$$Z = R_{ohm} + \frac{R_P}{1 + i\omega C_{dl}R_P} \quad (2.10)$$

donde $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia de la excitación, i es el número que cumple $i^2 = -1$.

Esta impedancia imaginaria, dependiente de ω , puede ser graficada en el plano complejo en un diagrama de Nyquist³. Su módulo y su argumento son graficados en función de la frecuencia, en escala logarítmica, en un diagrama de Bode.⁴ [3]

El problema es que debido a la gran complejidad del fenómeno a medir, en la práctica raramente se obtienen semicírculos (en el caso del diagrama de Nyquist), sino que en apariencia se tienen varios o algunos incompletos incluso, en bajas frecuencias. El equipamiento es más costoso y sofisticado, además de ser necesario más tiempo para realizar cada ensayo. Esto se debe a que, en el caso de velocidades bajas de corrosión, se deben alcanzar frecuencias de $1mHz$ o menores, lo que significa varias horas para obtener un sólo valor.

³Diagrama en el plano complejo, donde se grafica el valor de un número dependiente de una variable real, por lo general la frecuencia angular. Es un diagrama que se utiliza ampliamente en ingeniería para calcular parámetros relacionados con la estabilidad de sistemas.

⁴Diagramas de módulo y argumento (o fase) de un número complejo dependiente de una variable real. Se utiliza para generalmente para estudiar circuitos eléctricos, pero también para evaluar respuestas de sistemas mecánicos, térmicos, etc.

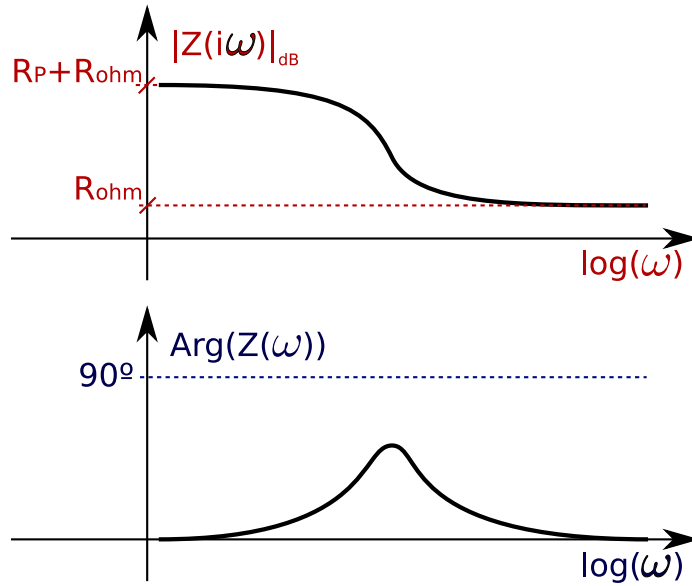


Figura 2.11: Diagrama de Bode de la respuesta al ensayo EIS.

Análisis armónico

El método de análisis armónico es una extensión del método de impedancia electroquímica. Se trata de una técnica relativamente reciente, que es más rápida y más directa que la de impedancia. Se lleva a cabo aplicando un voltaje alterno V_0 a una frecuencia única, midiendo la respuesta en corriente I_1 y también dos armónicos más altos I_2 e I_3 . Usando el hecho de que el medio en estado de corrosión actúa como rectificador y que el segundo armónico de la respuesta es no lineal con respecto al potencial libre de corrosión E_{corr} , se puede determinar la corriente de corrosión:

$$I_{corr} = \frac{I_1^2}{\sqrt{48} \sqrt{2I_1 I_3 - I_2^2}} \quad (2.11)$$

2.2.6. Modelado eléctrico de la configuración de medida

En la figura 2.12 podemos ver una probeta de medida, a la que se ha conectado el equipo MECEHA para realizar un ensayo de pulso galvanostático. El equipo impone una corriente I_{ap} entre los puntos A e I, mientras que sensa la diferencia de potencial entre los puntos I y H, con alta impedancia. La configuración puede ser modelada

eléctricamente por el circuito de la figura 2.13 [14].

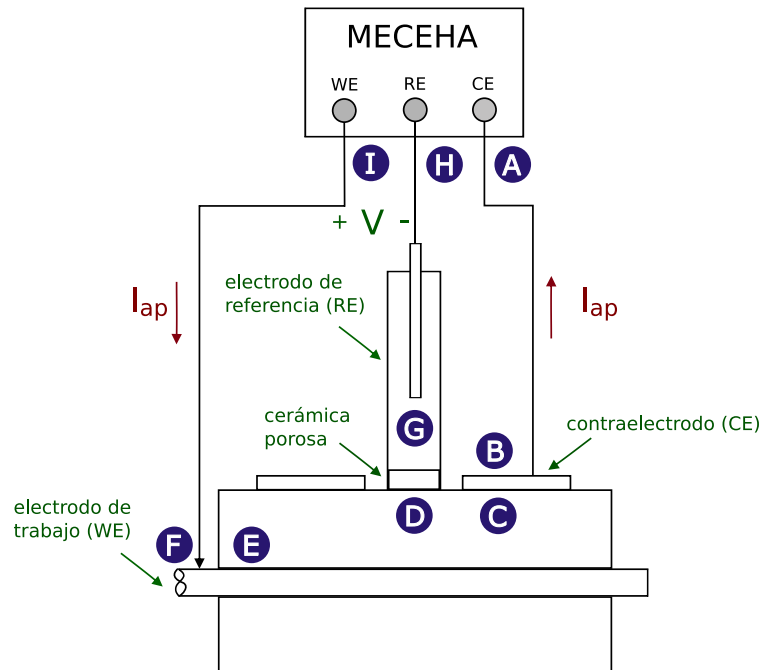


Figura 2.12: Configuración experimental de medida

En el modelo se representan las capacidades y resistencias que ofrecen los diferentes medios y transiciones de la configuración, y también se incluyen dos fuentes de tensión. La fuente V_1 representa el efecto de offset que genera el electrodo de referencia, y la fuente V_2 la tensión generada debido a la diferencia entre los metales del contraelectrodo y la armadura.

La reacción electroquímica de corrosión se vincula directamente al parámetro de la resistencia de polarización R_P , por lo que la diferencia de potencial de interés sería la que se produce entre los puntos E y F, $V^* = V_{FE}$. Desafortunadamente, el punto E es teórico e inaccesible, por lo que recurrimos a medir la diferencia de potencial entre I y H, V_{IH} .

Eléctricamente, los puntos F e I se encuentran al mismo potencial, así como los puntos A y B. Asimismo, debido a la alta impedancia de la etapa de medida de voltaje (entre puntos I y H), la corriente por el electrodo de referencia es despreciable, por lo

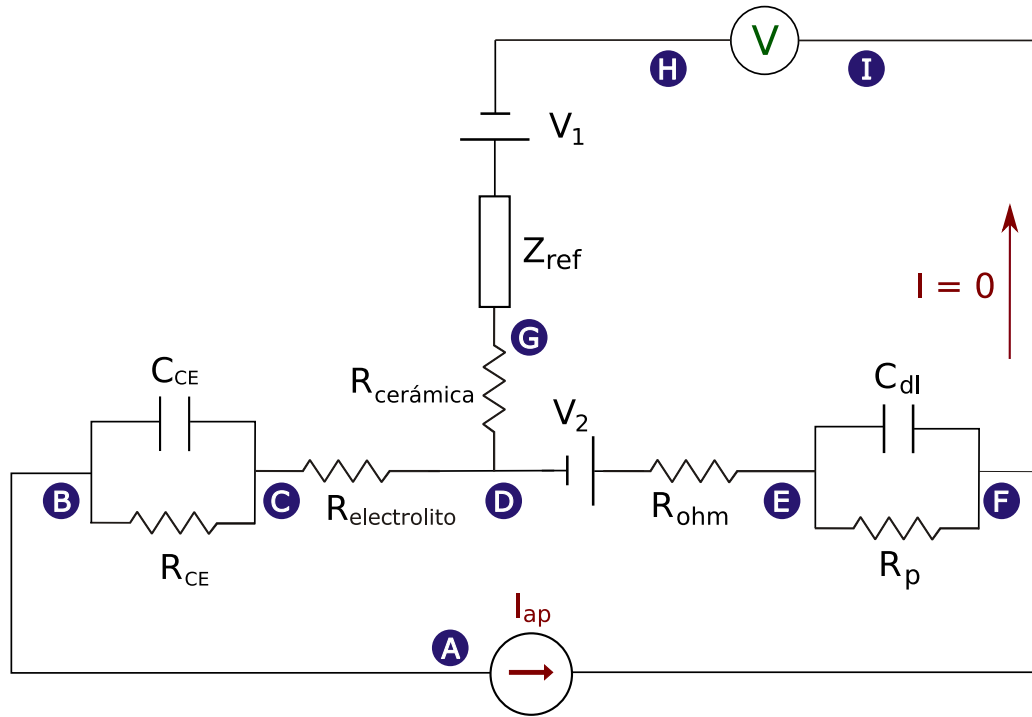


Figura 2.13: Modelo eléctrico de la configuración de medida [14]

que eléctricamente, los puntos D y G son equivalentes. Por otro lado, desde el punto de vista de la medida de potencial entre los puntos I y H, las fuentes V_1 y V_2 siempre aparecerán sumadas y pueden considerarse una misma, la cual debe tener el valor del potencial libre de corrosión E_{corr} ya que ésta es la lectura cuando el condensador C_{dl} se encuentra descargado y no circula corriente por las resistencias R_{ohm} y R_p . Cabe destacar también que la corriente I_{ap} impuesta por la fuente circulará entre los puntos F y B, pero en particular entre los puntos de interés F y D, por lo que considerando la fuente ideal a los efectos del ensayo resulta indistinto suponerla conectada en cualquiera de esos puntos.

Considerando las observaciones anteriores, podemos obtener el modelo simplificado para el ensayo y la configuración en cuestión, mostrado en la figura 2.14.

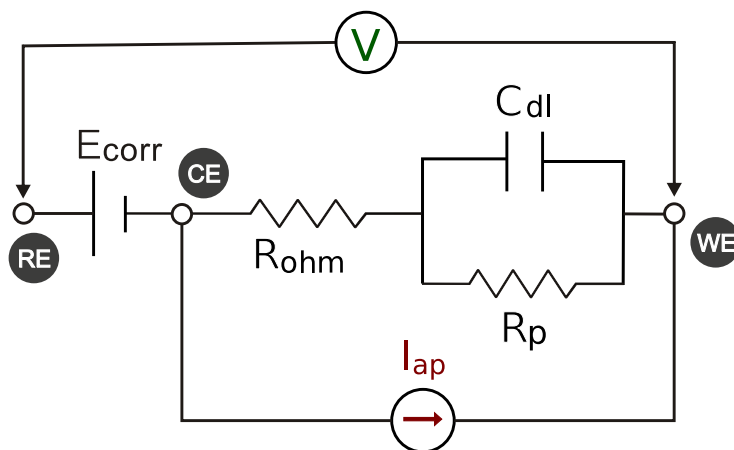


Figura 2.14: Modelo de Randle

2.3. Antecedentes

Existen pocos equipos para la medición de la velocidad de corrosión. Los más conocidos son Gecor 6, Gecor 8 y GalvaPulse. En diversos artículos académicos del tema se realizan comparaciones entre ambas líneas de equipos (Gecor vs GalvaPulse). Dado que ambos equipos no miden lo mismo, se estudian parámetros de “calibración”, para uniformizar las medidas. [15]

2.3.1. Gecor 6 y Gecor 8

Los corrosímetros Gecor 6 y Gecor 8 fueron desarrollados por investigadores del Instituto Eduardo Torroja, España, en colaboración con la empresa española GEOCI-SA (Geotecnia y Cimientos S.A.). En particular, Gecor 6 fue creado en el marco del proyecto Eureka 401 (1992), ATYCA, CDTI; mientras que Gecor 8 lo fue en los programas ATYCA (1998-1999), CDTI,(1998) IMADE(1998). [16] Ambos aparatos son comercializados por la empresa estadounidense James Instruments⁵, que se dedica a la fabricación de equipos de pruebas no destructoras para el hormigón y otros materiales de grano grueso. Suministra instrumentos que miden y analizan la resistencia, estructura, corrosión y humedad en el hormigón.[17]

Gecor 6 (figura 2.15) es un equipo bastante antiguo (17 años de antigüedad), que fue

⁵www.ndtjames.com



Figura 2.15: Gecor 6 de James Instruments.

desarrollado durante 4 años por un equipo de investigadores. Fue patentado en 1993 en la Oficina de Patentes de Estados Unidos (United States Patent and Trademark Office).[18] Permite medir la velocidad de corrosión, con confinamiento de la corriente. Es poco configurable, dado que por ejemplo usa como constante $B = 26mV$ para la ecuación de Stern-Geary, sin poder modificarla. Tampoco permite configurar el tiempo de medida, siendo este de unos 2 a 5 minutos. Mide el potencial de corrosión y la resistividad del hormigón. No devuelve las curvas medidas, sino tan sólo los resultados de E_{corr} , I_{corr} , resistividad del hormigón. Estos datos pueden ser leídos en un display o descargados en una computadora, via una interfaz RS-232. Tiene un peso de $4kg$, es portátil, alimentándose con 4 baterías alcalinas tipo D y consumiendo $1W$ [19]

Gecor 8 (figura 2.16), entretanto, es un equipo más moderno, que data del año 1998. Realiza los ensayos de pulso galvanostático para medir la velocidad de corrosión, con confinamiento modulado. Si no se logra confinar, el equipo da una alarma al usuario. También mide el potencial de corrosión y la resistividad, permitiendo realizar un mapeo de una estructura y poder determinar así los lugares con mayor probabilidad de tener corrosión. Los tiempos de ensayo son de $30s$ a $100s$, mucho menores a los de Gecor 6. Usando otro electrodo, logra medir velocidad de corrosión en estructuras sumergidas o muy húmedas, sin necesidad de tener guarda de confinamiento. Las medidas pueden

ser leídas en tiempo real en una computadora, con sistema operativo Windows.[5] Al contrario del Gecor 6, no tiene ninguna de sus partes patentadas.



Figura 2.16: Gecor 8 de James Instruments.

2.3.2. Galvapulse

Por otra parte, la empresa Germann Instruments⁶, que tiene oficinas en Dinamarca y los Estados Unidos, ha desarrollado otro aparato para medir la corrosión de estructuras, denominado GalvaPulse (figura 2.17). Este equipo, al igual que los de James Instruments, mide el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión, mediante el ensayo de pulso galvanostático. Del mismo obtiene R_P y R_{ohm} , aunque no la resistividad, puesto que usa un sólo tipo de electrodo, con confinamiento (al parecer no modulado).

Permite realizar mapeos del potencial de corrosión y la velocidad de corrosión (y graficarlo en 3D en una computadora), aunque no se pueden extraer las curvas de respuesta en potencial. Los ensayos de medida de potencial de media celda y resistencia óhmica son de 1s a 2s, mientras que los de pulso galvanostático tardan de 5s a 10s. La corriente aplicada va desde los $5\mu A$ hasta los $400\mu A$. Utiliza $B = 26mV$, sin poder cambiar esa configuración. El error en la medida de potencial es de $\pm 5mV$, mientras

⁶www.germann.org

que en la medida de la resistencia óhmica es de $\pm 5\%$. En regiones pasivas (velocidades de corrosión menores a $1\mu\text{m}/\text{año}$), GalvaPulse puede sobreestimar la corrosión por un factor de 3 o 4. Normalmente, la velocidad de corrosión puede ser subestimada o sobreestimada por un factor de 2, sin contar otros errores como lo que provienen por no conocer exactamente el área afectada (a pesar del confinamiento) o las variaciones en el tiempo debido a las condiciones de humedad y temperatura del hormigón.

Es sumamente portátil, dado que consiste básicamente en un pocketPC, con un conector serie para el electrodo de Ag/AgCl. [20]

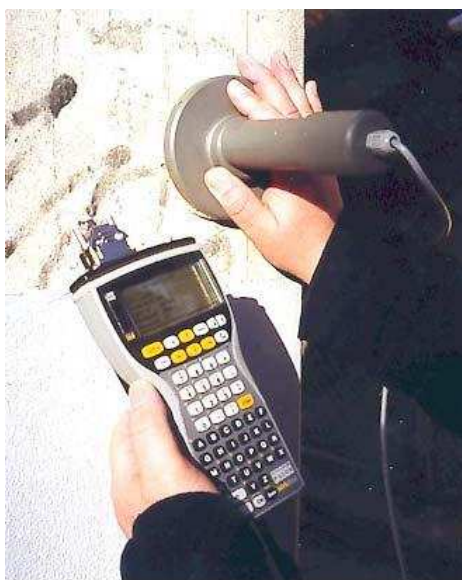


Figura 2.17: Galvapulse de Germann Instruments.

2.3.3. VoltaLab 21

En la actualidad, las medidas de corrosión del Instituto de Estructuras y Transporte son realizadas con el equipo VoltaLab 21 de Radiometer Analytical⁷, propiedad del Instituto de Ensayo de Materiales. VoltaLab 21 es un potenciostato/galvanostato de dimensiones 485mm x 300mm x 88mm y un peso de 13kg, que tiene un generador de señales integrado. Puede comandarse desde el panel frontal (cuenta con botonera y pantalla de cristal líquido) o desde su software específico (VoltaMaster 4). La velocidad

⁷www.radiometer-analytical.com

de muestreo máxima que hemos logrado con este aparato es de una muestra cada $0,6s$ ($1,7Hz$), aunque normalmente los ensayos son realizados con tasas menores. VoltaLab 21 registra el potencial libre de corrosión E_{corr} y la resistencia de polarización R_p y puede trabajar conectado a la red o flotante. En la medida de potencial tiene una resolución de $1mV$, mientras que en la de corriente llega hasta $0,1nA$ (ver figura 2.18).[21]



Figura 2.18: VoltaLab 21 de Radiometer Analytical (imagen tomada del sitio oficial de la empresa).

Para nuestros clientes, VoltaLab 21 es una caja negra, lo cual es un inconveniente a la hora de trabajar en actividades de investigación científica. Al usarlo, descubrimos que no actúa como se espera, porque por ejemplo, para medir el potencial libre de corrosión (que es un ensayo pasivo) y conectar el contraelectrodo, éste fija un potencial. Otra cosa que pudimos constatar es que en el ensayo galvanostático, VoltaLab 21 cambia el potencial de media celda, antes de inyectar la corriente.

Capítulo 3

Especificación

3.1. Introducción

Una vez analizado el fenómeno de la corrosión y los métodos de medida, debemos diseñar MECEHA. Para lograrlo, precisamos de una especificación más detallada, tanto de los protocolos de cada ensayo, como de los rangos de las señales en juego. Se trata de un aspecto clave, dado que un error en la especificación puede ocasionar varios errores en el diseño.

Presentaremos, en primer lugar, los protocolos de ensayo, en un formato de casos de uso, tal como se usa en el desarrollo de software. Luego calcularemos los rangos de las señales involucradas, principalmente los valores de la corriente a inyectar, I_{ap} .

3.2. Casos de uso

MECEHA llevará a cabo tres medidas básicas: potencial libre de corrosión, resistividad y velocidad de corrosión. A continuación describiremos los casos de cada uno de ellos. El objetivo al escribirlos fue dejar en claro el procedimiento de ensayo, de modo de entenderlos completamente y de diseñar la electrónica y el software para realizarlos.

Nombre	Medida de resistividad
Descripción	Estimación de la resistividad del hormigón bajo la superficie del electrodo.
Actores	Usuario, MECEHA
Precondiciones	MECEHA encendido y conectado a laptop con Windows XP
Flujo normal	1. El Usuario conecta una pinza a la barra y coloca el electrodo sobre el hormigón que cubre la barra. 2. Usuario pide por software medir el potencial de corrosión a MECEHA e ingresa la corriente a inyectar. 3. MECEHA inyecta un pulso de corriente de duración fija (pocos ms), calcula la resistencia óhmica R_{ohm} y la resistividad $\rho = 2R_{ohm}D$. 4. MECEHA despliega el resultado de la resistividad en pantalla, en $\Omega \cdot m$.
Flujo alternativo	A) Si no se puede medir la resistividad por problema de comunicación. 3A. MECEHA devuelve error. 3B. El Usuario conecta de nuevo a MECEHA a la laptop.
Postcondiciones	MECEHA listo para realizar otro ensayo.

Nombre	Medición del potencial libre de corrosión E_{corr}
Descripción	Medición del potencial de libre de corrosión de una varilla
Actores	Usuario, MECEHA
Precondiciones	MECEHA encendido y conectado a laptop con Windows XP
Flujo normal	1. El Usuario conecta una pinza a la barra y coloca el electrodo sobre el hormigón que cubre la barra. 2. Usuario pide por software medir el potencial de corrosión a MECEHA e ingresa el tipo de electrodo (por defecto de calomelano). 3. MECEHA mide el potencial de corrosión y devuelve su valor
Flujo alternativo	A) Si no se puede medir la resistividad por problema de comunicación. 3A. MECEHA devuelve error. 3B. El Usuario conecta de nuevo a MECEHA a la laptop.
Postcondiciones	MECEHA listo para realizar otro ensayo.

Nombre	Medición de la velocidad de corrosión de una varilla J_{corr}
Descripción	Medición de la velocidad de corrosión de una varilla
Actores	Usuario, MECEHA
Precondiciones	MECEHA encendido y conectado a laptop con Windows XP, y en configuración de medida.
Flujo normal	1. El Usuario selecciona el ensayo de Estimación de i_{corr}. 2. MECEHA pide al usuario que seleccione dónde va a guardar los resultados del ensayo. 3. El usuario le ingresa a MECEHA los valores y opcionalmente las incertidumbres asociadas a los siguientes datos: Obligatorios - superficie polarizada - constante B - tiempo total de medida (luego del pulso) - corriente a inyectar I_{ap} - tipo de electrodo de referencia (por defecto de calomelano) Opcionales - profundidad de recubrimiento (sin incertidumbre) - valor esperado de i_{corr} ($\mu A/cm^2$) o nivel esperado de corrosión(sin incertidumbre) - resistividad estimada del hormigón (sin incertidumbre) 4. En el caso de que el Usuario haya ingresado los datos opcionales, MECEHA sugiere un valor de corriente a inyectar I_{ap} (en μA), que puede ser editado por el Usuario. 5. El Usuario puede seleccionar modo monitoreo, en el que se le muestra el potencial de media celda en función del tiempo, sin inyectar corriente. 6. Cuando el Usuario ordena inyectar el pulso, MECEHA comienza a registrar la lectura del potencial de media celda, y luego de un tiempo fijo, inyecta una corriente de valor I_{ap} durante el tiempo total de medida. 7. Una vez terminada la medida, por tiempo o por decisión del Usuario, MECEHA calcula y devuelve R_{ohm}, R_P, I_{corr} e i_{corr}, con las incertidumbres asociadas a cada uno de estos resultados. También devuelve otros datos como la sobrepolarización final, el potencial libre de corrosión y la derivada al final del ensayo (para ver si convergió o no). 8. MECEHA guarda las medidas tomadas, junto con los parámetros ingresados por el usuario, la fecha y hora y los resultados.
Flujo alternativo	A) Durante el ensayo galvanostático, el Usuario quiere salir de MECEHA 6A. MECEHA pregunta si quiere detener el ensayo y guardar las medidas ya realizadas.
Postcondiciones	MECEHA listo para realizar otro ensayo.

3.3. Medición de potencial

3.3.1. Rangos de los potenciales medidos

Según la bibliografía, el potencial libre de corrosión E_{corr} está en el orden de cientos de mV . [22] Dado que E_{corr} es la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo (WE) y el de referencia (RE), para una misma barra podemos tener diferentes potenciales, según el electrodo de referencia que elijamos. Asimismo, como el potencial de WE es menor que el de RE, E_{corr} es un número negativo.

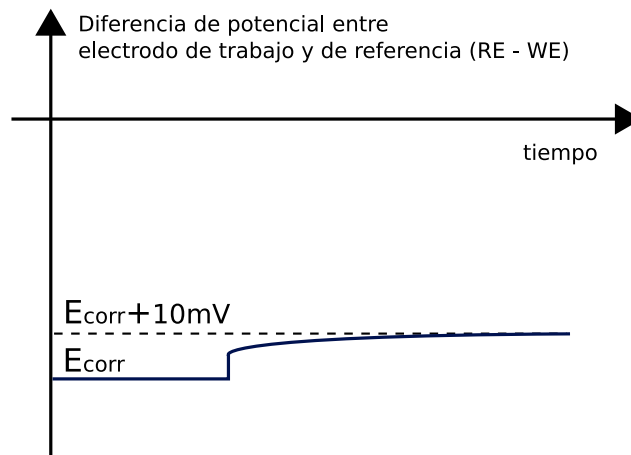


Figura 3.1: Respuesta en potencial en el ensayo de pulso galvanostático.

El único ensayo que altera el valor del potencial de media celda es el del pulso galvanostático. Pero, como se busca que la sobrepolarización generada esté en el orden de $10 - 30mV$, el potencial medido continúa en el mismo rango que E_{corr} . Por lo tanto, concluimos que debemos medir señales en el rango $[-1V, 0V]$.

3.3.2. Frecuencia de muestreo

La medición del potencial libre de corrosión E_{corr} no implica grandes limitaciones en cuanto a la frecuencia de muestreo, dado que se trata de una señal de continua, relativamente estable. En cuanto a la respuesta al ensayo galvanostático, podemos discriminar dos grandes sectores de la señal. Uno es el salto inicial debido a la resistencia óhmica o salto óhmico, casi instantáneo, que implica componentes en todo el rango de

frecuencia. El otro es la respuesta exponencial, que por su naturaleza tiene componentes significativos hasta frecuencias menores al Hz , según los tiempos característicos mínimos presentes en la bibliografía ($200ms$).[\[23\]](#)

Ensayos realizados en probetas para conocer el fenómeno arrojaron que el salto puede adquirirse con resolución razonable a los fines del cálculo con un ancho de banda en torno al kHz , siendo éste el valor adoptado como limitante.

3.4. Cálculo de rangos de la fuente de corriente

3.4.1. Cálculo de resistencias óhmicas límite

Para este cálculo se estiman valores límite para la resistencia óhmica considerando un cilindro de hormigón de radio dado por el electrodo a utilizar y altura dada por la profundidad de la varilla en el hormigón, y resistividades límite según la norma RILEM TC - 154 EMC (ver tabla 3.1).[\[24\]](#)

Condición del ambiente	Resistividad de hormigón de cemento portland común (tipo CEM I) ($\Omega \cdot m$)	Resistividad de hormigón de escorias de altos hornos (> 65 % de escoria, tipo CEM III/B), o con cenizas volantes (> 25 %), o con humo de sílice (> 5 %) ($\Omega \cdot m$)
Muy mojado / sumergido / zona de salpique de marea (cámara de niebla)	50 – 200	300 – 1,000
Exterior, expuesto	100 – 400	500 – 2,000
Exterior: al abrigo / con revestimiento / hidrofugado, no carbonatado (20°C / 80 % humedad relativa)	200 – 500	1,000 – 4,000
Exterior: al abrigo / con revestimiento / hidrofugado, carbonatado (20°C / 80 % humedad relativa)	> 1,000	2,000 – > 6,000
Interior carbonatado (20°C / 50 % humedad relativa)	> 3,000	4,000 – > 10,000

Cuadro 3.1: Valores de referencia de resistividad eléctrica (a 20°C), de hormigones de agregado grueso, de estructuras de más de 10 años de antigüedad. Nota: entre paréntesis se indica la condición ambiental equivalente en laboratorio.

Para la estimación de la resistencia óhmica, supondremos que el hormigón es un material uniforme, como primera aproximación. Para lograr esta homogeneidad, se humedece la cara externa del mismo, dado que el interior del hormigón se encuentra con

una humedad casi constante. Esto nos permite calcular la resistencia como:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (3.1)$$

donde la otra gran hipótesis que se hizo es que la dispersión de las líneas de campo eléctrico es muy pequeña, y se da solamente a escasa distancia de la varilla¹.

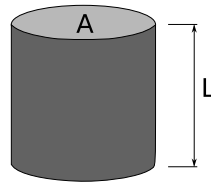


Figura 3.2: Modelado para estimar la resistencia óhmica R_{ohm}

Resistividad	Profundidad de la varilla	Resistencia óhmica
$\rho_{max} = 10k\Omega.m$	$L_{max} = 3cm$	$R_{ohm_{max}} = 27k\Omega$
$\rho_{min} = 50\Omega.m$	$L_{min} = 1cm$	$R_{ohm_{max}} = 44\Omega$

3.4.2. Cálculo de resistencias de polarización límite

Para este cálculo se estiman valores límite para la resistencia de polarización a partir de las densidades de corriente de corrosión límite de interés, considerando la superficie de varilla expuesta A , y utilizando la ecuación de Stern-Geary:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_P} \quad (3.2)$$

y la definición de la velocidad de corrosión o densidad de corriente de corrosión:

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \quad (3.3)$$

El largo de la varilla fue considerado constante, $L = 12cm$.

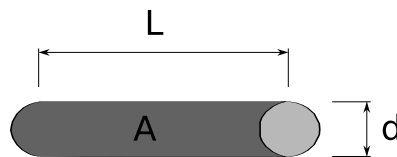


Figura 3.3: Modelado para estimar la resistencia de polarización R_P

¹Es equivalente a suponer que se confina espacialmente la corriente.

Densidad de la corriente de corrosión i_{corr}	Diámetro de la varilla	Constante B	Resistencia de polarización R_P
$i_{corr_{min}} = 0,1\mu A/cm^2$	$d_{min} = 0,6cm$	$B_{max} = 50mV$ (corrosión incipiente)	$R_{P_{max}} = 22k\Omega$
$i_{corr_{max}} = 10\mu A/cm^2$	$d_{max} = 2,2cm$	$B_{min} = 26mV$ (corrosión activa)	$R_{P_{min}} = 31\Omega$

3.4.3. Estimación de corrientes máximas y mínimas a aplicar

De acuerdo al modelo de Randle, y considerando que el sobrepotencial en la armadura no supere los $10mV$, de forma que el modelo utilizado tenga validez², obtenemos los rangos teóricos para la fuente de corriente de MECEHA:

$$I_{min} = \frac{10mV}{R_{ohm_{max}} + R_{P_{max}}} = 205nA \quad (3.4)$$

$$I_{max} = \frac{10mV}{R_{ohm_{min}} + R_{P_{min}}} = 133\mu A \quad (3.5)$$

El valor mínimo teórico condice con los valores mínimos registrados por los ensayos realizados por el Instituto de Estructuras y Transporte en las probetas de las estaciones del Prado y La Paloma, Rocha. El valor máximo supera ampliamente los registrados debido a que no se realizaron medidas en campo. Si en un peor caso, el recubrimiento fuera de $7cm$, la sobrepolarización alcanzaría los $20mV$, lo que sigue dentro del rango de validez del modelo de Randle.

3.5. Medición de temperatura

Los potenciales registrados por MECEHA se miden entre el electrodo de trabajo (WE) y un electrodo de referencia (RE). El potencial de este último, frente al electrodo patrón de hidrógeno, depende de su composición (puede ser de calomelano como en nuestro caso, o de $Ag/AgCl$, $Cu/CuSO_4$, etc). Asimismo, para un electrodo de referencia dado, el potencial depende de la temperatura de trabajo, lo que implica que

²Esto es un margen holgado. Como máximo se maneja un potencial de $30mV$.

MECEHA deberá medir la temperatura ambiente.

Con la temperatura ambiente, se deberá corregir el potencial medido, para ajustarlo a condiciones normales (25°C). De todos modos, las correcciones no están especificadas para valores de temperatura fijos, sino para rangos de la misma, por lo que no es necesaria una medida muy precisa.

Capítulo 4

Diseño electrónico

4.1. Introducción

Según la especificación, MECEHA debe ser un dispositivo electrónico capaz de inyectar corriente y medir diferencias de potencial de forma precisa y configurable por el usuario, debido a su empleo en actividades de investigación, y dentro de las posibilidades de presupuesto y duración del proyecto: duración máxima de un año y presupuesto de en torno a 1.000USD aportados por el Instituto de Estructuras y Transporte de Facultad de Ingeniería.

Luego de un análisis de los requerimientos y de evaluar diferentes posibilidades, considerando las condicionantes de tiempo y presupuesto, se determinó la estructura del sistema MECEHA. Ésta se compone de tres grandes bloques (ver figura 4.1):

- Circuito de I/O: acondiciona las señales obtenidas de la estructura (circuito de sensado) y genera la corriente a inyectar (fuente de corriente).
- Dispositivo de adquisición y control: comanda la actuación del circuito de I/O, adquiere las señales provenientes del mismo y actúa de interfaz con la computadora.
- Computadora con software de interfaz de usuario: permite al usuario dirigir el ensayo y procesar las medidas obtenidas.

Lo primero a determinar es el dispositivo de adquisición y control, ya que éste condiciona el resto de las partes componentes. Del estudio de características necesarias se

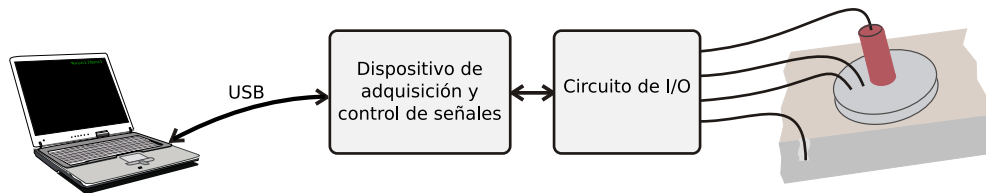


Figura 4.1: Diagrama de bloques de MECEHA

concluyó que debía ser de bajo costo, contar con dos DACs y al menos un ADC de 10 bits, en torno a 10 salidas digitales, interfaz USB, driver de alto nivel para comunicación con la PC y sensor de temperatura. Las prestaciones adicionales que pudiera tener el equipo no son inconveniente siempre y cuando no signifiquen un costo elevado o gran tamaño. También se debe valorar la buena documentación de hardware y software, soporte por parte del fabricante, foros de usuarios en internet y que el equipo tenga cierto tiempo en el mercado, como forma de evitar bugs inesperados. En caso de que alguna característica no estuviera integrada, también puede ser implementada externamente, aunque claramente esto aumenta la complejidad de la configuración.

Las opciones evaluadas dentro de estos requerimientos se describen a continuación.

4.2. Alternativas para adquisición y control

4.2.1. Osciloscopios USB

El “osciloscopio USB” es un equipo electrónico con muchas funcionalidades que brinda las facilidades de un osciloscopio digital, con la ventaja de un bajo costo y menor tamaño debido a que la interfaz con el usuario es la PC. Está pensado principalmente para aplicaciones de enseñanza e investigación. Algunos modelos cuentan con la posibilidad de generación de señal AC y DC, y tienen la versatilidad de poder comunicarse con software desarrollado por el propio usuario mediante un driver distribuido por el fabricante.

Todas estas características hicieron del osciloscopio USB una opción atractiva para el proyecto. A continuación se describen los modelos evaluados:

- DisCo (HobbyLab) tiene dos canales de entrada de 10 bits con una frecuencia de muestreo de hasta 200kHz y un generador lógico de 8 canales. Incluye su propio software, pero no es programable. Precio: 159.60USD. [25]
- DSO-2090 USB Digital Storage Oscilloscope tiene un ancho de banda de 40MHz y dos canales de entrada de 8 bits. El precio ronda los 290USD. Viene con software propio, aunque sin drivers para programar.[26] Esta opción fue descartada debido a la resolución de los canales de ADC.
- DS1M12 StingRay Multifunction Instrument tiene dos canales de entrada de 12 bits y un generador de 10 bits. Es uno de los productos de USB Instruments, y viene con software propio y drivers para varios lenguajes, entre ellos LabVIEW. Su precio es de 263.35USD.[27]

Gracias al profesor Enrique Dalchiele, fue posible conseguir un osciloscopio USB DSO-2090 del Instituto de Física. Se realizaron medidas usando su software original, validando el concepto de que un osciloscopio USB podía ser utilizado para el proyecto, aunque no este dispositivo en particular ya que eran necesarios 10 o más bits en la medida. Sin embargo, la mayoría de los osciloscopios USB no tienen generadores de señal, y aquellos que lo tienen, son de muy alto costo.

Considerando el presupuesto del proyecto y la compra de dos equipos, de manera de contar con un respaldo para mitigar riesgos, queda un escaso margen para el resto de los gastos necesarios. Además, el osciloscopio USB cuenta con muchas funcionalidades que no son útiles para los requerimientos del proyecto, por lo que es una solución poco eficiente y de costo elevado.

4.2.2. Placas programables

Buscando opciones más ajustadas a lo necesario, se consideraron diferentes placas programables:

- **Piccolo MCU ControlStick** Esta placa de Texas Instruments es parte de un kit de evaluación para presentar la nueva línea de microcontroladores de 32 bits, TMS320F2802x de Texas Instruments[28]. Estos microcontroladores tienen una frecuencia de funcionamiento de $60MHz$ y están integrados, entre otros elementos, a un ADC de 12 bits, tres timers de 32 bits y un PWM que puede ser utilizado como DAC mediante un filtro pasabajos que se encuentra on board de la Piccolo controlStick. El microcontrolador tiene, además, la ventaja que es programable en assembler, C y C++.

En un primer análisis esta opción contaba básicamente con los elementos necesarios para el proyecto, pero exigía un nivel elevado de desarrollo adicional por requerir la elaboración de firmware y un protocolo de comunicación con el software de usuario también a desarrollar.

- **Placas adquisidoras de National Instruments.** Éstas cuentan con especificaciones técnicas excelentes pero con un precio mayor al presupuesto total del proyecto (por encima de 2.000USD).
- **Arduino Duemilanove.** Utiliza un microcontrolador ATmega 328, de Atmel, de $16MHz$. Tiene interfaz USB, conector para alimentación, salidas de PWM, 6 entradas analógicas de 10 bits y 14 pines de entrada-salida digital. Esta placa es parte de un proyecto de desarrollo de hardware open-source (esquemáticos disponibles bajo licencia Creative Commons), que comenzó en Ivrea, Italia, en 2005 y ya tiene fabricadas más de 50.000 placas, de las distintas versiones de la misma (Nano,

Diecimila, Duemilanove, etc).[29] Se programa en un lenguaje sencillo, basado en C y C++, desde USB (soporta además SPI e I2C). La filosofía del proyecto resulta interesante, y parece estar en una etapa exponencial de su desarrollo, en cuanto a la cantidad de usuarios. Se cuenta con foros de usuarios muy activos y numerosos ejemplos. De todos modos, por tratarse de un dispositivo nuevo pensado para aficionados y estudiantes, no cuenta con un soporte oficial muy fiable, además de que no ser un producto consolidado. Esto es, presentan bugs y algunas partes de la documentación no están muy detalladas.

- **Labjack:** modelos U3, U6, UE9 y U12, todos con interfaz USB. El primer modelo disponible fue la U12, que tiene 12 entradas analógicas de 12 bits, un amplificador de ganancia programable y una frecuencia de muestreo máxima de $1,2\text{kHz}$ en modo streaming. Tiene dos salidas analógicas y 20 pines de entrada/salida digitales. Debido a que la frecuencia de muestreo máxima podía resultar insuficiente, se descartó elegir esta placa, a pesar de que su precio era razonable (129USD)[30]. De las restantes, la más accesible era la U3 (108USD), teniendo entre sus características 16 canales configurables (I/O digital o entrada analógica de 12 bits) y 2 DACs de 10 bits. La U6 cuenta con entradas de hasta 18 bits y la UE9 tiene además conexión Ethernet, pero estas exceden lo necesario para el proyecto, así como su presupuesto.

4.2.3. Dispositivo elegido

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores para las diferentes alternativas, se optó por adquirir la placa Labjack U3. Adicionalmente a contener y exceder lo necesario para cubrir los requerimientos, la documentación de estas placas es completa, tanto a nivel de programación (provee de muchos ejemplos en varios lenguajes, además de una descripción de las distintas funciones), como de hardware. Por otro lado, en la web del fabricante funciona un foro de consultas que tiene intensa actividad y las preguntas de los usuarios son respondidas rápidamente por el staff de la empresa, lo que implica un importante respaldo.

De entre las dos versiones disponibles, de bajo y alto voltaje (LV y HV respecti-

vamente), se optó por la primera (la versión HV soporta entradas de hasta 20V, lo que supera lo necesario para estos fines).

En la sección siguiente se describen las características de la placa en detalle.

4.3. Labjack U3 -LV

4.3.1. Reseña del dispositivo

Labjack U3-LV es un dispositivo de control y adquisición de datos, de bajo costo. Sus principales características son[30]:

- 16 canales I/O flexibles (entrada digital, salida digital o entrada analógica)
- Hasta 2 timers (Contador de pulsos/tiempo, salida PWM, entrada en cuadratura)
- Hasta 2 contadores de 32 bits
- 4 canales de I/O digitales
- Entradas analógicas de 12 bits (0 – 2, 44V, single ended o diferencial)
- 2 DACs de 10 bits (0, 04 – 4, 95V)
- Soporta SPI, I2C y protocolos de comunicación asíncrona serial
- Frecuencia de muestreo maxima de 2, 5 – 50kHz (dependiendo de la resolución efectiva)
- Respuesta a comandos en tiempos menores a 1ms
- Interfaz USB 2.0/1.1
- Alimentación por USB
- Drivers para Windows, Linux, Mac y Pocket PC
- Dimensiones: 75mm x 115mm x 30mm
- Medición de temperatura ambiente

Este dispositivo es programable en bajo y alto nivel, aunque no se tiene acceso al microcontrolador del mismo, sólo siendo posible actualizar el firmware. De todas maneras, cuenta con una vasta biblioteca de funciones de alto nivel, resultando en principio innecesaria la programación en bajo nivel.



Figura 4.2: Foto de Labjack U3 -LV

La medida de la temperatura se realiza con una termocupla en el interior del dispositivo, y luego es compensada para lograr una medida de la temperatura ambiente. Se obtiene simplemente invocando una función via software.

Los DACs son de 10 bits, y son generados con PWM¹ de $48MHz$. Su rango de salida es de $0,04V$ a $4,95V$.

Existe un compromiso entre el ancho de banda de las entradas analógicas y su resolución en modo streaming. Éstas pueden muestrear a $50kHz$, con 10bits de resolución; o a $2,5kHz$, con 12 bits (y a algunas frecuencias intermedias, con resoluciones intermedias). El rango de entrada es de 0 a $2,44V$.

4.3.2. Funciones en el sistema MECEHA

La placa Labjack cumple varias tareas en el funcionamiento del sistema MECEHA. Es conectada a la computadora vía USB, medio por el cual transmite los datos y recibe

¹Pulse Width Modulation, modulación por ancho de pulso: se modifica el ciclo de trabajo de una señal rectangular de alta frecuencia de forma de cambiar un valor medio.

comandos, así como obtiene también su alimentación. Por otro lado, es la encargada de alimentar al circuito de I/O (VS y GND), y a su vez, comanda llaves de este último a través de salidas digitales (DO1...DO9), de forma de realizar los procedimientos necesarios a lo largo de los ensayos.

Sumado a lo anterior, fija valores analógicos que cumplen funciones de comando en dicho circuito. El DAC1 se utiliza para fijar el valor de la fuente de corriente, mientras que el DAC2 realiza una compensación del nivel de continua en la medida (circuito de sensado), con el fin de poder maximizar la amplificación.

Al mismo tiempo, adquiere las señales analógicas que provienen del mismo, entre las cuales la entrada AIN1 es la entrada inversora, AIN2 la no inversora y AIN-calibracion es utilizada para la autocalibración de la fuente de corriente.

En las siguientes secciones se explican en detalle el uso de estas señales.

4.4. Circuito de I/O

Una vez determinada la placa de adquisición y control, se realizó el diseño del circuito de I/O. El mismo está compuesto por el circuito de sensado, que tiene como funciones acondicionar las señales obtenidas de la estructura a estudio, por la fuente de corriente, que genera la corriente a inyectar en la armadura, y por otros componentes adicionales que se encargan de regular las diferentes alimentaciones del circuito. En las secciones 4.4.1, 4.5 y 4.6 se detalla el funcionamiento de cada una de estas partes componentes.

Además de las conexiones a la placa Labjack ya mencionadas en la sección 4.3.2, el circuito se conecta a la estructura de hormigón mediante cuatro terminales:

- electrodo de referencia (RE), terminal de medida de potencial
- armadura o electrodo de trabajo (WE), que se impone a tierra (GND de placa de adquisición) y por el que se realiza la inyección de corriente
- contraelectrodo (CE), por el cual circula la corriente proveniente del WE
- guarda de corriente (GC), que impone el potencial del CE a la guarda de confinamiento

Respecto a los componentes utilizados, los operacionales escogidos son LMC6484, que son rail-to-rail (excursionan entre los voltajes de alimentación, casi sin distorsionar la señal), de bajo consumo, resistencia de entrada mayor al $T\Omega$ y CMRR² mayor a 60dB.

4.4.1. Circuito de sensado

El circuito de sensado se utiliza para monitorear la diferencia de potencial entre el electrodo de referencia (RE) y el de trabajo (WE), realizando diferentes procedimientos dependiendo de sus variaciones y de los diferentes ensayos.

Debido a que la estructura se encuentra a un potencial desconocido (y en principio aislado) con respecto a nuestro circuito, el WE es conectado a la tierra del circuito, de

²Common Mode Rejection Ratio, relación de rechazo al modo común

manera de centrarlo en el rango de alimentación de los operacionales ($\pm 4, 5V$). Además, en el caso que la computadora o laptop se utilice conectada a la alimentación con terminal de tierra, esta opción es la más natural, dado que el WE es la conexión a la armadura del hormigón y en una estructura real la armadura se encuentra, en última instancia, “conectada a tierra” a través de los cimientos que van enterrados en el suelo.

La figura 4.3 muestra un esquema simplificado del circuito. El valor de entrada RE es desplazado la mitad del valor DAC2, luego de pasar por un seguidor, para a continuación ser amplificado y dividirse en dos canales de lectura, uno inversor (AIN1) y otro no inversor (AIN2). Las señales digitales DO6, DO7 Y DO8 provenientes de la placa de adquisición y control permiten el ajuste de la amplificación, así como la señal DO5 comanda el switch que permite o impide el corrimiento del potencial RE.

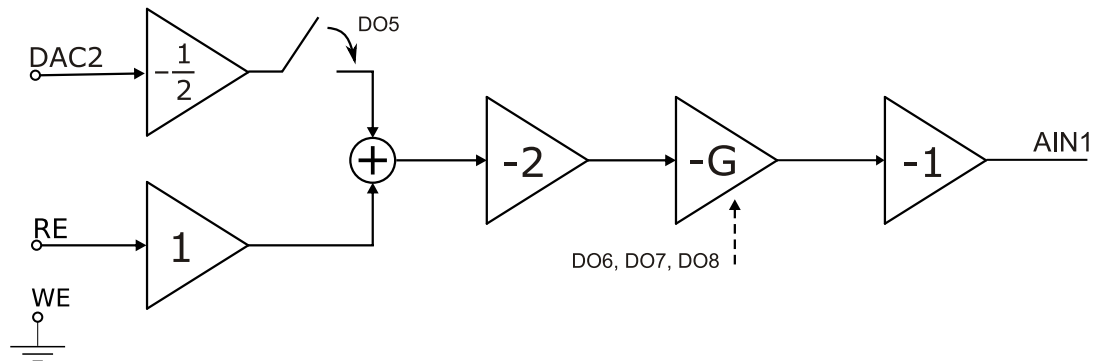


Figura 4.3: Diagrama simplificado del circuito de sensado.

Para la medida del potencial libre de corrosión E_{corr} , el switch comandado por DO5 es abierto (ver figura 4.4). Debido a que el valor de este potencial es positivo respecto a tierra (WE)³, la lectura se realiza por la entrada no inversora (AIN2). Conociendo la ganancia configurada en el amplificador, se puede obtener el valor de E_{corr} .

Este potencial tiene un valor del orden de centenas de mV. Al realizar un ensayo galvanostático, RE se reduce (respecto a tierra) en el orden de $10mV$, es decir, un orden

³Estrictamente hablando, el potencial libre de corrosión se define como el valor inverso, es decir, la diferencia WE-RE, por lo que tiene valor negativo.

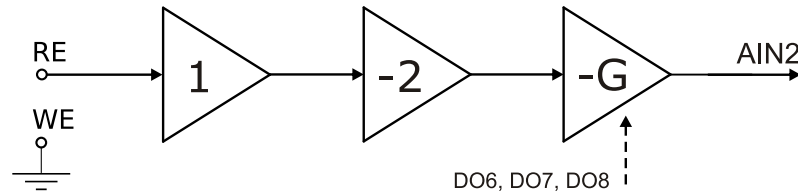


Figura 4.4: Diagrama simplificado del circuito de sensado para la medida del potencial libre de corrosión E_{corr} .

de magnitud menos que el valores típicos de E_{corr} .

Como forma de amplificar lo máximo posible esa variación, a partir de la cual es obtenida la medida de corrosión, el valor de E_{corr} es compensado utilizando el corrimiento explicado anteriormente, es decir, habilitando la llave comandada por DO5 y fijando como valor del DAC2 aproximadamente dos veces el valor de E_{corr} . Se obtiene entonces un valor cercano a cero, que decrece con la inyección de corriente. Si se realiza ahora la lectura de la salida inversora (AIN1), se obtiene entonces la curva de interés, con un corrimiento vertical conocido (E_{corr}). En la figura 4.5 se muestran las señales en los diferentes puntos del circuito para dicha medida.

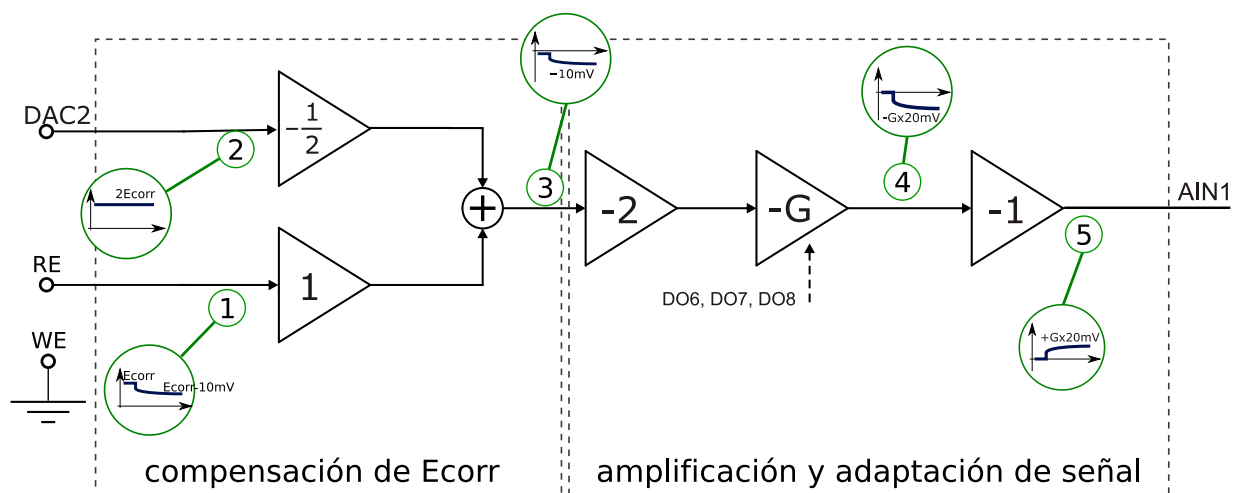


Figura 4.5: Diagrama simplificado del circuito de sensado, con la señal de respuesta al pulso galvanostático.

El esquema completo del circuito de sensado se muestra en la figura 4.6. La señal

RE pasa primero por el seguidor implementado con el amplificador U1B, que le brinda una alta impedancia de entrada (mayor a $10T\Omega$). Luego es amplificado por un inversor de ganancia $G_1 = 2$, implementado con resistencias de $10k\Omega$ y $20k\Omega$ al 0,1 % y el operacional U2D. En paralelo a la resistencia R_2 , se tiene un condensador de $10nF$ que introduce un polo de aproximadamente $0,8kHz$, el cual actúa como pasabajos para el filtrado antialias que cumple las condiciones del teorema de Nyquist, considerando que la frecuencia de muestreo es de $2,5kHz$.

La salida del amplificador inversor implementado con U2D es la entrada al amplificador de ganancia programable (PGA) LTC6910 U3. Su ganancia puede ser 0, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100V/V y es configurada con los 3 bits comandados por salidas digitales de la Labjack (D06, D07, D08), por medio de llaves CMOS (BSS138) que son necesarias para adaptar los niveles lógicos entre la Labjack y el PGA. El objetivo del PGA es amplificar la señal de forma de usar todo el rango de entrada de la Labjack, y así reducir el error de cuantización. Es decir, las señales de menor amplitud se amplifican más, y las señales de mayor amplitud se amplifican menos, de manera de siempre cubrir el rango de $2,44V$ admitido por la Labjack. La señal luego se conecta con la entrada analógica AIN-2, que muestrea con 12 bits de resolución.

Para realizar la compensación, el valor fijado en VDAC-2 pasa por un amplificador inversor (resistencias R3, R6 y amplificador operacional U1C) de ganancia $\frac{1}{2}$, y la llave analógica U5-1 (MAX4636), que al medir E_{corr} se encuentra en la posición NC⁴, pasa ahora a la posición NO⁵, de forma que se pueda restar el nivel $\frac{VDAC-2}{2}$ al nivel RE mediante el circuito sumador implementado con las resistencias R1, R5 y amplificador operacional U2D.

La división entre 2 de VDAC-2 es para mejorar la resolución de 10 bits del DAC y permite compensar niveles en RE entre $0,02V$ y $2,475V$, que abarca el rango de valores esperado para el potencial de media celda. La llave U5-1, es habilitada por la señal digital DO5, con su correspondiente adaptación de nivel. No se busca anular completamente

⁴Normal Closed: normal cerrado, pin 4

⁵Normal Open: normal abierto, pin 7

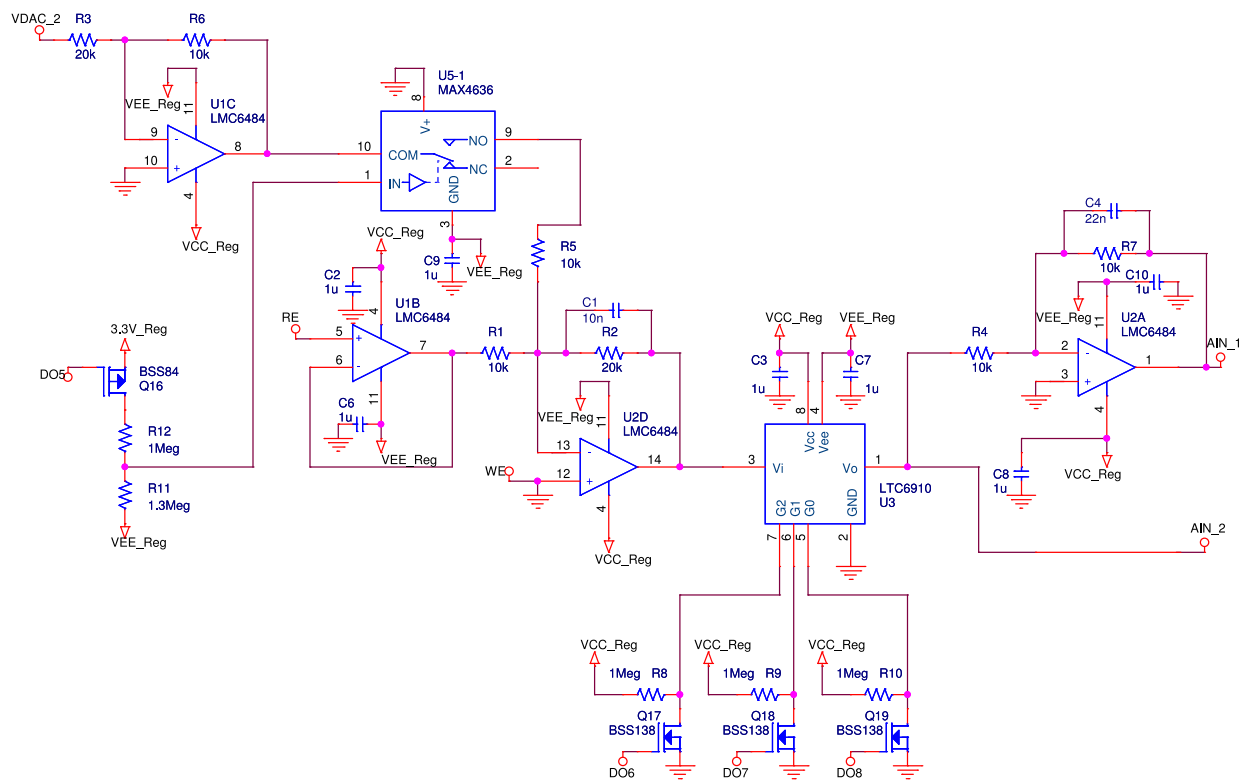


Figura 4.6: Esquemático del circuito de sensado

el nivel RE, sino reducirlo hasta aproximadamente $5mV$, debido a que la compensación no es perfecta. Si no se prevé este margen puede darse que la imperfección de la compensación o las variaciones en el potencial leído generen que el nuevo nivel de continua se encuentre por fuera del rango que puede medir la entrada ADC de la Labjack (por debajo de GND) y por tanto se estaría produciendo una medida errónea.

Una vez realizada la compensación, se espera un crecimiento de amplitud no mayor a $30mV$, amplificada e invertida por el amplificador U2D, que luego pasa por el PGA. El rango de AIN-1 es $0V$ a $2,44V$, por lo que los $70mV$ (la señal de respuesta al pulso más el nivel de $5mV$ de offset) máximos a la entrada del PGA deberán ser amplificados con ganancia 20, para aprovechar lo mejor posible el rango de entrada analógica. El inversor implementado con U2A se utiliza para restaurar la señal, que quedó invertida por el PGA, a los niveles que la Labjack puede medir. En la figura 4.7 se ve cómo cambia la señal según los puntos del esquema completo.

El condensador C4 de $22nF$ se utiliza junto con la resistencia R7 de $10k\Omega$ para implementar un segundo pasabajos con frecuencia de corte de aproximadamente $0,73kHz$, de modo que, para la medida de la respuesta escalón, el filtro antialias utilizado es de segundo orden, con frecuencia de corte de aproximadamente $0,8kHz$.

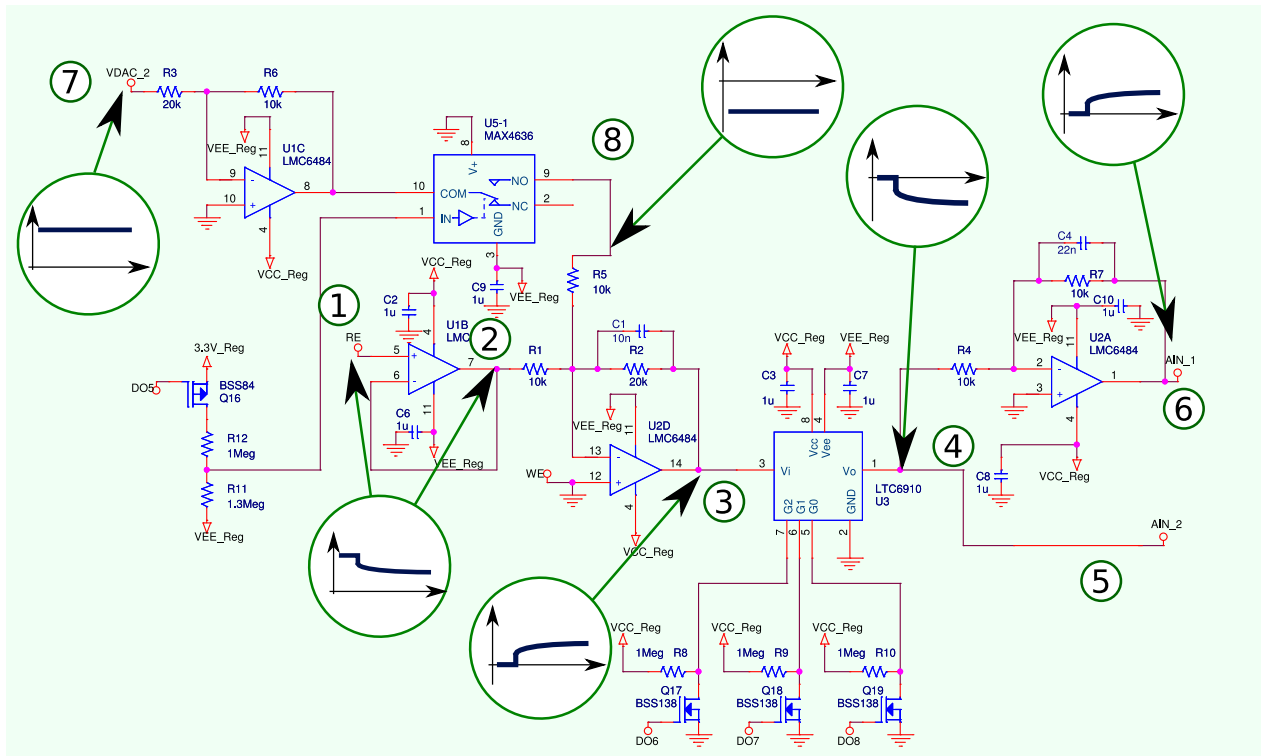


Figura 4.7: Esquemático del circuito de sensado con señal en ensayo galvanostático

4.5. Fuente de corriente

MECEHA inyecta escalones de corriente, desde los $200nA$ hasta $300\mu A$. Como se debe abarcar un rango de 3 órdenes de magnitud el circuito implementa 3 rangos de corriente:

- $200nA$ a $8,3\mu A$
- $8,3\mu A$ a $51\mu A$
- $51\mu A$ a $300\mu A$

La figura 4.8 muestra el circuito completo de la fuente de corriente, y la figura 4.9 muestra el mismo circuito con los valores de voltaje posible en sus distintos nodos.

La fuente de corriente está implementada con un amplificador operacional realimentado que permite programar la corriente por su entrada positiva. Debido a la realimentación, el voltaje en la entrada positiva es copiado a la entrada negativa y determina el valor de la corriente a través de la resistencia R13, R14 o R15, dependiendo de la rama de corriente activa. Eligiendo el valor apropiado VDAC-1 y eligiendo la rama apropiada de resistencia se puede programar cualquier corriente entre $200nA$ y $300\mu A$. Habilitando la rama de R13 se generan corrientes en el rango $200nA$ a $8,3\mu A$; habilitando R14 se generan corrientes en el rango $8,3\mu A$ a $51\mu A$ y habilitando R15 se generan corrientes en el rango $51\mu A$ a $300\mu A$. Las distintas ramas se habilitan o deshabilitan mediante las señales digitales DO1, DO2 y DO3, y los transistores Q3, Q4 y Q5 con sus correspondientes adaptadores de nivel Q9, Q10 y Q11. Los transistores bipolares Q1 y Q2 (BC847B) sostienen la realimentación y copian la corriente generada hacia la carga; se utilizan en configuración Darlington para aumentar el β efectivo y mejorar la copia con error menor al 1 por 1,000. El V_{CEsat} de la configuración Darlington no supera $1V$, y como el voltaje a través del hormigón no debe superar $30mV$, el circuito de corriente nunca opera en condiciones de saturación.

Para los rangos de corriente $200nA$ a $8,3\mu A$ y $8,3\mu A$ a $51\mu A$, la corriente se auto-calibra iterativamente antes de ser inyectada en la estructura.

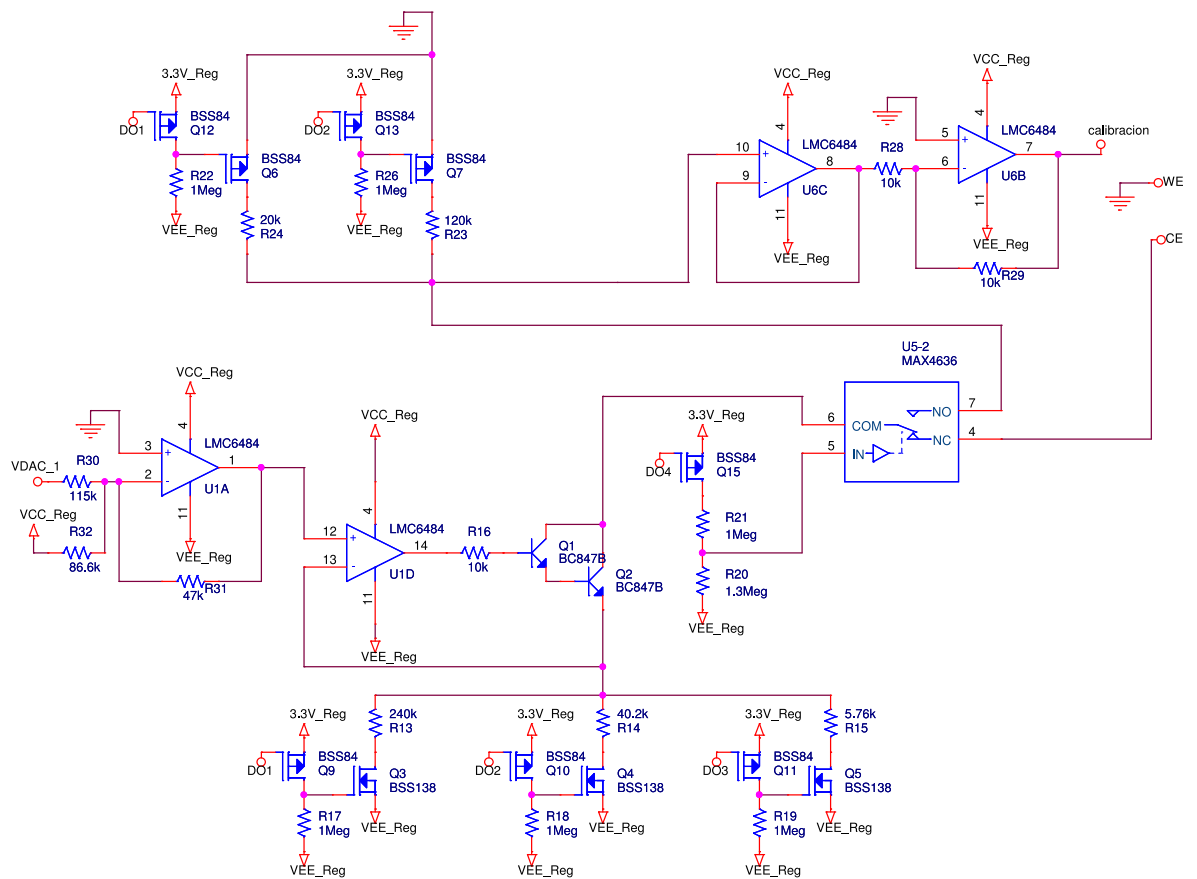


Figura 4.8: Esquemático de la fuente de corriente

La suma ponderada entre VDAC-1 y VCC-Reg implementada por el amplificador operacional U1A es la siguiente:

$$V_{U1A} = -47 \left(\frac{V_{DAC-1}}{115} + \frac{V_{CC}}{86,6} \right)$$

La suma se efectúa de esta manera para garantizar que se abarca todo el rango de corriente utilizando las resistencias R13, R14 y R15.

La llave MAX4636 U5-2 inicialmente se encuentra en posición NO. Para los dos rangos de menor corriente, antes de ser enviada al hormigón, ésta pasa por un circuito de autocalibración, cuya función es generar una caída de potencial sobre la resistencia correspondiente (si se activó R13 será R24, si se activó R14 será R23), que es medida por la entrada analógica AIN-3. Como este potencial es medido con una resolución de 12 bits, podemos determinar con buena precisión la corriente, con lo cual podemos mejorar la estimación de VDAC-1 mediante un proceso iterativo para lograr la corriente deseada. En el caso del rango de mayor corriente la autocalibración no es necesaria.

Una vez obtenida la corriente con la mayor exactitud posible, la llave U5-2 pasa al estado NC comandada por la salida digital DO4, de modo que la corriente seteada previamente pasa por la estructura, del WE al CE. La conmutación de la llave se realiza en un tiempo de aproximadamente $14ns$, según su fabricante.[31]

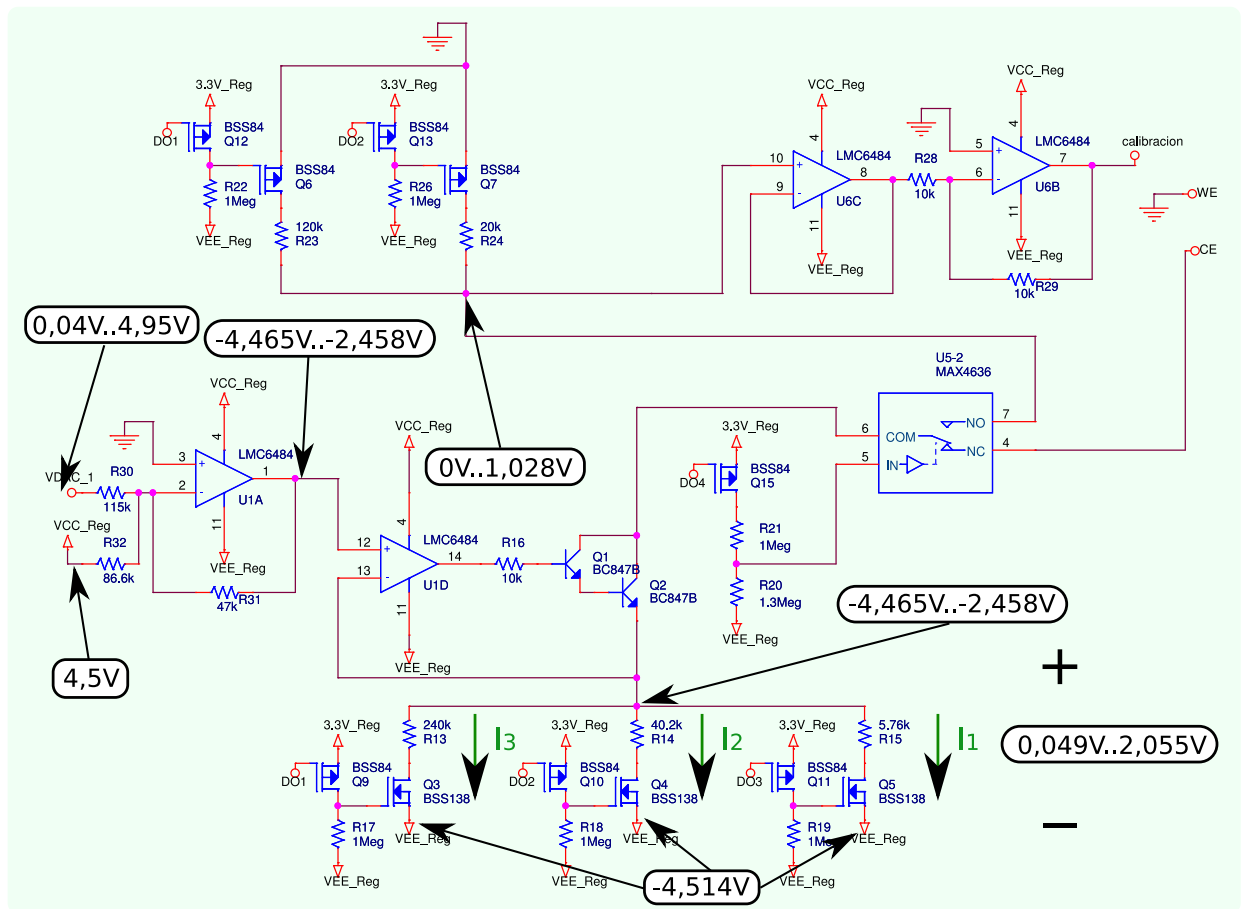


Figura 4.9: Esquemático de la fuente de corriente, con los rangos de voltajes en varios nodos.

4.6. Otros componentes

4.6.1. Guarda de confinamiento

Elegimos confinar la corriente espacialmente, usando confinamiento no modulado. Para esto, debemos lograr copiar con exactitud el voltaje en el CE, de forma de extender la región equipotencial en la superficie del hormigón. La solución para esto es usar el amplificador U6A en configuración seguidor, como muestra la figura 4.10.

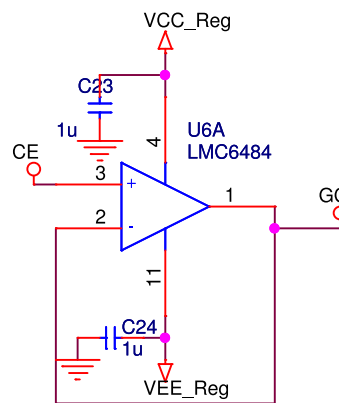


Figura 4.10: Amplificador en configuración seguidor, para implementar el confinamiento espacial de la corriente

4.6.2. Reguladores de voltaje

Además se genera en el impreso una fuente negativa de $-5V$ mediante el charge pump MAX889S de Maxim y tanto la alimentación positiva como la negativa se regulan a $3,3V$, $4,5V$ y $-4,5V$ utilizando respectivamente los reguladores LT1962 y LT1964.

Usamos reguladores de voltaje para generar los 3 niveles de tensión continua que precisamos: $-4,5V$, $3,3V$ y $4,5V$.

El charge pump MAX889 tiene una salida $V_{out} = V_{EE} = -V_{CC} \frac{R_{34}}{R_{33}} = -V_{CC} = -5V$. Para tener bajo ripple, la corriente de salida del charge pump debe ser lo más baja posible, así como la ESR (Equivalent Series Resistance) del condensador puesto a la salida. Como es muy caro comprar capacitores con ESR muy baja, y además no cono-

cemos a priori la corriente de salida de V_{EE} , optamos por poner un regulador de voltaje negativo U7, modelo LT1964-SD. La salida de éste es $V_{EE-Reg} = -1,22V \left(1 + \frac{R_{36}}{R_{35}}\right) - I_{ADJ}R_{36}$, siendo $I_{ADJ} = 30nA$. Es decir que $V_{EE-Reg} = -4,514V$.

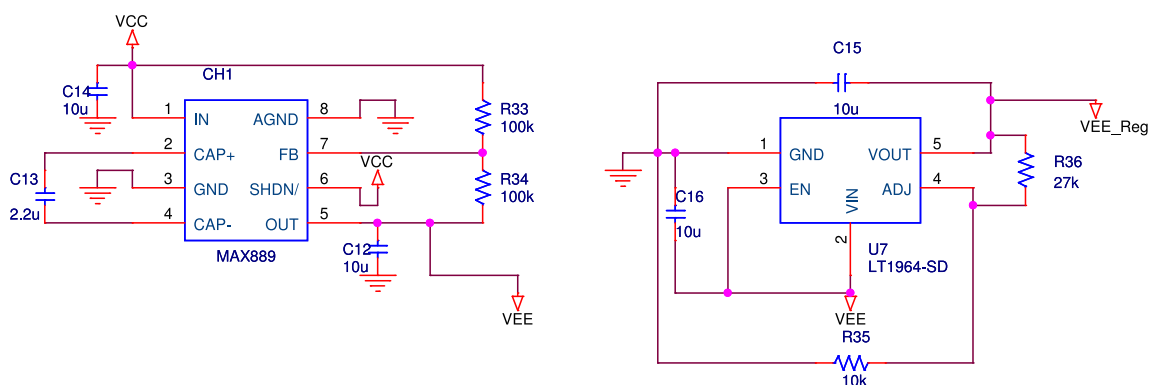


Figura 4.11: Charge pump MAX899 y regulador de voltaje negativo LT1964-SD.

Usamos los reguladores de voltaje U8 y U9 modelo LT1962 (figura 4.12), para generar $3,3V$ y $+4,5V$.

4.6.3. Protección contra descargas electrostáticas

MECEHA es un aparato de medida de campo de la corrosión en estructuras de hormigón armado. Fue diseñado para poder trabajar conectado a tierra (por medio de la tierra del puerto USB de la laptop) o con voltaje flotante. Para evitar daños por descargas electrostáticas (ESD: Electrostatic Discharges) que el equipo puede recibir a través de los terminales de contacto con el hormigón se agregaron diodos de protección contra ESD VESD05A1B-02Z-GS08 en estrella en todos los terminales de salida del sistema. El circuito se muestra en la figura 4.13.

4.6.4. Cortocircuito del capacitor CE-WE

Según nuestro cliente, en el ensayo potencioestático que realizan habitualmente, al conectar WE y CE se produce un salto de corriente, casi un delta. Rápidamente esta

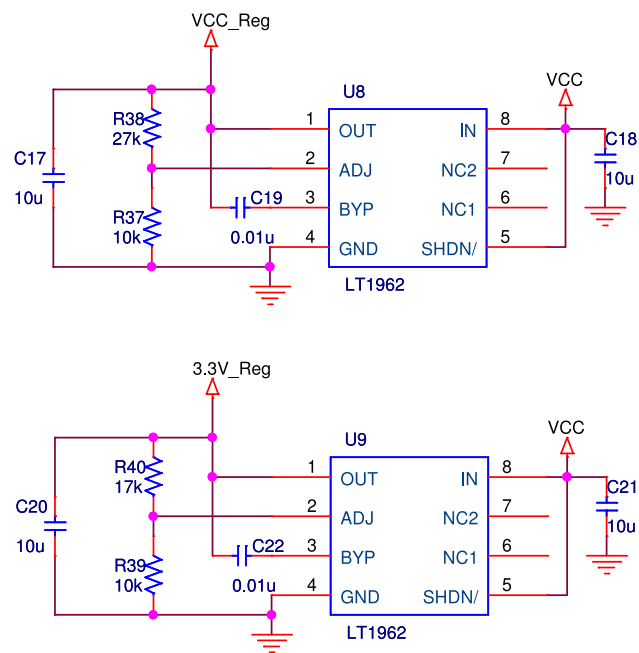


Figura 4.12: Reguladores de voltaje de +3, 3V y +4, 5V

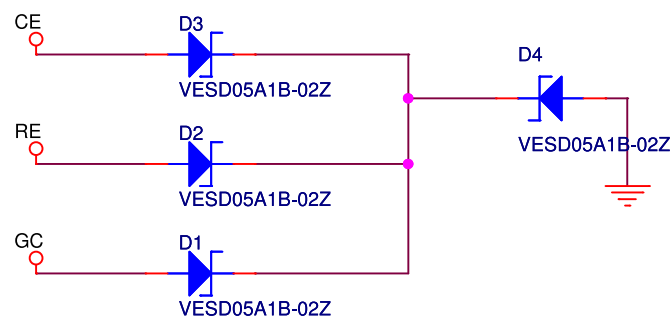


Figura 4.13: Circuito de protección contra descargas electrostáticas

corriente disminuye, hasta llegar a un valor despreciable. Este impulso puede ser explicado si analizamos que WE y CE actúan como placas conductoras de un gran capacitor que tiene al hormigón como dieléctrico⁶. En la práctica, se cortocircuita durante un breve tiempo WE y CE, de manera de descargar este condensador. Una gran diferencia de potencial entre WE y CE podría dañar nuestro circuito, por lo que como explicamos previamente, se colocan diodos zener cruzados para descargar sobrepotenciales. Para lograr el "cortocircuitado" del condensador WE-CE, diseñamos el circuito mostrado en la figura 4.14.

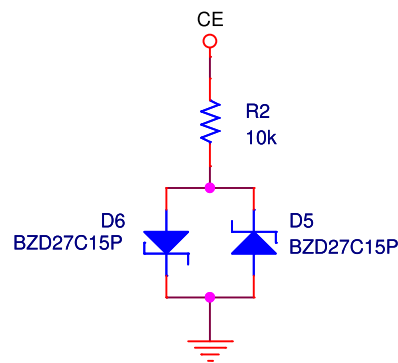


Figura 4.14: Circuito usado para descargar el capacitor formado por CE y WE

4.7. Correcciones de Hardware

El circuito impreso diseñado que forma parte del sistema MECEHA se envió a fabricar a partir del circuito correspondiente a la versión de esquemático MECEHA v04.

Sin embargo, en la etapa de testing luego del poblado del impreso se detectaron algunos defectos en el diseño del circuito. Estos errores y la forma en que se corrigieron se describen a continuación.

1. Las llaves Q12, Q13 y Q14 se activan de forma equivocada.

⁶El hormigón no es un conductor ideal ni un aislante ideal. Debido a esto, es extremadamente complejo su modelado eléctrico, que mezcla propiedades resistivas y dieléctricas.

El funcionamiento esperado es:

- en el caso $DO1 = 0$, $DO2 = 1$, $DO3 = 1$ se deben habilitar Q3 y Q6 y quedar cortados Q4, Q5, Q7 y Q8.
- en el caso $DO1 = 1$ se deben deshabilitar Q3 y Q6.
- el comportamiento debe ser análogo para la activación y desactivación de DO2 y DO3.

Es decir, se deben habilitar las ramas que se corresponden en la fuente de corriente y en la autocalibración.

Sin embargo, el funcionamiento verdadero es erróneo debido a un error en el diseño de los niveles lógicos: con $DO1 = 0$, $DO2 = 1$, $DO3 = 1$ se habilita Q3, Q7 y Q8 y quedan cortados Q4, Q5 y Q6. Este comportamiento es análogo para la activación y desactivación de DO2 y DO3.

Para corregir este error se tomaron dos medidas:

- quitar la autocalibración de la tercer rama (rama de $3k\Omega$, correspondiente al rango de corriente más grande). Para esto se quitó la resistencia R25.
- se intercambiaron las resistencias R23 y R24 para que funcione la autocalibración de las dos ramas de rango de corriente más chico. Es decir queda $R23 = 20k\Omega$ y $R24 = 120k\Omega$.

En definitiva, el circuito quedó de forma de que funciona correctamente la autocalibración de las dos ramas de rango de corriente más chico y no hay autocalibración para el rango de corriente más grande. A pesar de esta modificación, las prestaciones del sistema no se ven afectadas porque el rango mayor de corriente no requiere autocalibración para tener la precisión adecuada de forma de cumplir con los objetivos.

2. Llave U4-1.

La llave U4-1 está alimentada entre VCC_{Reg} y GND . Cuando la señal en la salida de U3 (LTC6910) va por debajo de $-0,6V$ se activa el diodo parásito a bulk de la llave U4-1 e impide que la señal excursione por debajo de $-0.6V$, lo cual es necesario para poder medir la respuesta al escalón en AIN-1.

Como solución se decidió quitar la llave U4 (des-soldarla, que se puede hacer porque no se utiliza U4-2), conectar la salida de U3 a AIN-2 (para poder registrar E_{corr}) y conectar la salida de U6B (calibración) a DO9 que se pasa a utilizar como entrada analógica AIN de la Labjack en vez de como salida digital.

Como procedimiento:

- se des-suelda U4.
- se cortocircuitan entre sí en el propio footprint de U4 (usando un cablecito muy pequeño y estaño) las patas 9 y 10 (que están al lado).
- se cortocircuitan entre sí en el propio footprint de U4 (usando un cablecito muy pequeño y estaño) las patas 1 y 2 (que están al lado).

En consecuencia, esta solución de hardware no afecta el funcionamiento del sistema y resulta en una solución prolija a nivel del impreso ya que no se necesita soldar cables de un lado a otro del plano del circuito.

3. Entradas digitales al impreso no tienen pull-ups ni pull-downs

Las entradas digitales al impreso van conectadas directamente a los gates de los transistores MOS correspondientes, sin pull-ups ni pull-downs. Esto genera que con la manipulación se quemen los transistores MOS de entrada al impreso por descargas electrostáticas.

No se tomó ninguna medida al respecto de esto en el impreso para resolver el problema, sino que las entradas digitales al impreso se conectan a la Labjack y no se sacan salvo para mejorar las conexiones y con mucho cuidado con pulsera anti-estática. En las salidas digitales de la Labjack hay pull-ups a 3.3V, lo que permite que esta solución sea satisfactoria.

Capítulo 5

Diseño de software

5.1. Elección del lenguaje de programación

Como lenguaje de programación de la Labjack, teníamos varias alternativas, entre ellas C, C++, C#, Java, LabVIEW, Python. Las más apropiadas para nuestra aplicación, eran LabVIEW o Matlab, puesto que están pensadas para procesar medidas y graficarlas. Pero para poder usar cualquiera de ellas, teníamos que comprar el software original, lo que es totalmente inviable desde el punto de vista económico.

Debido a que todos los integrantes del equipo contamos con conocimientos de programación orientada a objetos (Desarrollo de Software para Ingeniería Eléctrica), y que algunos contamos con formación básica en C, elegimos usar C# como herramienta para programar la placa Labjack, el cual permite a su vez realizar con relativa sencillez una interfaz de usuario amigable.

C# es un lenguaje simple y poderoso, dedicado principalmente a desarrolladores creadores de aplicaciones usando Microsoft .NET Framework. Hereda muchos de las mejores características de C++ y Microsoft Visual Basic, pero pocas de sus inconsistencias y anacronismos, resultando un lenguaje más sencillo y lógico.[32] C# es además un estándar ISO (International Organization for Standardization) y ECMA (European Computer Manufacturers Association).[33]

El software MECEHA es el medio que le permite al usuario configurar los parámetros y comandar los ensayos, visualizar los datos adquiridos y calcular y guardar los resultados, a través de una interfaz amigable y sencilla.

Fue desarrollado en .NET utilizando la herramienta Visual C# Express 2005, de distribución gratuita desde la página oficial de Microsoft,¹ y consiste en una Interfaz de Múltiples Documentos (MDI).

¹www.microsoft.com/exPress/download

5.2. Interfaz de usuario

El software interactúa con el usuario a través de cuatro formularios, que se listan a continuación:

Principal

Este es un formulario contenedor MDI, que actúa como marco en el cual se ejecutan los otros formularios de ensayos. Implementa además, a través de una barra de menú, las opciones:

- Crear nuevo ensayo (Potencial de corrosión, ensayo galvanostático o medida de resistividad)
- Importar ensayo galvanostático (a partir de .txt)
- Acceder a la ayuda (manual de usuario)

Al crear un nuevo ensayo (figura 5.1) es invocado el formulario correspondiente. En el caso de un ensayo galvanostático, se pregunta al usuario dónde desea guardar el archivo de resultados.

EnsayoGalvanostatico

Este formulario implementa el ensayo de pulso galvanostático.

La primera vez que se ejecuta, una vez iniciado el programa, éste obtiene los parámetros por defecto para el ensayo del archivo `config.ini` ubicado en la carpeta de instalación. El usuario puede editarlos utilizando el formulario `Configuracion.cs`,



Figura 5.1: Menú principal.

al cual se llama a través de un botón. Los siguientes ensayos mantendrán los últimos parámetros utilizados, ya que mayormente en una misma serie de ensayos los parámetros prácticamente no cambian.

Previo a la realización del ensayo, el usuario puede iniciar el modo Estabilización, a través de un botón. En este modo se despliega el potencial de media celda por un tiempo indefinido, sin inyectar corriente en la armadura ni registrar los datos que se adquieren. Este modo resulta útil para verificar el posicionamiento correcto del electrodo de referencia, y que se dan condiciones estables en la estructura a medir antes de iniciar el ensayo.

El ensayo galvanostático propiamente dicho se inicia también haciendo click el botón correspondiente. En él se inyecta la corriente de ensayo I_{ap} por la armadura y se despliega en tiempo real la curva resultado, así como el tiempo transcurrido, la temperatura medida y el potencial instantáneo. Esto sucede hasta que finalice el tiempo de ensayo, o éste sea detenido por el usuario. En dicho momento se calculan los resultados y se genera un documento de texto, en la ruta y con el nombre de archivo previamente establecidos por el usuario, que contiene los parámetros del ensayo efectuado, los resul-

tados calculados y los datos adquiridos.

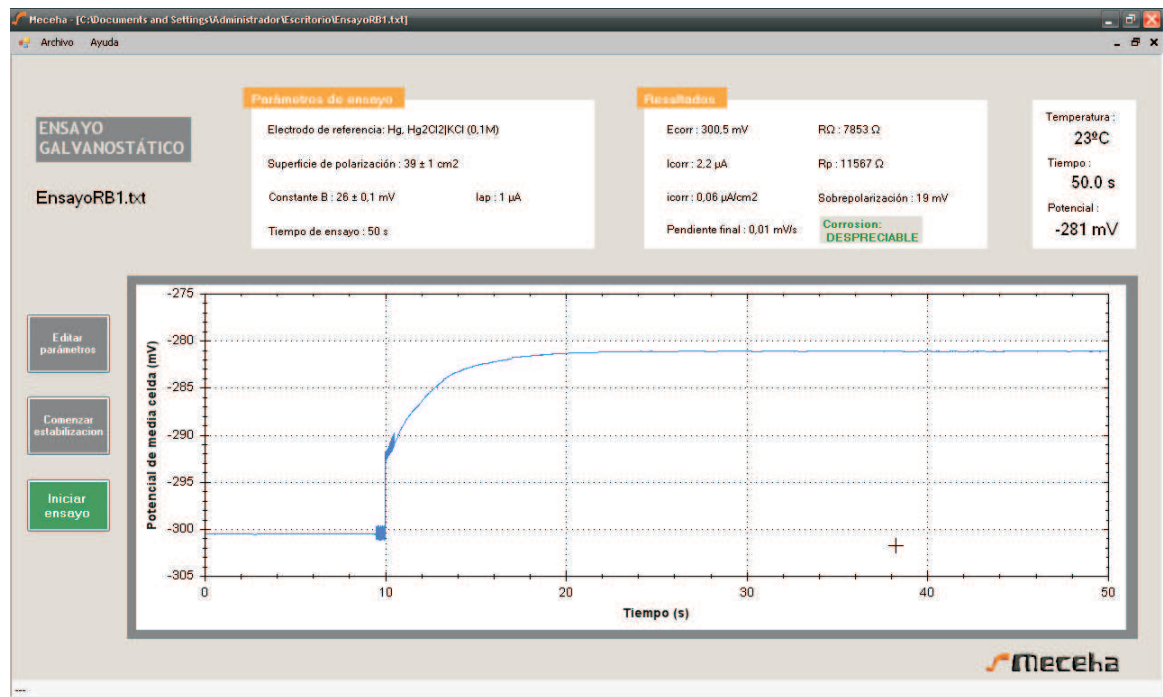


Figura 5.2: Ventana de ensayo galvanostático.

Los resultados mostrados son:

- Potencial libre de corrosión E_{corr}
- Resistencia óhmica R_{ohm}
- Resistencia de polarización R_P
- Intensidad de corriente de corrosión I_{corr}
- Densidad de corriente de corrosión i_{corr}
- Sobrepolarización máxima alcanzada
- Pendiente del tramo final de la curva

Configuración

Este formulario es llamado por el de ensayo galvanostático, y se utiliza para la edición de los parámetros del ensayo.

Hg, Hg ₂ Cl ₂ KCl (0,1 M)	+ 0,3337 V
Hg, Hg ₂ Cl ₂ KCl (1 M)	+ 0,2800 V
Hg, Hg ₂ Cl ₂ KCl (saturada)	+ 0,2415 V
Ag, AgCl KCl (0,1 M)	+ 0,2881 V
Ag, AgCl KCl (1 M)	+ 0,2224 V
Cu CuSO ₄ , Cu ²⁺	+ 0,3180 V

Figura 5.3: Ventana de configuración.

En el mismo, el usuario ingresa el tiempo de ensayo y la corriente a inyectar, así como otros parámetros utilizados en los cálculos de los resultados, a saber:

- Superficie de polarización, o superficie de la armadura que participa en el ensayo
- Constante B
- Electrodo de referencia utilizado.

Adicionalmente, el formulario permite el ingreso de comentarios y otros dos campos de texto que pueden utilizarse para la localización del sector ensayado, los cuales se registran en el documento de texto que se genera al finalizar el ensayo.

Si bien el usuario puede ingresar directamente la corriente a inyectar, este formulario brinda herramientas para la estimación de la corriente óptima que produciría un

sobrepotencial de $10mV$. Esto se basa en la estimación de las resistencias óhmica y de polarización a partir de los parámetros ya ingresados y otros nuevos, que son:

- Diámetro de confinamiento (diámetro en el que se considera la corriente confinada)
- Resistividad del hormigón
- Espesor de recubrimiento (profundidad de la armadura)
- Intensidad de corrosión prevista

Con estos valores, se obtienen los valores de las resistencias a partir de las ecuaciones 3.1, 3.2, y 3.3, y se estima dicha corriente.

Para facilitar el ingreso de parámetros, el formulario muestra además dos tablas: valores de referencia para resistividad del hormigón en diferentes ambientes (tabla RILEM TC-154 EMC [24]), y el potencial respecto al hidrógeno para diferentes electrodos de referencia.

Medida Resistividad

Este formulario realiza un ensayo con el fin de estimar la resistividad del hormigón.

Para ello, el usuario debe ingresar el radio del electrodo utilizado y la corriente a inyectar, e iniciar la medida.

Comienza entonces un ensayo con el mismo procedimiento que el galvanostático, con la diferencia que es realizado por un período de tiempo de pocos milisegundos para evitar el crecimiento luego del salto óhmico, y de que no se despliega la curva de resultado. Al finalizar la medida se muestra la resistividad obtenida.

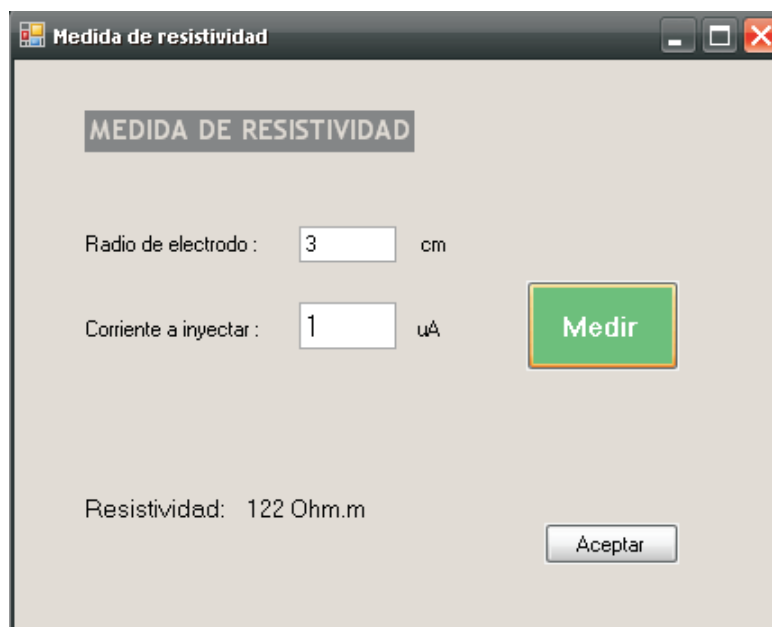


Figura 5.4: Ventana de ensayo de medida de resistividad ρ .

PotencialDeCorrosion

Este formulario implementa el ensayo de potencial libre de corrosión.

El ensayo es similar al modo estabilización del ensayo galvanostático, con la diferencia de que adicionalmente a desplegar la curva medida provee una herramienta que muestra el valor máximo, el mínimo y el promedio de la lectura en un intervalo de tiempo definido por el usuario.

Por otro lado, sólo requiere de un parámetro (electrodo de referencia), por lo que resulta útil cuando el interés es realizar un mapeo de potencial libre de corrosión sin realizar el ensayo galvanostático.

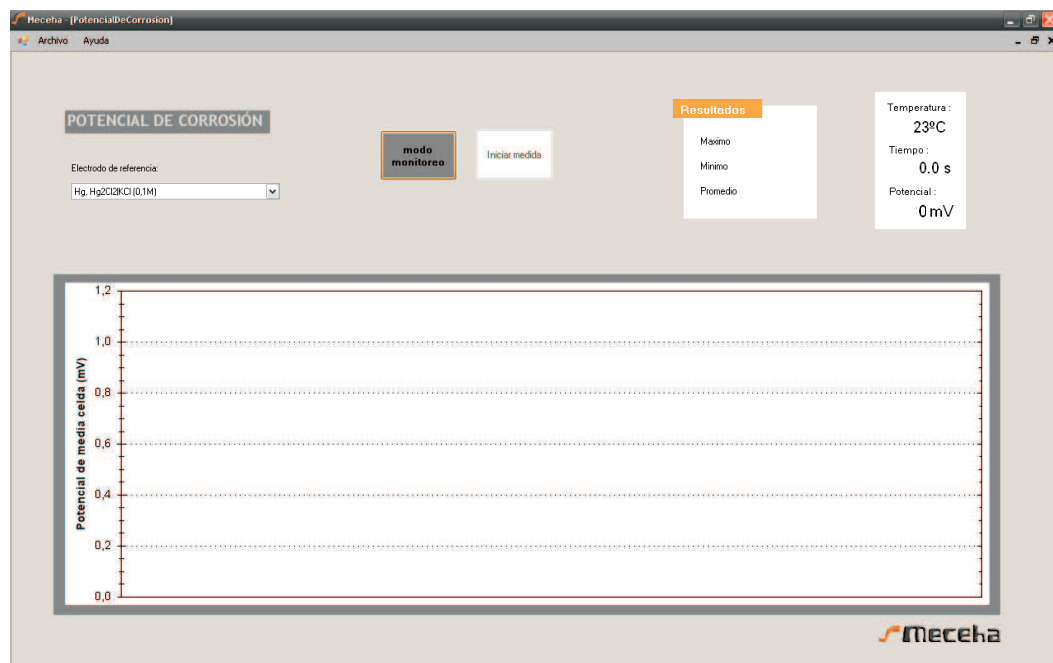


Figura 5.5: Ventana de ensayo de medición de potencial libre de corrosión E_{corr} .

5.3. Descripción del software

5.3.1. Clases y componentes

Además de los formularios descritos anteriormente, otra de las clases principales que incluye el software es la clase estática `vg.cs`, que contiene variables y métodos globales que se comparten entre los diferentes formularios. El uso de esta clase estática evita duplicar parámetros únicos y facilita el intercambio de información entre formularios, así como minimiza la repetición de código.

Por otro lado tenemos la clase `NumericTextBox.cs`, obtenida de los ejemplos de Visual Studio, permite generar campos de ingreso de datos sólo numéricos, lo que se utiliza en gran parte de la configuración de los ensayos.²

También se incorpora al proyecto el paquete de clases de cálculo algebraico `ALGLIB`, de licencia GNU, el cual se utiliza para realizar ajustes de curvas.³

Otras clases que integran el proyecto son el formulario `AcercaDe`, que muestra información sobre el proyecto MECEHA y el formulario `ventanaInicio`, que se muestra al iniciar el programa.

Con respecto a las librerías, además de las librerías estándares de C#, el software utiliza dos adicionales: la librería `Zedgraph`, de licencia GNU⁴, la cual se utiliza para realizar el gráfico en tiempo real, y la librería de LabJack U3 `LJUDDotNet`, la cual provee un conjunto de instrucciones con las cuales es posible comandar y recibir información, desde y hacia la placa de adquisición y control.

Esta placa provee además un driver que actúa de interfaz entre dichas funciones y la propia placa, además de realizar ciertas funciones adicionales.

²Obtenida de Visual Studio Developer Center: msdn.microsoft.com/en-us/library/ms229644.aspx.

³Desarrollado Sergey Bochkonov (ALGLIB project). Disponible en www.fsf.org

⁴Disponible en www.zedgraph.org

5.3.2. Principales tareas e implementaciones

En los esquemas 5.6, 5.7 y 5.8 se resumen las principales tareas que desarrolla el software en cada uno de los ensayos.

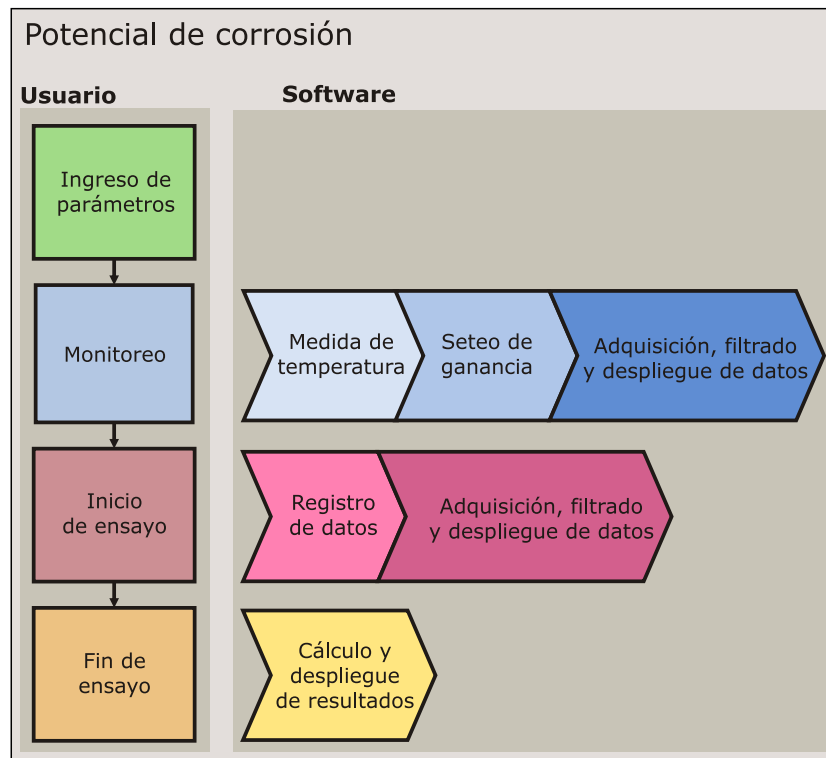
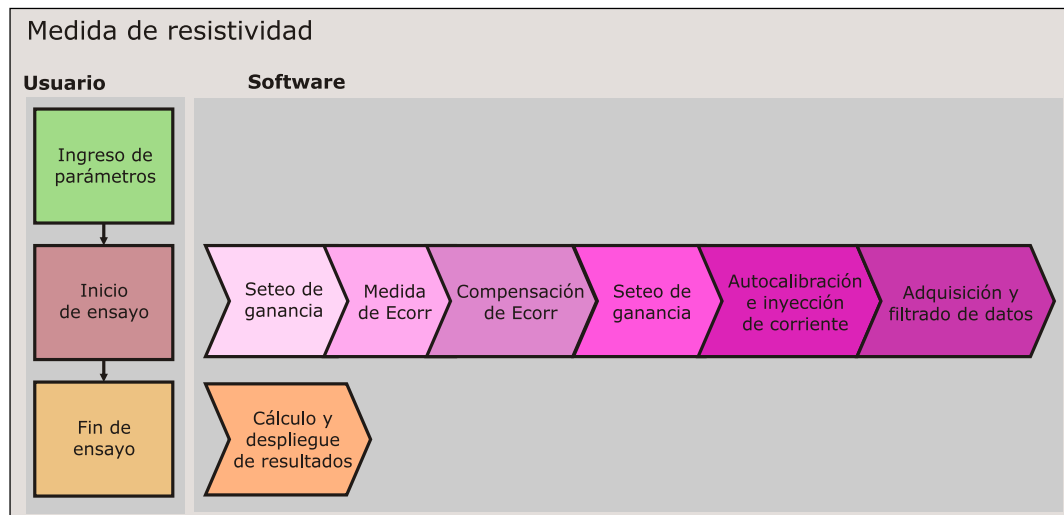
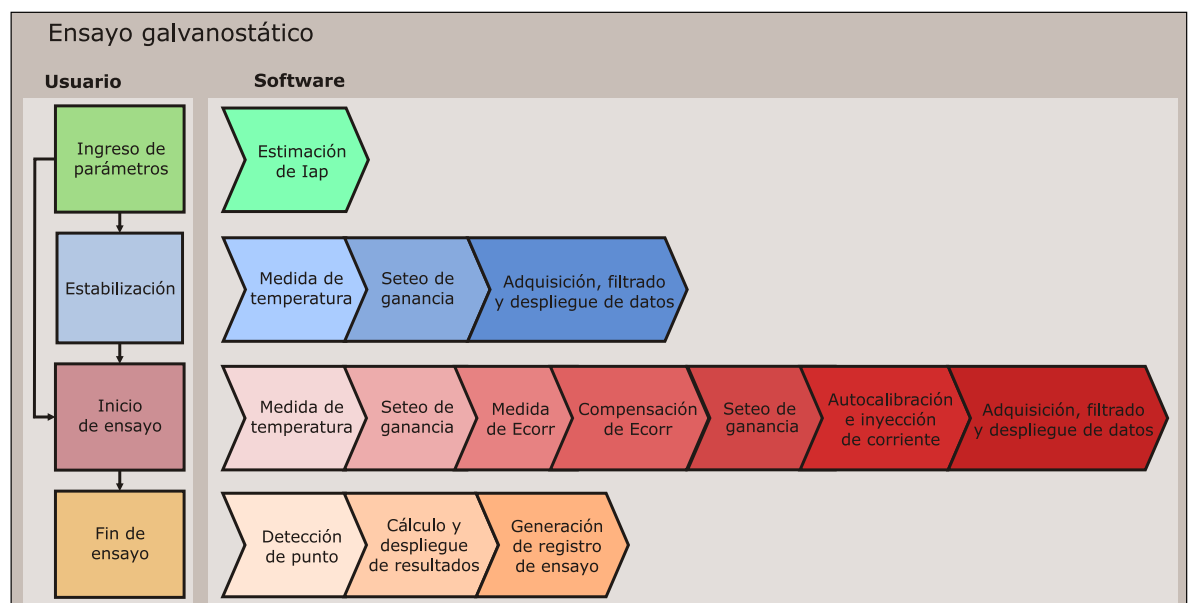


Figura 5.6: Diagrama de flujo de medida de potencial libre de corrosión E_{corr} .

Figura 5.7: Diagrama de flujo de medida de resistividad ρ .Figura 5.8: Diagrama de flujo del ensayo galvanostático para calcular i_{corr} .

A continuación se describen las tareas y los métodos principales que están involucrados.

Procedimientos de ajuste

Medida de temperatura

El potencial de media celda obtenido con un electrodo de referencia se supone medido en condiciones normalizadas, entre las que la temperatura debe ser de 25°C. Cuando la medida se realiza a otras temperaturas, deben utilizarse factores de corrección. Por esta razón, previo a la medida del potencial de media celda, el software realiza una medida de temperatura, haciendo una lectura al canal de Labjack que devuelve este parámetro. Luego se realiza la corrección respecto a una tabla almacenada en el archivo `config.ini`, interpolando para temperaturas intermedias.

Estas tareas se implementan en el método estático `medirTemperaturaYCorregir()` de la clase `vg.cs`.

Seteo de ganancia

Utilizando el modo stream, los datos son adquiridos con una resolución de 12 bits y en un rango entre 0 y 2, 44V. Para reducir el efecto de la cuantización y otros tipos de ruido, la señal debe ser amplificada lo máximo posible con el amplificador de ganancia programable.

En el caso de la respuesta del ensayo galvanostático, sabemos que es de interés que la sobrepolarización de la armadura se ubique en torno a 10mV. Además, ésta se encuentra limitada por un umbral de 40mV luego del cual el software detiene el ensayo para evitar daños a la estructura. De esto resulta que dentro del rango discreto de ganancias posibles, ésta tenga un valor fijo para este ensayo.

En cambio, para el caso de la señal de potencial libre de corrosión, su valor es en principio desconocido y tiene un rango amplio, por lo que es necesario ajustar la ganan-

cia.

Para esto, se realiza una primera lectura a ganancia mínima ($G = 2$), en el método `setearGananciaEcorr()` de la clase `vg`. Se mide en modo stream el canal correspondiente (AIN-2) durante 1 segundo, se promedian las muestras, y luego se asigna la ganancia máxima que amplificando ese promedio no supere los $2V$. De esta manera, se obtiene una ganancia óptima pero permitiendo una excursión de un 25 % por encima del valor leído, debido a las fluctuaciones que pueden ocurrir en este parámetro.

Posteriormente, el valor del potencial libre E_{corr} es medido con la nueva ganancia de similar manera, utilizando el método `medirEcorr()` de la clase `vg`.

Compensación del potencial libre de corrosión

El ensayo galvanostático responde con una variación de unos pocos mV en torno al potencial libre de corrosión E_{corr} , que puede ser de varios cientos. La amplificación directa de esta señal resultaría altamente ineficiente, ya que este offset limitaría fuertemente la ganancia cuando el principal interés es ver en detalle la variación para poder estimar la corrosión de la estructura ensayada.

Por esta razón, MECEHA implementa una compensación del offset, lo que permite una mayor amplificación del efecto de interés.

Una vez obtenido el valor del potencial libre E_{corr} , el método `compensarEcorr()` de la clase `vg.cs` ejecuta esta operación, configurando el DAC de compensación (DAC1).

El valor ingresado se calcula de forma de reducir el offset a $5mV$, de forma de mejorar la amplificación pero a su vez asegurar un margen para que las posibles variaciones debido a las no idealidades del circuito y de la configuración de ensayo no produzcan una sobrecompensación, es decir, que la señal pase a ser negativa y falle la conversión A/D.

Autocalibración de corriente

Como se señaló en la sección de hardware, MECEHA implementa una autocalibración de corriente, de manera de disminuir el error en generarla.

Para ello, luego de fijar el valor del DAC de corriente (DAC0) calculado para generar la corriente de ensayo, el software realiza una lectura en la entrada de calibración. Conociendo la rama de corriente activa, puede deducirse la corriente generada con una incertidumbre menor a la que se tiene en su generación.

Si la diferencia de la corriente medida con la corriente deseada supera el error máximo aceptado, se ajusta entonces el valor del DAC un paso mínimo ($5mV \sim 4,95V/1024$) y vuelve a leerse el valor de calibración. El error máximo aceptado es el cambio en corriente que produce ese paso mínimo, para la rama de corriente activa.

Si con la nueva lectura también se supera el error aceptado, se vuelve a ajustar el DAC y se realiza otra lectura. Este proceso continúa hasta que se logre el error deseado, se supere un valor máximo de iteraciones, o se alcancen los límites del DAC.

La autocalibración se implementa en el método `autocalibrarCorriente()` de la clase `vg.cs`.

Adquisición de datos y filtrado

Adquisición de datos y generación de gráfico

Cuando utilizamos el modo stream, el driver de LabJack se encarga de tomar las muestras periódicamente de un stack de la placa y colocarlas en un buffer de memoria en el pc, de tamaño configurable (buffer UD), al cual el software debe encargarse de leer, también periódicamente, de manera de obtener los datos y de evitar desborde.

Esto fue implementado utilizando un timer que se ejecuta cada $100ms$ y llama al método `leerDatosyEstadoBuffers()`, de la clase `vg.cs`, el cual lee inicialmente el estado de los buffers, obtiene la cantidad de muestras disponible y las devuelve en un array. Los datos luego son transferidos a otros arrays para ser registrados o graficados.

Filtrado

Como se vio previamente, la respuesta al ensayo galvanostático es un salto inicial debido a la resistencia óhmica del hormigón, seguido de un crecimiento exponencial hasta un valor límite.

Según el modelo, este salto inicial es instantáneo, por lo que la señal contiene infinitos componentes en frecuencia. La correcta detección del salto es determinante ya que a partir de ese valor es calculada la resistencia de polarización, parámetro a partir del cual se deduce el nivel de corrosión de la estructura.

Por esta razón, la señal es adquirida a $2,5kHz$, la mayor frecuencia de muestreo posible dentro de la resolución de 12 bits, luego de ser filtrada analógicamente en el circuito de sensado a un ancho de banda poco menor al kHz.

Fuera de este punto, la evolución de la señal es lenta, con una constante de tiempo mínima de pocos cientos de ms y ancho de banda con caída de 3dB menor a $1Hz$, por lo que la frecuencia de muestreo utilizada para el salto resulta innecesaria. Sin embargo, en el modo de medida stream este parámetro no puede modificarse durante la adquisición.

A los efectos de disminuir el efecto del ruido es entonces reducido el ancho de banda de la señal adquirida, utilizando un filtro de media móvil con frecuencia de corte de $5Hz$. El filtro fue elegido tomando en cuenta que debe ser causal, ya que la señal debe ser desplegada al usuario en tiempo real.

Para los modos de medida libre, sin inyectar corriente, se espera ver una señal esta-

ble, por lo que se realiza el filtrado con la misma frecuencia de corte.

El filtrado se realiza utilizando el método estático `filtroMediaMovil()`, implementado en la clase `vg.cs`.

Descarte de muestras

Como se señaló anteriormente, fuera del salto inicial la señal resulta adquirida a una frecuencia muy superior a la necesaria. Esto produce archivos de ensayo de tamaño considerable (de algunos MB, dependiendo de la duración del ensayo), lo cual no sólo resulta impráctico para su almacenamiento sino que dificulta su post-procesamiento.

Debido a esto el software implementa un submuestreo, tomando una de cada 50 muestras y reduciendo así la frecuencia de muestreo a $50Hz$, considerando la señal previamente filtrada con el filtro de media móvil. El submuestreo se realiza hasta y desde un tiempo fijo en torno a la inyección del pulso de corriente, asegurando no afectar la respuesta en el salto buscado.

Umbral de sobrepolarización

En un ensayo galvanostático, el sobrepotencial que se imprime a la armadura debe ubicarse como máximo en torno a los $20 - 25mV$ para considerar válido el modelo lineal de Randle utilizado en los cálculos, por lo que en principio no serían útiles los datos de un ensayo que supere largamente estos valores. Por otro lado, un sobrepotencial excesivo puede resultar destructivo en cuanto puede acelerar perceptiblemente el proceso corrosivo de la estructura a medir.

Por esta razón, el software verifica que este sobrepotencial no supere un umbral de $40mV$, caso en el que detiene el ensayo e informa al usuario, quien podrá reducir el valor de la corriente aplicada en un ensayo futuro.

Esto se realiza invocando el método `verificarUmbral()` de la clase `vg.cs` en cada lectura que se realiza, el cual, en caso que se supere el umbral detiene el ensayo y despliega un aviso al usuario.

Importación de ensayo galvanostático

El software permite la importación de ensayos galvanostáticos (los únicos que generan registro) a partir de los archivos de resultados, para su visualización. Se despliega la curva y los parámetros utilizados en el ensayo, así como los resultados ya registrados en el archivo.

Para que la importación sea exitosa, el archivo de ensayo debe mantener el formato original, aunque pueden modificarse los datos adquiridos.

La importación se realiza desde la barra de menús del formulario Principal

Cálculo y registro de resultados

Detección de salto

Para la detección del salto óhmico, primero se realiza la derivada de la señal registrada. Se utiliza una aproximación numérica de error de orden 6[?]:

$$f'(t_k) = \frac{1}{60(t_k - t_{k-1})} [10f(t_{k-6}) - 72f(t_{k-5}) + 225f(t_{k-4}) - 400f(t_{k-3}) + 450f(t_{k-2}) - 360f(t_{k-1}) + 147f(t_k)]$$

Si bien la señal no es ideal debido a que es filtrada analógicamente, a las no idealidades del hardware y a la presencia de ruido, su derivada presenta un pico pronunciado en torno a la mitad del salto óhmico.

Luego de 5 muestras de ese pico, el valor del salto es alcanzado en cualquier caso, y es calculado como el promedio de 10 muestras a partir de ese momento. El promedio

debe realizarse ya que en torno a este punto la señal tiene un ancho de banda en torno a $1kHz$ y hay mayor presencia de ruido. Podría pensarse que tomar estas muestras luego del pulso puede llevar a un error apreciable debido al crecimiento de la curva. El hecho es que, debido a la alta frecuencia de muestreo, para un peor caso de constante de tiempo mínima ($200ms$) el punto es detectado cuando la exponencial sube un 1 %, lo que resulta despreciable frente a la incertidumbre en la medida de voltaje. Es decir $1 - e^{(5 \cdot 0,4ms/200ms)} = 1 \%$

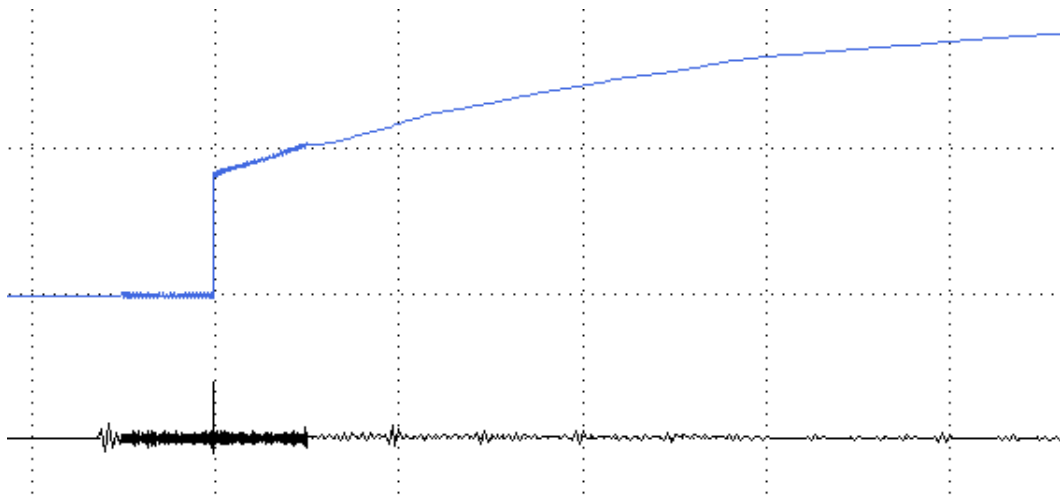


Figura 5.9: Señal de respuesta al pulso galvanostático (azul) y su derivada (negro)

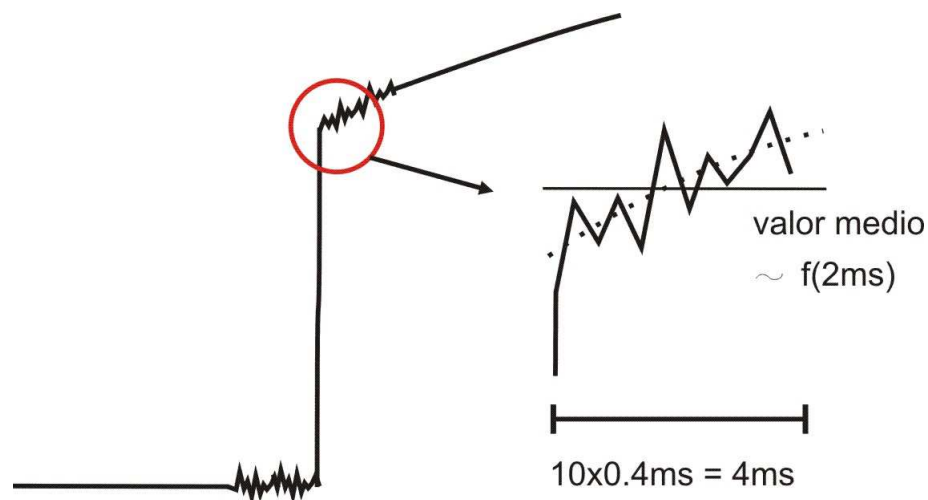


Figura 5.10: Detección del salto óhmico

Cálculo de pendiente final

Según el modelo de Randle, el crecimiento de la curva de ensayo galvanostático se da hasta un valor límite en el cual se estabiliza. Si ocurre que el tiempo de ensayo no fue suficiente o la estructura a ensayar no parte de condiciones estables, puede ocurrir que la curva no estabilice. Como forma de evaluar esta estabilización, el software ajusta una recta en el 10 % final de la curva de ensayo.

El ajuste se realiza utilizando la función `buildLinearLeastSquares()`, que pertenece al conjunto de clases `ALGLIB`.

Guardado de resultados

Una vez finalizado el ensayo y calculados los parámetros resultantes, es invocado el método `guardarResultados()` de la clase `vg.cs`, el cual genera un documento de texto plano en el que figuran:

- Nombre de archivo
- Fecha y hora
- Parámetros de ensayo
- Resultados del ensayo
- Datos registrados, en dos columnas, tiempo y potencial de media celda

Un ejemplo de archivo de resultados se adjunta en el anexo E.

Capítulo 6

Errores

Teniendo el diseño de hardware y software, podemos realizar una estimación de los errores que tiene MECEHA a la hora de inyectar corriente y medir potencial. Estos errores se suman a otros que no dependen de MECEHA, como en la estimación del parámetro B , o en la medida del área superficial de varilla por la que circula la corriente aplicada, que van influir en el error total de la velocidad de corrosión i_{corr} .

Si tenemos una función de n variables $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ se cumple que:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (6.1)$$

donde $u(x)$ es la incertidumbre absoluta de la variable x .

Considerando el modelo de Randle y que se realiza el ensayo de pulso galvanostático aplicando una corriente I_{ap} , es fácil ver que:

$$R_P = \frac{V_f - V_{ohm}}{I_{ap}}$$
$$i_{corr} = \frac{B}{R_P} = \frac{BI_{ap}}{A(V_f - V_{ohm})}$$

donde:

- E_{corr} : potencial de corrosión
- V_{ohm} : potencial luego del salto óhmico

- V_f : potencial al final del ensayo
- B : constante que depende de la corrosión
- A : área superficial de la varilla por donde circula la corriente

Podemos considerar que $i_{corr} = f(I_{ap}, V_f - V_{ohm}, B, A)$, entonces tenemos que:

$$\frac{\partial i_{corr}}{\partial I_{ap}} = \frac{B}{A(V_f - V_{ohm})} \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial i_{corr}}{\partial (V_f - V_{ohm})} = \frac{-BI_{ap}}{A(V_f - V_{ohm})^2} \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial i_{corr}}{\partial B} = \frac{I_{ap}}{A(V_f - V_{ohm})} \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial i_{corr}}{\partial A} = \frac{-BI_{ap}}{A^2(V_f - V_{ohm})} \quad (6.5)$$

$$(6.6)$$

Sustituyendo 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 en 6.1, obtenemos:

$$\frac{u(i_{corr})}{i_{corr}} = \sqrt{\left(\frac{u(I_{ap})}{I_{ap}}\right)^2 + \left(\frac{u(V_f - V_{ohm})}{V_f - V_{ohm}}\right)^2 + \left(\frac{u(B)}{B}\right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2} \quad (6.7)$$

Resulta entonces que la incertidumbre relativa de la corriente de corrosión i_{corr} al cuadrado es la suma de los cuadrados de las incertidumbres relativas de la corriente aplicada, de la diferencia de potencial medida $V_f - V_{ohm}$, del área A y el parámetro B . Como MECEHA sólo va a introducir error en la medida de la velocidad de corrosión debido al error en la corriente aplicada I_{ap} y a los potenciales medidos, estudiaremos cada uno de ellos detalladamente.

6.1. Incertidumbre en la corriente aplicada

La corriente I_{ap} es inyectada en el ensayo a través de una fuente de corriente. La incertidumbre asociada se debe a la de los componentes que se utilizan en la fuente, incluyendo el conversor digital analógico (DAC) de la placa LabJack que fija su valor.

Para este cálculo se toman en cuenta:

- Error de cuantización en el DAC ($5mV$ máximo)
- Offset del operacional ($110\mu V$ máximo)
- Error en las resistencias ($0,1\%$ máximo)
- Error introducido por las llaves (transistores M1, M2, M3)

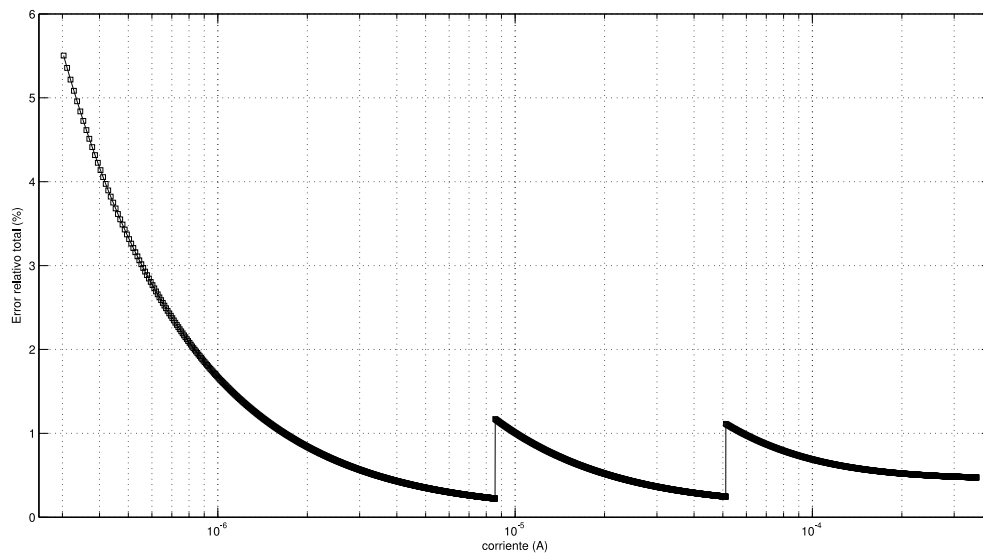


Figura 6.1: Error porcentual en la corriente inyectada I_{ap} , en función de I_{ap} (escala horizontal logarítmica).

Los valores de incertidumbre varían con el rango de corriente utilizado y pueden acotarse por:

- rango $200nA$ a $1,12\mu A$: $1,5\% < \frac{\Delta I_{ap}}{I_{ap}} < 5,5\%$
- rango $1,12\mu A$ a $300\mu A$: $\frac{\Delta I_{ap}}{I_{ap}} < 1,5\%$

En el apéndice A se muestra el código utilizado para el cálculo de la incertidumbre y gráficos de su valor.

6.2. Errores en la medida de voltaje

Para el análisis del error relativo en la medida de tensión se pueden diferenciar dos casos: medida de E_{corr} y medida de voltaje asociado a la resistencia R_P .

6.2.1. Error en la medida de E_{corr}

El caso de la medida de E_{corr} es afectado por dos fuentes de error:

- Error introducido en las tensiones de offset de los amplificadores operacionales a través del circuito de medida
- Error de cuantización en el ADC de la Labjack (12 bits)

Considerando los valores típicos de offset en las hojas de datos y la arquitectura del circuito de sensado de E_{corr} , podemos calcular el error para diferentes tensiones esperadas de E_{corr} en los peores casos donde los offsets de los operacionales y el error de cuantización afectan en el mismo sentido.

$$V_{offsetOpAmp} = 110\mu V$$

$$V_{offsetPGA} = 1,5mV$$

$$V_{med} = \frac{V + \frac{3}{2}V_{offsetOpAmp} + V_{offsetPGA}(1 + \frac{2}{G})G + \frac{2,440mV}{4096}}{G}$$

$$Err_{rel} = 100 \frac{V_{med} - V}{V_{med}}$$

En estas ecuaciones v es el valor de entrada y G es la ganancia asociada a la medición, la cual es elegida por el sistema de modo que la tensión de entrada amplificada no supere $2V$.

Voltaje (mV)	Error relativo (%)
50	3.39
60	2.98
80	2.25
100	1.81
140	1.43
170	1.18
200	1.00
300	0.85
400	0.64
500	0.51
600	0.57
800	0.43
1000	0.35

Cuadro 6.1: Estimación de peores casos. Error relativo en la medida de E_{corr}

6.2.2. Error en la medida de la tensión asociada a R_P

El caso de esta medida es afectado solamente por los errores de cuantización. Esto se debe a que la medida de esta tensión implica medir dos potenciales afectados igualmente por el offset y luego restarlos, de modo que los errores introducidos por offset son descontados.

$$V_{med} = \frac{GV + 2\frac{2,440mV}{4096}}{G}$$

$$Err_{rel} = 100\frac{V_{med} - V}{V_{med}}$$

6.3. Errores en la autocalibración

El circuito de calibración es utilizado para verificar y realizar ajustes en la corriente que MECEHA inyecta al hormigón mediante su fuente de corriente, ya que brinda un valor más preciso que el que se estima al comandar la fuente. Por un error en el diseño

Voltaje (mV)	Error relativo (%)
5	0,12
10	0,059
15	0,079
20	0,059
25	0,12
30	0,099

Cuadro 6.2: Estimación de peores casos. Error relativo en la medida de voltaje asociado a R_P

sólo podemos calibrar en los dos rangos de corrientes menores, que son los que presentan más complejidad.

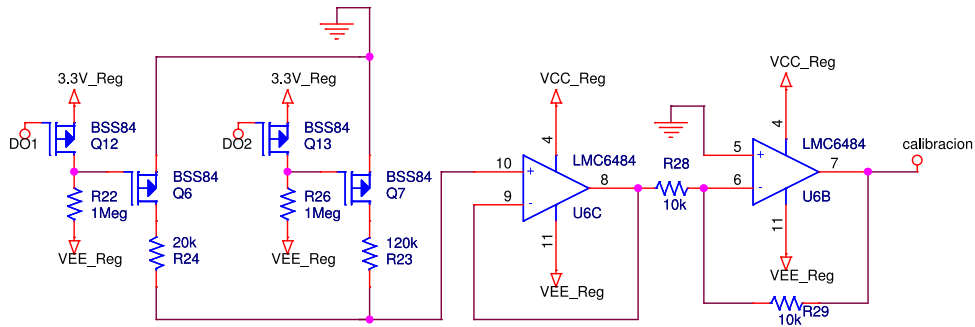


Figura 6.2: Circuito de autocalibración de corriente.

Mediante el uso de una llave, la corriente a inyectar al hormigón se hace circular previamente por una de las 2 ramas comandadas por los transistores Q13 o Q14 (que se activa en coordinación con el rango de corriente que se esté utilizando), la cual produce una caída de potencial en la resistencia de la rama activa, que luego de ser acondicionada en los amplificadores es medida en una entrada analógica de la placa Labjack.

Luego se estima el valor de la corriente como el cociente entre el voltaje medido y la resistencia de la rama activa:

$$I_{ap} = \frac{V_{med}}{R}$$

de esto se desprende que:

$$\left(\frac{\Delta I_{ap}}{I_{ap}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta V_{med}}{V_{med}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \quad (6.8)$$

La incertidumbre en el voltaje medido se debe a la caída en las llaves Q13 o Q14, al offset de los operacionales de amplificación y a la cuantización en la entrada analógica de la placa Labjack.

$$\Delta V_{med} = I_{ap}R_{on} + \Delta V_{off} + \Delta V_q$$

6.3.1. Caída en las llaves

La caída en las llaves va estar dada por el producto de sus resistencias “on” con la corriente que se encuentre circulando. De acuerdo con la hoja de datos de las llaves BSS84[34], podemos tomar como valor límite una resistencia “on” de 20Ω .

6.3.2. Offset en amplificadores

Para el amplificador U2C el Offset de entrada V_{off} se traslada directo a la salida.

Para el amplificador U9D, considerando una fuente V_{off} en terminal +, tenemos una configuración no inversora. Entonces:

$$V_{out} = V_{off} \left(1 + \frac{R_{36}}{R_{35}}\right) = 2V_{off} \quad (6.9)$$

Para los amplificadores LMC6484 el valor típico para V_{off} es de $110\mu V$ [35].

6.3.3. Error de cuantización

En rango de entrada es de $0 - 2,44V$ y la resolución es de 12 bits. Por lo tanto:

$$\Delta V_q = \frac{2,44V}{4096} = 596\mu V \quad (6.10)$$

En suma, en un peor caso tendremos el error siguiente en el voltaje medido:

$$\Delta V_{med} = I_{ap}R_{on} + 3V_{off} + \Delta V_q \quad (6.11)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta V_{med}}{V_{med}} = \frac{R_{on}}{R} + \frac{3V_{off} + \Delta V_q}{RI_{ap}} \quad (6.12)$$

La incertidumbre relativa en la resistencia de la rama activa es simplemente la que declara el fabricante, que en este caso es de 0,1 %.

6.3.4. Incertidumbre total en la autocalibración

Incluyendo todos los factores tenemos que, la incertidumbre relativa en la corriente, medida en el circuito de calibración, está dada por:

$$\left(\frac{\Delta I_{ap}}{I_{ap}} \right)^2 = \left(\frac{R_{on}}{R} + \frac{3V_{off} + \Delta V_q}{RI_{ap}} \right)^2 + \frac{\Delta R^2}{R^2} \quad (6.13)$$

Introduciendo todo esto en un script de Matlab, obtenemos los siguientes resultados, que pueden ser visualizados también en la figura 6.3:

- rango 200nA a 500nA: $\frac{\Delta I_{ap}}{I_{ap}} < 4 \%$
- rango 500nA a 800nA: $\frac{\Delta I_{ap}}{I_{ap}} < 1,5 \%$
- rango 800nA a 51,1μA: $\frac{\Delta I_{ap}}{I_{ap}} < 1 \%$
- rango 51,1μA a 300μA: $\frac{\Delta I_{ap}}{I_{ap}} < 1,2 \%$

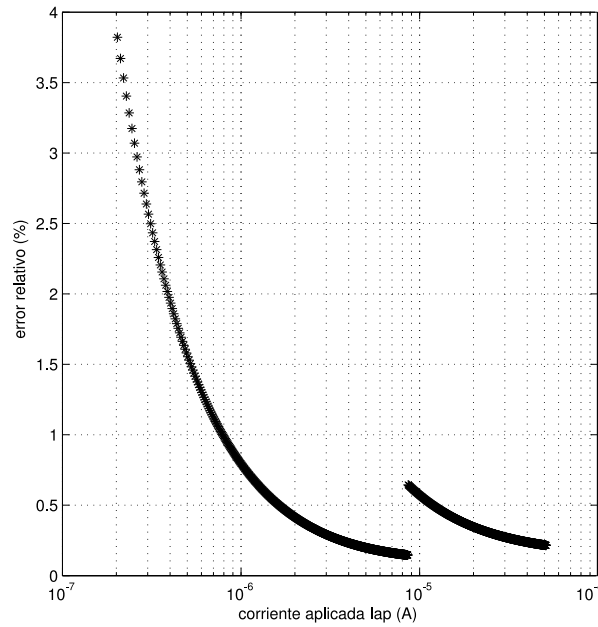


Figura 6.3: Error relativo en la autocalibración de la corriente.

6.4. Incertidumbre total en i_{corr}

A partir de los cálculos anteriores, podemos estimar el error total introducido por MECEHA en la medida de i_{corr} . Consideraremos $\Delta B = \Delta A = 0$, dado que son factores externos a nuestro equipo. La autocalibración de la corriente disminuye el error en I_{ap} , mientras que el error en el potencial medido es constante (suponiendo el peor caso de R_P y R_{ohm} , y ganancia óptima del circuito de sensado). Sustituyendo en 6.7, obtenemos el siguiente error total, dependiente del rango de corriente aplicada:

- rango $200nA < I_{ap} < 500nA$: $\frac{\Delta i_{corr}}{i_{corr}} < 4\%$
- rango $500nA < I_{ap} < 800nA$: $\frac{\Delta i_{corr}}{i_{corr}} < 1,6\%$
- rango $800nA < I_{ap} < 51,1\mu A$: $\frac{\Delta i_{corr}}{i_{corr}} < 1,1\%$
- rango $51,1\mu A < I_{ap} < 300\mu A$: $\frac{\Delta i_{corr}}{i_{corr}} < 1,3\%$

Estos son los errores teóricos, si el área de la varilla A y B fueran exactos. En la realidad, B es un parámetro que se ajusta por la persona que realiza la medición, pudiendo

ser $26mV$ (que es el parámetro por defecto de MECEHA y el que usan los instrumentos comerciales) o $52mV$, es decir un error del 100 %. El área afectada en la varilla es muy difícil de estimar, más aún cuando no hay confinamiento. Si hay confinamiento puede aproximarse por una varilla de largo igual al diámetro de confinamiento y radio estimado a partir de los planos de la estructura. Cuando existen varias barras y no están agrupadas paralelas (por ejemplo, perpendiculares, formando una rejilla), el cálculo del área afectada es aún mucho más complicada.

Debido a estas apreciaciones, aunque el error de los equipos electrónicos sea bajo (como sucede con MECEHA), los especialistas del área dicen que se puede tolerar un factor de 2 en la medida de i_{corr} . [4]

Capítulo 7

Ensayos y calibración

Una vez diseñado el PCB, éste fue fabricado por una empresa en los Estados Unidos¹, dado que la placa era doble capa con agujeros metalizados, y los plazos de la empresa que lo podía realizar en el país eran demasiado prolongados para los tiempos del proyecto. En cuanto llegó al país, comenzó el soldado de los componentes al mismo, la gran mayoría de ellos de montaje superficial y poca distancia entre las patas. En la figura 7.1 podemos apreciar una de las caras de la placa, con los componentes soldados y los conectores Molex.

A medida de que se fue soldando, se comprobó, a nivel básico, cada componente. Se midieron las resistencias, las salidas de los reguladores y del charge pump, continuidad en las pistas y en caminos con resistencias.

Una vez ensamblado todo el circuito y todos los componentes comprobados, se procedió a probar bloques más grandes. Se verificó primero que los seguidores e inversores funcionaran correctamente. Se verificó que los polos introducidos por los capacitores C1 y C4 se encontraban en la frecuencia esperada. Las llaves BSS84, BSS138 y MAX4636 fueron comandadas de a una, usando el software propio de Labjack (Control Panel, que permite manipular cada pin de la placa), comprobando los estados on y off.

Para minimizar los errores en la medida, medimos la ganancia del amplificador de

¹Advanced Circuits: www.4pcb.com

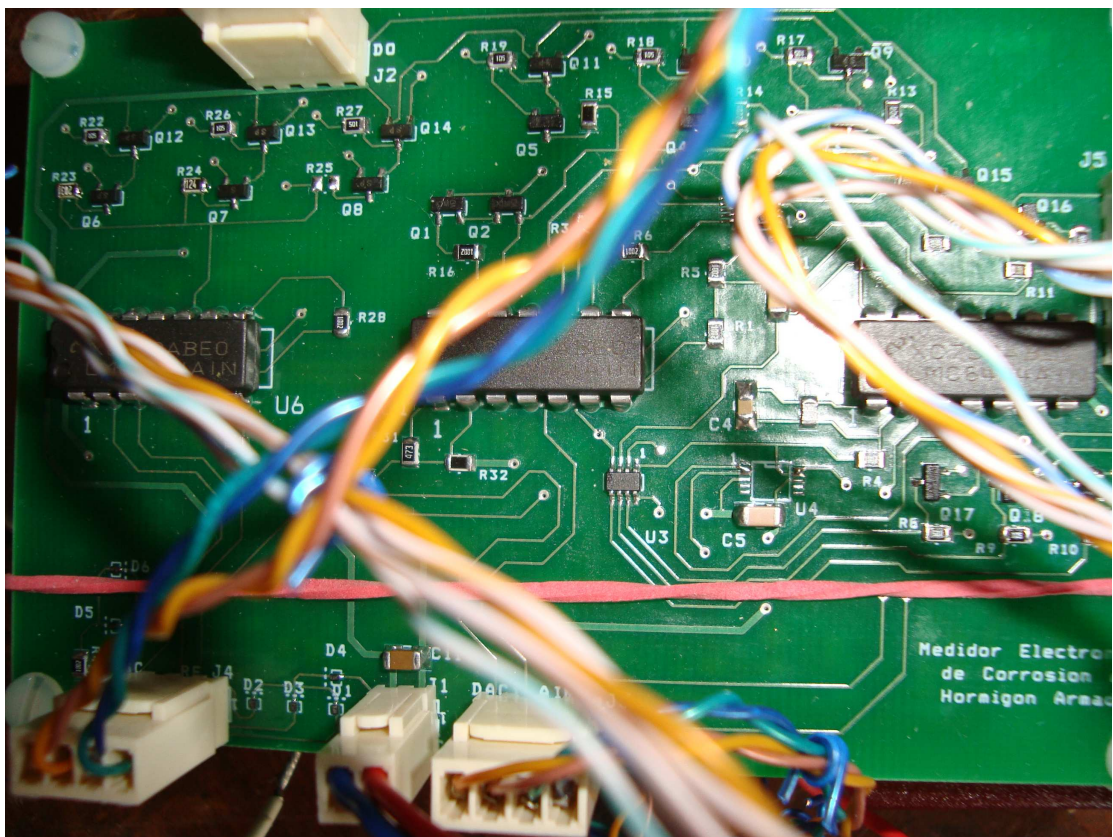


Figura 7.1: Foto de una de las caras de la placa de MECEHA, con componentes soldados y conectores Molex.

ganancia programable LTC6910, de forma de poder ingresar un valor más exacto en el software. Usando un DAC de otra Labjack U3, generamos un voltaje que fue medido con un multímetro de alta precisión (Fluke 45, del laboratorio docente del IIE) e inyectado a MECEHA. Las ganancias ajustadas que obtuvimos se pueden ver en la tabla 7.1.

Ganancia nominal	Ganancia real
1	0,9990
2	1,9970
5	4,9862
10	9,9373
20	19,9347
50	50,0693
100	100,8634

Cuadro 7.1: Ganancia del amplificador de ganancia programable LTC6910

Luego de comprobado el funcionamiento básico de los componentes de la electrónica de MECEHA, pasamos a probar los bloques principales, a saber, fuente de corriente y circuito de sensado, con el estudio sistemático de los errores de ambos.

7.1. Fuente de corriente

Con el fin de probar la fuente de corriente, se fijaron, en primer lugar, diversos voltajes en el DAC-1, para medir los puntos de polarización en nodos importantes de la fuente, como por ejemplo el emisor de Q2, obteniendo los valores esperados. Los transistores en configuración Darlington, Q1 y Q2, no saturaron en los voltajes de interés.

Luego se probó la rutina de software para comandar las llaves que seleccionan la rama de corriente: Q9, Q10 y Q11, corrigiendo algunos detalles en la codificación que hay que poner en DO1, DO2 y DO3 para comandarlas correctamente. En el proceso, se quemaron un par de veces las llaves por estática, siendo necesario sacarlas y volverlas a soldar.

Como primera validación global, se utilizó el multímetro AMPROBE BDM40-UA para medir la corriente inyectada en los tres rangos, en la configuración mostrada en la figura 7.2. La resistencia R_{prueba} se puso en serie para no alterar la medida y su valor es tal que los transistores Q1 y Q2 no saturan. Puesto que los valores de corriente obtenidos daban una medida correcta en el AMPROBE BDM40-UA, se procedió a usar un mejor multímetro para medir los errores en la corriente inyectada I_{ap} . Para esto, se recurrió nuevamente al Fluke 45, usando la misma configuración que en la figura 7.2. A pesar de que las corrientes inyectadas eran medidas por el Fluke, la resolución de $1\mu A$ del aparato no permitía medir con precisión corrientes menores a los cientos de μA .

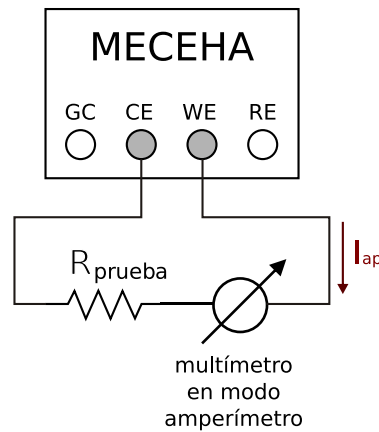


Figura 7.2: Medida de la corriente inyectada I_{ap} usando el multímetro AMPROBE BDM40-UA en modo amperímetro.

Se recurrió entonces a medir la corriente inyectada de forma indirecta, colocando una resistencia entre WE y CE, tal como se muestra en la figura 7.3. La resistencia R_{prueba} nuevamente fue calculada en cada rango para que la fuente no saturara y también para que la caída de potencial sobre la misma no superara los $600mV$, de manera de que los diodos de protección D5 y D6 no se activaran (lo que ocasionaría que parte de la corriente inyectada no pasara por la resistencia de prueba). Las resistencias R_{prueba} eran al 5 % o al 1 %, pero fueron medidas con el Fluke 45 en modo óhmetro, con errores inferiores.

Si el error en la medida de la resistencia es ΔR_{prueba} y en la medida del voltaje es

ΔV_{med} , el error relativo en la corriente I_{ap} medida indirectamente es:

$$\frac{\Delta I_{ap}}{I_{ap}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_{prueba}}{R_{prueba}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{med}}{V_{med}}\right)^2} \quad (7.1)$$

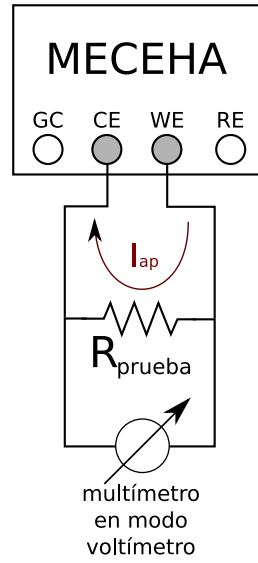


Figura 7.3: Medida indirecta de la corriente inyectada I_{ap} usando el multímetro Fluke 45 como óhmetro y como voltímetro.

Aplicando la ecuación 7.1 a los valores de resistencia y potencial medidos, obtenemos el error en la medida indirecta de la corriente I_{ap} . En la tabla 7.1 se pueden apreciar los valores de la corriente inyectada, según se seleccionó en el software de MECEHA, la corriente medida por el Fluke 45, el error relativo (cociente entre la diferencia de corriente medida y seleccionada sobre la corriente seleccionada) y el error en la medida (obtenido de la ecuación 7.1, usando la hoja de datos del multímetro [36]).

Si se comparan los errores relativos en la corriente inyectada con los calculados en el capítulo de errores, vemos una gran concordancia. En el rango de menores corrientes, el error tiene un máximo de 4 % en $200nA$ (corriente mínima), que es la mitad del error teórico que tenemos en la fuente de corriente sin la autocalibración, haciendo 10 iteraciones de medida y corrección del valor del DAC-1.

Asimismo, se verificó que la autocalibración era necesaria para los menores rangos. Como se puede apreciar en la tabla 7.1, la cantidad de iteraciones de autocalibración

I_{ap} (A)	I_{medida} (A)	Error relativo (%)	Error medida (%)
2,0E-7	1,920E-7	4,011	0,2328
3,0E-7	3,086E-7	2,878	0,1680
4,0E-7	3,925E-7	1,871	0,1468
5,0E-7	4,928E-7	1,443	0,1319
6,0E-7	5,96E-07	0,750	0,1225
7,0E-7	6,887E-7	1,610	0,1169
8,0E-7	7,79E-07	1,994	0,1127
9,0E-7	8,975E-7	0,274	0,1089
1,0E-6	9,905E-7	0,954	0,1066
1,1E-6	1,086E-6	1,310	0,1048
1,2E-6	1,189E-6	0,889	0,1032
1,3E-6	1,284E-6	1,245	0,1019
1,5E-6	1,486E-6	0,951	0,0999
1,7E-6	1,678E-6	1,271	0,0985
2,0E-6	1,979E-6	1,074	0,0970
2,5E-6	2,473E-6	1,074	0,0954
3,0E-6	2,970E-6	0,999	0,0944
4,0E-6	3,968E-6	0,797	0,0932
5,0E-6	4,980E-6	0,408	0,0925
6,0E-6	5,991E-6	0,148	0,0970
7,0E-6	6,988E-6	0,175	0,0954
8,0E-6	7,996E-6	0,056	0,0944
9,0E-6	8,902E-6	1,086	0,0932
1,0E-5	9,909E-6	0,905	0,0925
1,1E-5	1,092E-5	0,723	0,1650
1,2E-5	1,192E-5	0,654	0,4485
1,5E-5	1,486E-5	0,939	0,4193
2,0E-5	1,981E-5	0,956	0,3940
2,5E-5	2,486E-5	0,563	0,3811
3,0E-5	2,985E-5	0,503	0,3737
4,0E-5	3,981E-5	0,478	0,3660
5,0E-5	4,980E-5	0,402	0,3621
5,5E-5	5,481E-5	0,339	0,3602
6,0E-5	5,983E-5	0,278	0,3592
6,5E-5	6,485E-5	0,226	0,3584
7,0E-5	6,987E-5	0,182	0,3577
8,0E-5	7,976E-5	0,299	0,3567
9,0E-5	8,975E-5	0,278	0,3560
1,0E-4	9,974E-5	0,261	0,3555
1,2E-4	1,198E-4	0,194	0,3547
1,5E-4	1,498E-4	0,144	0,3541
2,0E-4	1,996E-4	0,211	0,3535
2,5E-4	2,493E-4	0,291	0,3531
3,0E-4	2,984E-4	0,545	0,3529

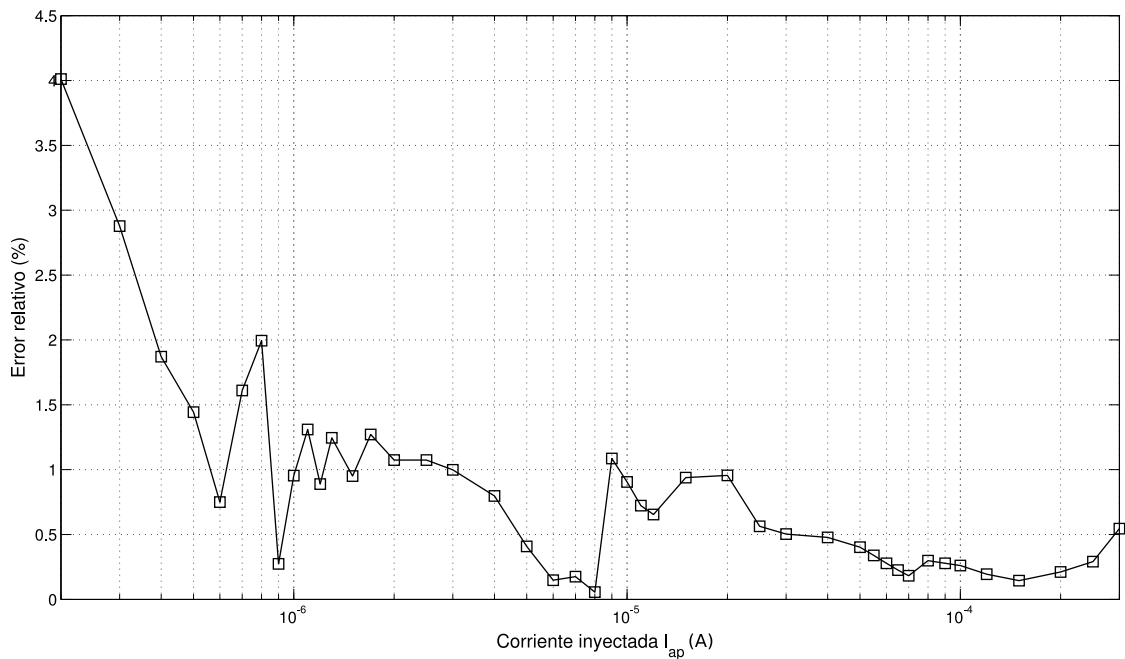


Figura 7.4: Error relativo en la corriente I_{ap} en función de I_{ap} (en escala logarítmica).

necesarias para lograr el menor error posible en la corriente inyectada disminuye con el valor de la intensidad a aplicar. Si la corriente está por debajo del μA , se requieren unas 10 iteraciones para que la calibración arroje el valor más preciso. El límite está dado por la cuantización del DAC1 (10 bits) y por el error de la autocalibración (offset de los operacionales U6B y U6C, resistencia de las llaves y dispersión del valor de la resistencia de la rama correspondiente).

I_{ap} (A)	Cantidad iteraciones
2,00E-07	10
3,00E-07	10
4,00E-07	10
5,00E-07	10
6,00E-07	10
7,00E-07	9
8,00E-07	8
9,00E-07	10
1,00E-06	9
1,10E-06	8
1,20E-06	8
1,30E-06	8
1,50E-06	8
1,70E-06	7
2,00E-06	6
2,50E-06	4
3,00E-06	3
4,00E-06	1
5,00E-06	1
6,00E-06	1
7,00E-06	1
8,00E-06	1
8,50E-06	1
9,00E-06	10
9,50E-06	10
1,00E-05	10
1,20E-05	9
1,50E-05	8
2,00E-05	8
2,50E-05	7
3,00E-05	6
4,00E-05	5
5,00E-05	4

7.2. Circuito de sensado

Para comprobar el correcto funcionamiento del circuito de sensado, en primer lugar se inyectó una señal continua generada por el DAC de otra Labjack, usando ganancia unitaria en el amplificador de ganancia programable LTC6910. Variando los valores de esa continua, usando el modo estabilización del ensayo galvanostático, nos dimos cuenta que los valores de voltaje debían ser desplegados con décimas de mV , y que para filtrar ruido de alta frecuencia, se debía implementar un filtro por software.

Se procedió a verificar la medida de potencial del ensayo en el pulso galvanostático. Éste en particular tiene una gran complejidad en la forma de manipular la señal, en tiempo real, conmutación de llaves para cambiar la ganancia del amplificador de ganancia programable LTC, la compensación del potencial libre de corrosión, etc. Usando Matlab 7.7, fue generado un vector que simula un valor de E_{corr} , y que luego de $10s$, pasa a tener un salto óhmico y la posterior respuesta exponencial negativa. Programamos la otra Labjack U3 para que fuera actualizando el valor de uno de sus DACs desde ese vector, según un timer creado por software. Se comprobó que la compensación de E_{corr} funcionaba bien, lo que validó la manipulación de la señal de forma de ver la sobrepolarización debida a la inyección de corriente.

Validado el funcionamiento de la etapa de medida de potencial de manera global, pasamos a realizar un ensayo sistemático, para medir los errores en la medida. Para eso, se utilizó un equipo distinto al que usamos para medir la ganancia del LTC, de modo de hacer una mejor validación. Se usó la fuente de voltaje programable HP 3245A, de 14 bits de resolución[37], que se encontraba dentro de la jaula de Faraday del laboratorio docente del IIE y que es utilizada como fuente calibrada en el mismo.² Fueron generados voltajes en el rango $4mV$ hasta $650mV$, de modo tal de tener al menos dos medidas por ganancia del LTC. En la tabla 7.2, se puede apreciar los resultados de este ensayo, con el valor del voltaje generado por el HP 3245A en la primera columna, la ganancia total del software en la segunda ($G_{software} = 2G_{LTC}$, dado que el amplificador U2D es un inversor de ganancia 2), voltaje medido por MECEHA en la tercera, y errores rela-

²Agradecemos a Conrado Rossi y Pablo Mazzara.

tivos de la medida de MECEHA y de la fuente programable HP 3245A en las cuarta y quinta respectivamente. El error relativo del potencial generado fue calculado a partir de la hoja de datos de la fuente[37].

V_{IN} (V)	Ganancia software	V_{med} (V)	Error de medida (%)	Error en V_{IN} (%)
4,00E-003	201,727	4,10E-003	2,5000	0,2500
5,00E-003	201,727	5,10E-003	2,0000	0,2000
8,00E-003	201,727	8,00E-003	0,0000	0,1250
1,00E-002	101,139	1,01E-002	1,0000	0,1000
1,20E-002	101,139	1,21E-002	0,8333	0,0833
1,50E-002	101,139	1,50E-002	0,0000	0,0667
1,90E-002	101,139	1,90E-002	0,0000	0,0526
2,10E-002	39,869	2,11E-002	0,4762	0,0476
2,50E-002	39,869	2,51E-002	0,4000	0,0400
3,00E-002	39,869	3,01E-002	0,3333	0,0333
3,50E-002	39,869	3,50E-002	0,0000	0,0286
4,00E-002	39,869	4,00E-002	0,0000	0,0250
5,00E-002	19,875	5,02E-002	0,4000	0,0200
7,00E-002	19,875	7,02E-002	0,2857	0,0143
1,00E-001	9,972	1,00E-001	0,2000	0,0100
1,20E-001	9,972	1,20E-001	0,2500	0,0083
1,40E-001	9,972	1,40E-001	0,2143	0,0071
1,60E-001	9,972	1,60E-001	0,1250	0,0063
2,00E-001	3,997	2,00E-001	0,2000	0,0050
2,40E-001	3,997	2,40E-001	0,1667	0,0042
2,80E-001	3,997	2,80E-001	0,0714	0,0036
3,20E-001	3,997	3,21E-001	0,2500	0,0031
3,60E-001	3,997	3,61E-001	0,1389	0,0028
4,00E-001	3,997	4,00E-001	0,0750	0,0025
4,50E-001	3,997	4,50E-001	0,0889	0,0022
5,00E-001	1,997	5,05E-001	0,1957	0,0020
5,50E-001	1,997	5,56E-001	0,1362	0,0018
6,00E-001	1,997	6,07E-001	0,2519	0,0017
6,50E-001	1,997	6,57E-001	0,1972	0,0015

Los resultados de la tabla 7.2 pueden apreciarse en la figura 7.5. Para potenciales mayores a $8mV$ se tiene un error inferior al 1 %, lo cual valida el circuito de sensado.

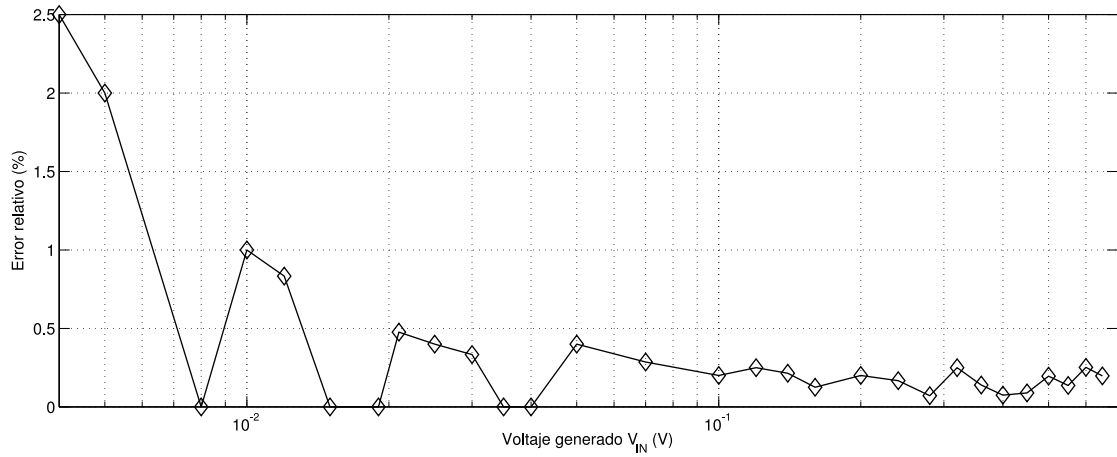


Figura 7.5: Error relativo en el voltaje medido en función del voltaje inyectado (en escala logarítmica en el eje horizontal).

7.3. Ensayo con modelo de Randle

Teniendo validadas la medida de voltaje y la generación de corriente, con errores menores al 1 % en la mayoría de los casos, se procedió a validar las medidas en hormigón. Debido a la alta complejidad del fenómeno de la corrosión, como primera aproximación, se realizaron ensayos en un circuito eléctrico que modela el mismo. Con resistencias y capacitores discretos, se armó el modelo de Randle, con valores representativos del fenómeno de la corrosión.

Para lograrlo, se comenzó eligiendo el valor de los condensadores, de forma tal que el tiempo característico fuera suficientemente largo. Los mayores capacitores que teníamos eran electrolíticos de $100\mu F$. Se colocaron dos en paralelo, para obtener una capacidad equivalente de $200\mu F$. R_P fue elegido de $12k\Omega$, que medida con el Fluke 45, da en verdad $11,845k\Omega$. Entretanto, $R_{ohm} = 8,064k\Omega$. El potencial de referencia era fijado con el DAC de otra Labjack a $300mV$, que es un valor típico para E_{corr} . La configuración puede verse en la figura 7.6.

Aplicando $5\mu A$ de corriente, en el ensayo de pulso galvanostático de MECEHA, se vio la respuesta teórica del hormigón, es decir, un salto rápido, debido a la resistencia óhmica y luego una subida exponencial debido al paralelo entre R_P y C_{dl} . La compensación de E_{corr} funcionó correctamente. El software de MECEHA calculó a partir del

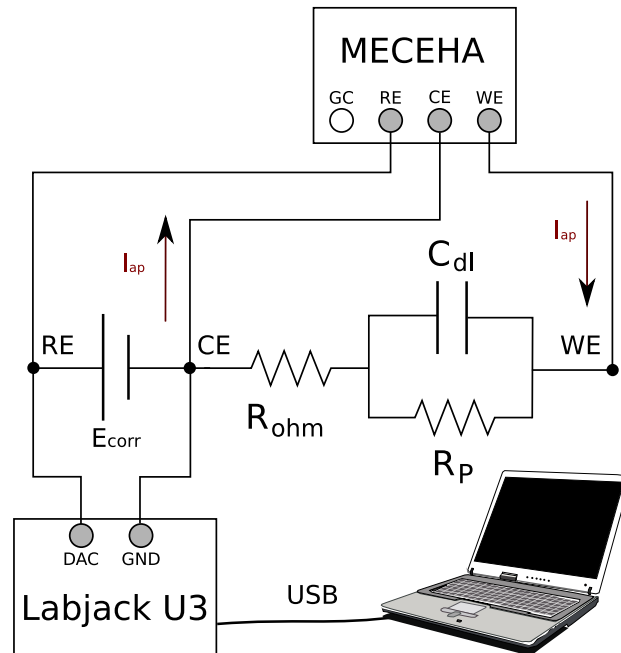
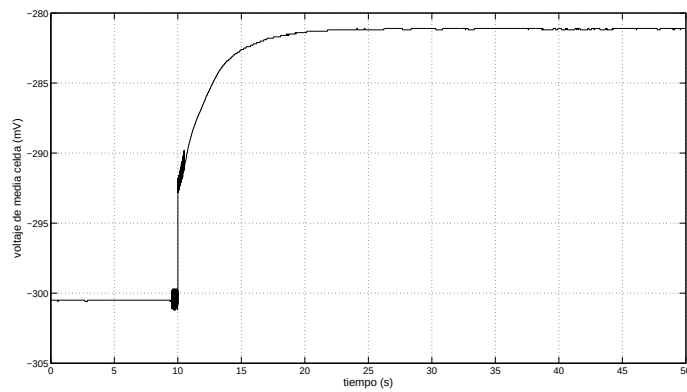


Figura 7.6: Configuración de medida de modelo de Randle

ensayo una $R_{ohm} = 8,01k\Omega$ y una $R_P = 11,956k\Omega$, lo que implica un error relativo de 0,56 % para la primera y de 0,94 % para la segunda. La respuesta en potencial puede verse en la figura 7.7.

Figura 7.7: Respuesta en voltaje a la inyección de un pulso de $1\mu A$ al modelo de Randle.

7.4. Medidas en hormigón

El objetivo de MECEHA (ver figura 7.8) es ser un aparato capaz de medir el potencial de corrosión directamente y la velocidad de corrosión indirectamente, a partir de los resultados del ensayo del pulso galvanostático. Para lograrlo, debe inyectar corriente y medir diferencias de potencial con bajo error. Estos aspectos fueron validados, como se vio en las secciones anteriores. El fenómeno de la corrosión fue modelado como una resistencia en serie con un paralelo de un condensador y otra resistencia, más una fuente de tensión constante. Se trata de un modelo lineal para un fenómeno sumamente complejo, con propiedades claramente no lineales, como la no repetitividad de la medida. La validación con el modelo de Randle tuvo como objetivo entonces realizar una medida “teórica”.

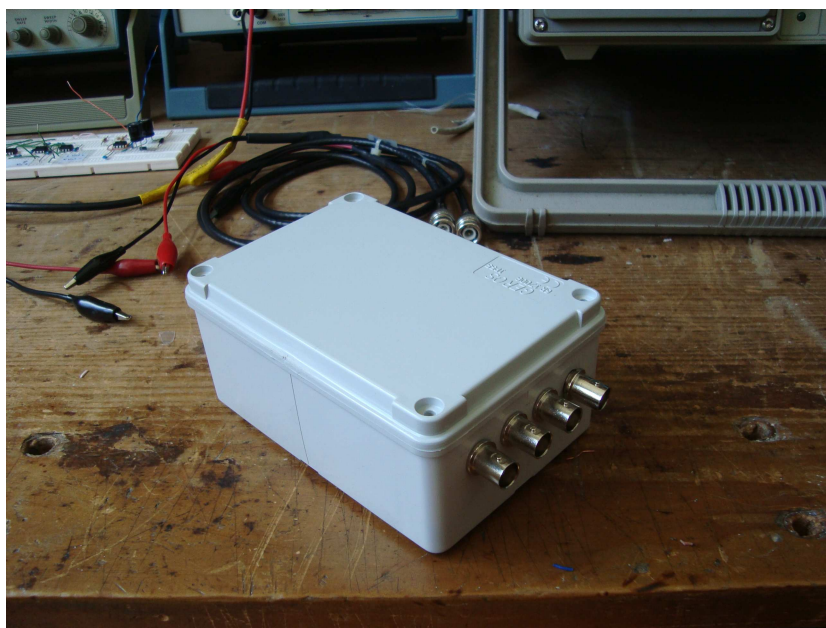


Figura 7.8: Foto de MECEHA. Se pueden apreciar los conectores BNC para los electrodos.

Puesto que MECEHA superó exitosamente todos estos ensayos, se procedió a trabajar en probetas de hormigón, preparadas hace años por nuestros clientes. Se trata de prismas macizos de hormigón, con 12 barras en su interior de 12mm de diámetro y 30cm de largo, a diferentes profundidades, como se muestra en la figura 7.9. Una de

ellas fue preparada normalmente, por lo que es de esperar poca corrosión, mientras que la otra fue preparada con sales y hormigón de mayor porosidad, por lo que es de esperarse que presente un nivel mayor de corrosión.

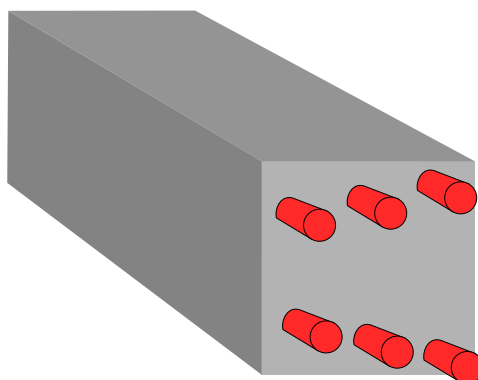


Figura 7.9: Esquema de probeta usada para medir con MECEHA.

Como primera etapa de validación con hormigón, se realizaron dos ensayos comparativos con el equipo VoltaLab 21, similares entre sí. Primero se realizó el ensayo galvanostático con el VoltaLab 21 mientras en paralelo se medía con MECEHA, el cual efectuó los mismos procedimientos que en el ensayo galvanostático pero sin inyectar corriente.

El resultado se muestra en la figura 7.10. Se puede apreciar que las curvas presentan andamios similares, aunque existe un desfase en el potencial que se mantiene a lo largo del ensayo. Éste se debe claramente al error en la medida de E_{corr} , luego de la cual dicho valor es compensado para aumentar la ganancia, y a su vez sumado a las nuevas muestras leídas de forma de restaurar la curva que se obtiene del hormigón. El error relativo correspondiente es menor a $2mV$ en $460mV$, es decir, menor al 0,5 %, lo que condice con los resultados obtenidos en la sección 7.2.

Para evaluar la medida de la curva, en la cual se utiliza una ganancia mayor luego de ser compensado el offset, se deben comparar la altura del salto inicial y el crecimiento posterior. En la figura 7.11 se equiparan los offsets iniciales de forma de poder apreciar mejor dicho andamio. A pesar de la resolución limitada del VoltaLab21, resulta clara

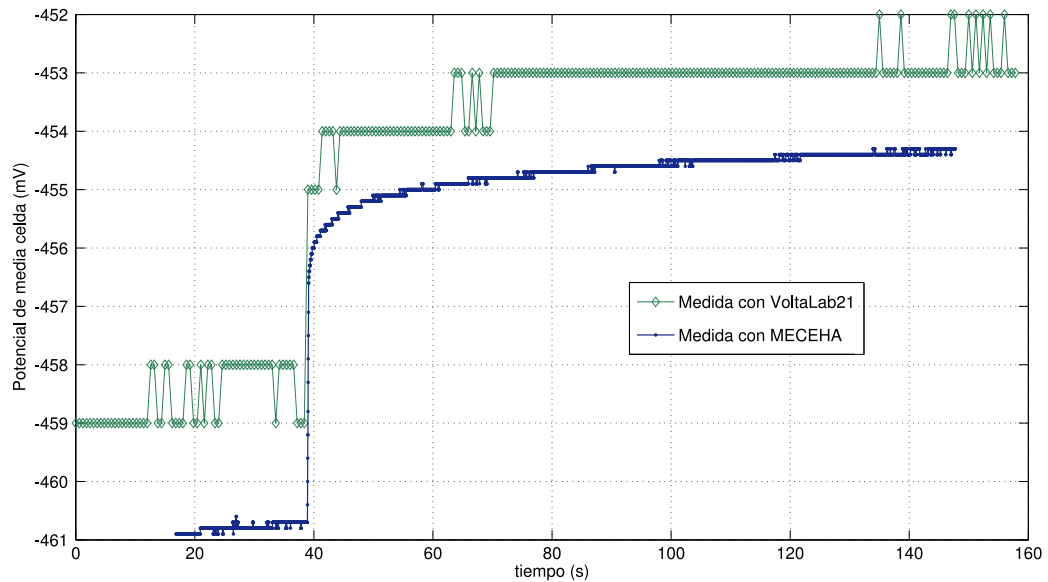


Figura 7.10: Medida conjunta VoltaLab 21 - MECEHA. En este caso, MECEHA no inyektaba corriente y VoltaLab sí.

la correspondencia entre ambas curvas.

El segundo ensayo fue a la inversa, es decir, MECEHA realizó el ensayo galvanostático mientras el VoltaLab 21 medía en paralelo el andamio del potencial. El resultado se muestra en la figura 7.12. La baja sobrepolarización alcanzada y la escasa resolución del VoltaLab dificultan la comparación en este caso. Sin embargo, cualitativamente es claro el vínculo entre las curvas, partiéndose y alcanzando los mismos valores medios.

Estos ensayos confirman básicamente dos hechos, dentro de las limitaciones del equipo de contrastación, para ensayos reales en probetas de hormigón: por un lado, que MECEHA realiza una medida correcta de potencial en un ensayo galvanostático, y por otro, que el efecto medido en un ensayo galvanostático implementado por MECEHA es correcto.

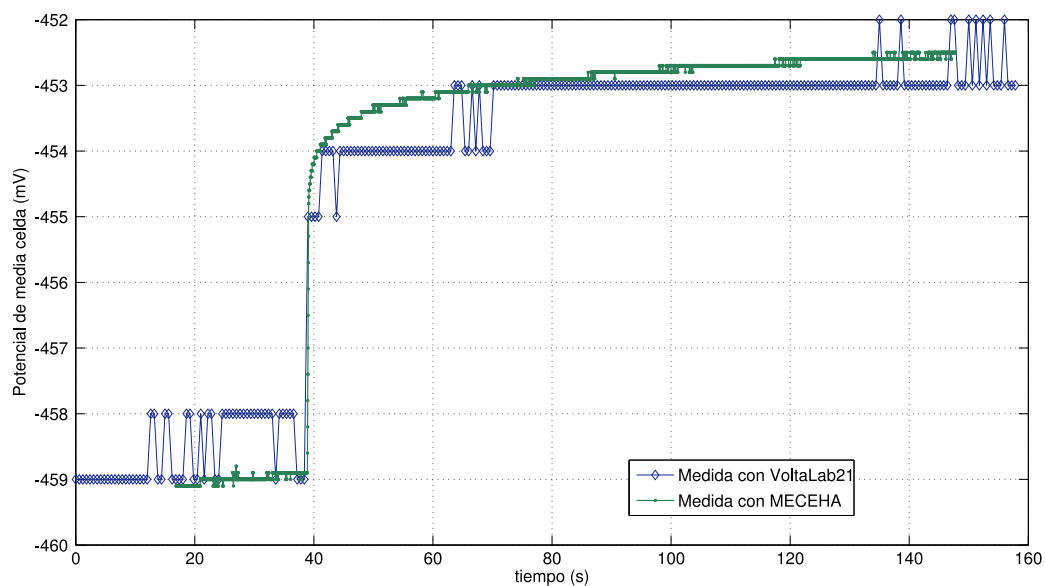


Figura 7.11: Medida del VoltaLab original y de MECEHA con su offset corregido, con el objetivo de mostrar ambas respuestas al ensayo galvanostático. Se aprecia que ambas formas de onda son muy similares.

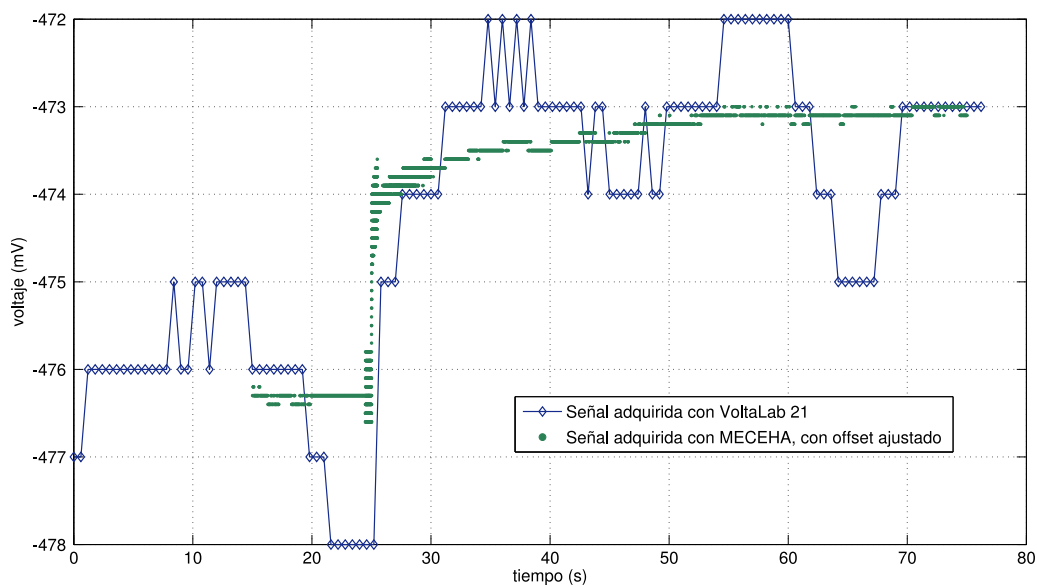


Figura 7.12: Medida de VoltaLab y MECEHA simultáneamente. MECEHA inyectaba corriente en este caso, mientras que VoltaLab 21 sólo medía la respuesta al pulso galvanostático.

Para una barra de la armadura más expuesta de la probeta con sales (figura 7.13), se hicieron tres ensayos con MECEHA y uno con el potencióstato/galvanostato VoltaLab 21. El objetivo ahora es contrastar resultados finales de los experimentos. Los ensayos con MECEHA fueron con corrientes de $50\mu A$, $100\mu A$ y $300\mu A$, mientras que con VoltaLab 21 se realizó el ensayo potencióstático que habitualmente realizan nuestros clientes. Los resultados se pueden ver en la tabla 7.4.

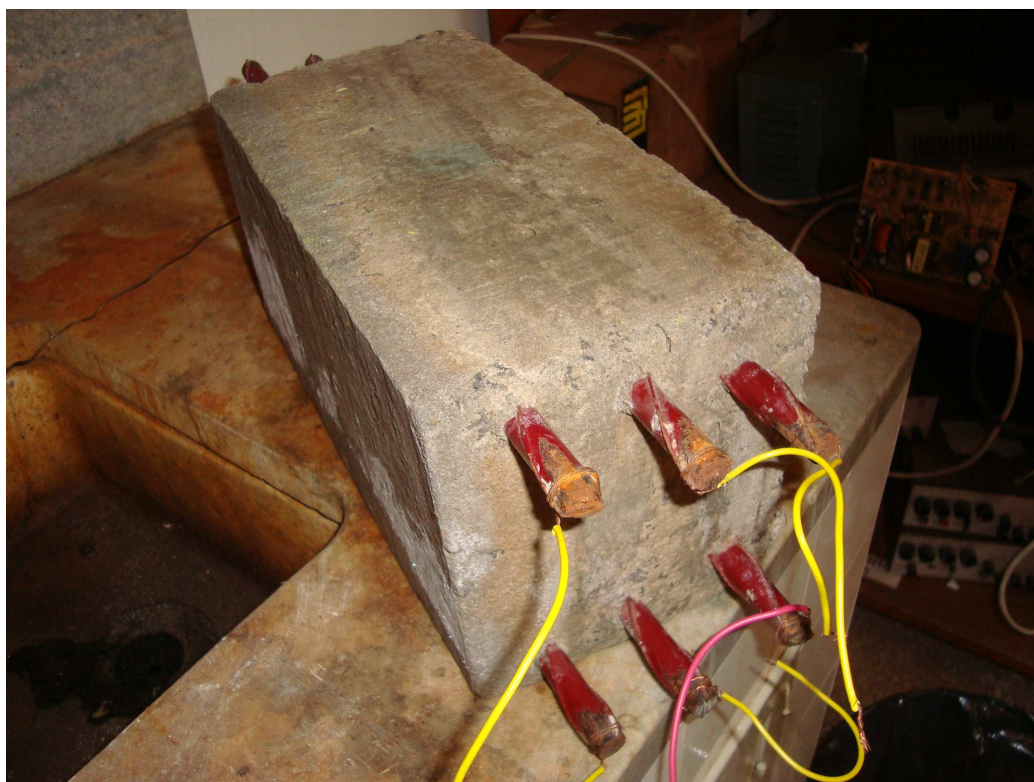


Figura 7.13: Foto de probeta preparada con sal (corroída).

Ensayo	Sobrepolarización	$R_{ohm} (\Omega)$	$R_P (\Omega)$	$i_{corr} (\mu A/cm^2)$	Corrosión
Potenciostático VoltaLab	$10mV$	41	14	34	Muy alta
MECEHA $50\mu A$	$3,3mV$	42	24	19	Muy alta
MECEHA $100\mu A$	$5,9mV$	40	19	24	Muy alta
MECEHA $300\mu A$	$13,3mV$	31	13	35	Muy alta

Los resultados de los ensayos galvanostáticos concuerdan con el potencióstático realizado con el VoltaLab 21. Los valores de i_{corr} son muy cercanos en la escala logarítmica

que se usa para distinguir la velocidad de corrosión, y en todos los casos implican corrosión muy alta. Se observa un error de sólo 1Ω para la mayor corriente, que fue la que generó un sobrepotencial algo mayor que los $10mV$ del ensayo potencioestático.

Esta contrastación de resultados valida que MECEHA funciona bien como sistema, desde el punto de vista del usuario. Se desarrolló un equipo que realiza ensayos cuyos resultados son corroborados por otro ensayo de otro equipo. De todos modos, para validar completamente al sistema es necesario realizar muchas más medidas. Esto mismo sucede para los equipos comerciales, como Galvapulse y Gecor, que todavía siguen siendo validados por equipos de ingenieros que realizan medidas con ellos y las contrastan, publicando sus resultados en publicaciones arbitradas. Se trata de un largo proceso que deberá seguir también MECEHA, a pesar de que las contrastaciones ya realizadas muestran resultados ampliamente satisfactorios, tanto para el equipo de proyecto como para los clientes.

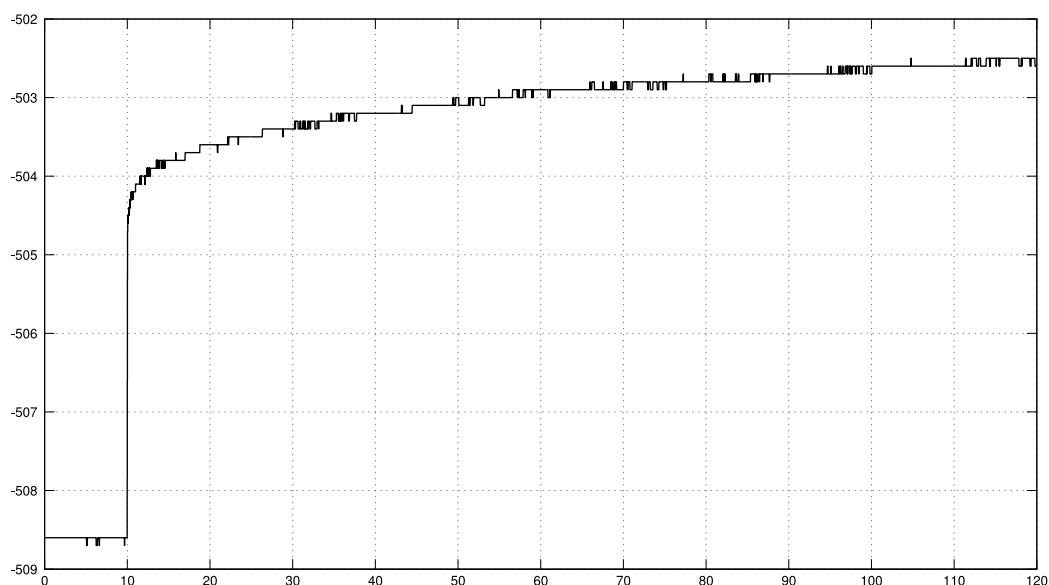


Figura 7.14: Respuesta de potencial a un pulso de corriente de $100\mu A$ de una barra con poco recubrimiento y alta corrosión.

Conceptualmente, las barras más profundas van a presentar una mayor resistencia óhmica, debido a que tienen un mayor recubrimiento de hormigón. Por otro lado, la probeta con barras más corroídas tiene que presentar una resistividad menor (al estar

preparado con sal, el hormigón es más conductor) y una resistencia de polarización R_P menor también (la intensidad de corrosión es inversamente proporcional a R_P).

Veamos el ensayo a una probeta menos corroída, usando una barra con el mismo recubrimiento (figuras 7.16 y 7.15). Aplicando una corriente de $5\mu A$, se obtuvo la curva mostrada en la figura 7.17. Se partió de un potencial de corrosión $E_{corr} = 412,6mV$, y obtuvimos una sobrepolarización de $5mV$. Calculando R_{ohm} y R_P con MECEHA, se obtiene:

- $R_{ohm} = 375\Omega$
- $R_P = 675\Omega$
- $i_{corr} = 0,68\mu A/cm^2$

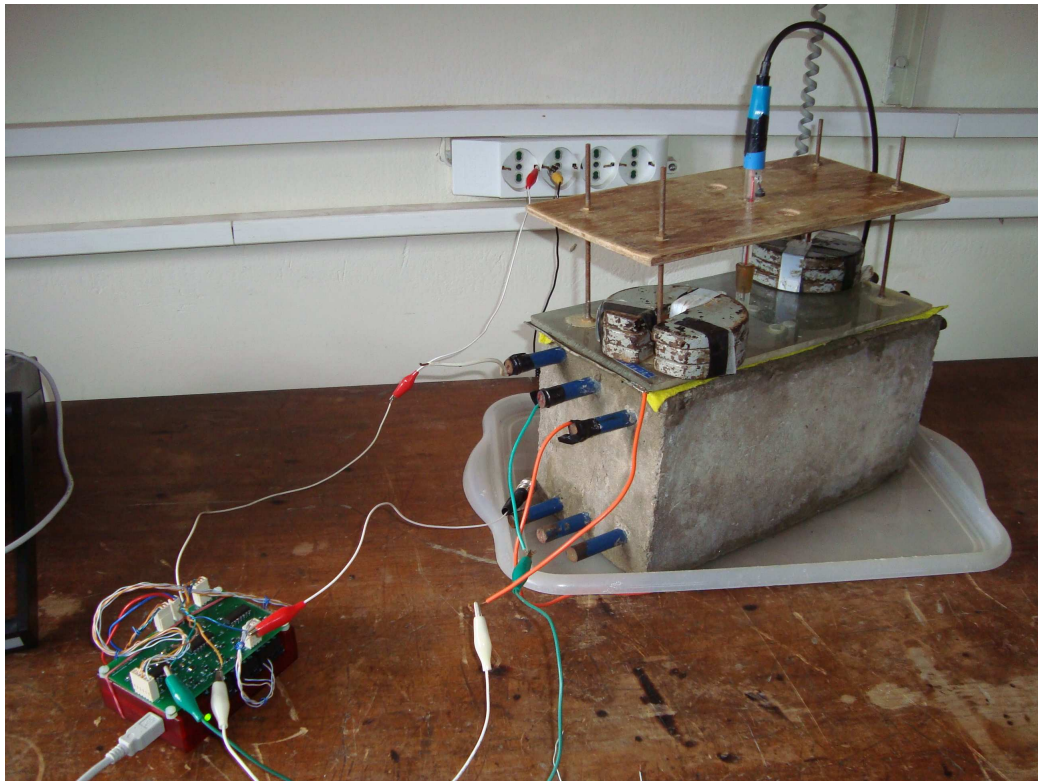


Figura 7.15: Foto de ensayo con la probeta menos corroída.



Figura 7.16: Foto de probeta poco corroída (preparada normalmente).

Es decir que esta barra tiene un nivel de corrosión moderado, más bien bajo. Este resultado es coherente, dado que se midió la barra con menor recubrimiento. A pesar de no estar expuesta al ambiente, ha sido usada para medir, o sea que ha sido sumergida en agua muchas veces durante largo tiempo, lo que acelera la corrosión.

Finalmente, se probó cualitativamente el funcionamiento de la guarda de confinamiento. Dado que este ensayo fue realizado en probetas, con poca superficie, la diferencia no es la misma que se debería notar a la hora de hacer ensayos con estructuras reales, que tienen armaduras más complejas y de mayor envergadura. Se probó usar el mismo electrodo con y sin confinamiento, para la misma barra y corriente, obteniendo resultados como los mostrados en la figura 7.18.

Como se aprecia en la figura 7.18, el salto óhmico es mucho mayor cuando aplicamos confinamiento. Eso se debe a que la resistencia óhmica R_{ohm} , tal como fue modelada en el capítulo de Especificación 3, es inversamente proporcional al área superficial por la que pasa la corriente. O sea que, si al confinar reducimos esa área, la resistencia óhmica

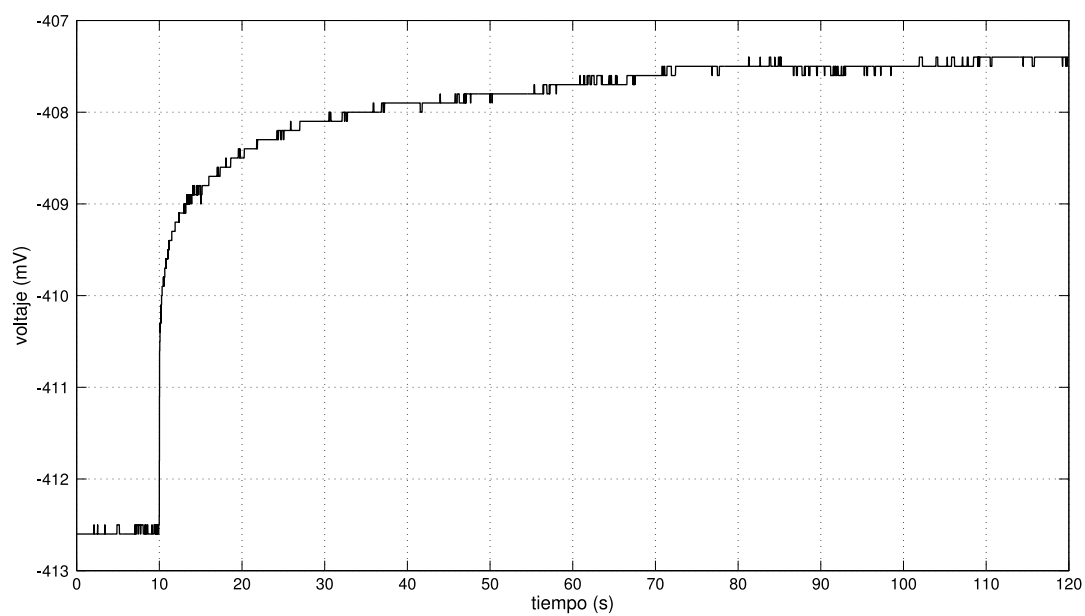


Figura 7.17: Respuesta de potencial a un pulso de corriente de $5\mu A$ de una barra con poco recubrimiento y con poca corrosión.

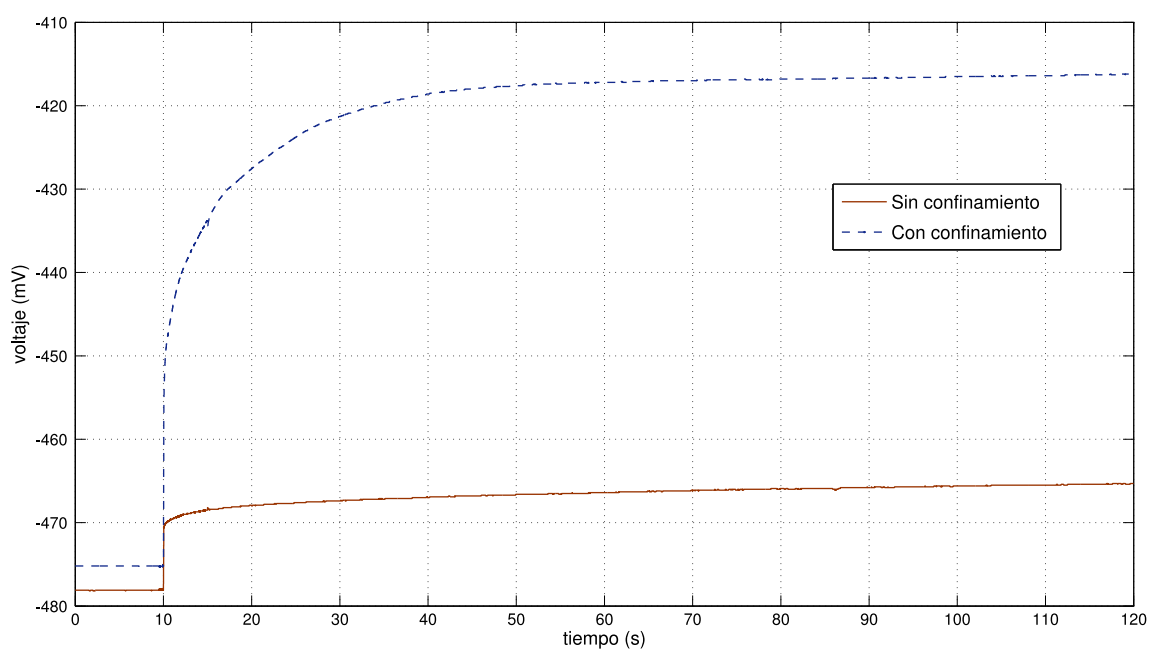


Figura 7.18: Respuesta al pulso galvanostático de $15\mu A$, con y sin confinamiento de corriente.

aumenta, que es lo que sucede con la medida realizada en la figura 7.18.

Capítulo 8

Costo

El proyecto MECEHA requirió un año de trabajo de un equipo de tres estudiantes de ingeniería eléctrica, además de la colaboración de dos ingenieros civiles y la tutoría de un ingeniero eléctrico. En materia económica, según se detalla en el apéndice B, el proyecto insumió unos 957USD, aunque esto cuenta la compra redundante de componentes por posibles errores. Si nos ajustamos estrictamente a lo necesario, realizar otro ejemplar de MECEHA, costaría 449USD aproximadamente, discriminados según la siguiente lista¹:

- Labjack U3 -LV: 130USD
- Circuito impreso: 150USD
- Componentes electrónicos: 130USD
- Caja de plástico: 7USD
- Conectores: 5USD
- Terminales BNC: 12USD
- Cable: 15USD

Los costos de soldado de componentes y ensamblado no están considerados ni tampoco el costo de comprar un electrodo de referencia (aproximadamente 130USD).

¹Se redondearon los precios, debido a que los mismos deben incluir los costos de envío, que varían según la modalidad de compra.

Capítulo 9

Conclusiones y Perspectivas

El proyecto Medidor Electrónico de la Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado ha logrado cumplir con sus objetivos de forma satisfactoria, implementando tres ensayos que permiten caracterizar, cualitativa y cuantitativamente la corrosión de estructuras reales.

El estudio del fenómeno de la corrosión, como se ha mencionado, tiene una gran importancia para la intervención temprana en casos patológicos, y también para el diseño de nuevas estructuras.

Es un área en continuo desarrollo gracias a los adelantos en la electrónica y el procesamiento de señales. Sin embargo, la complejidad de los ensayos que se realizan, y los múltiples factores que inciden en los resultados, hacen que éstos se presenten con gran variabilidad cuantitativa. A su vez, el efecto que estos ensayos tienen sobre la estructura estudiada resultan en que sean poco repetibles, lo que dificulta la contrastación entre diferentes métodos de medida y propicia la existencia de diferentes interpretaciones de los resultados dependiendo de la academia. Esto se ve claramente en las discordancias entre los artículos científicos que abordan el tema, existiendo incluso conclusiones contrarias respecto a la validez de los distintos métodos de medida.

Lo anterior dificultó especialmente la elaboración de la especificación del proyecto MECEHA, la que incluso debió modificarse en el transcurso del proyecto debido a que

no había experiencia en el país sobre la implementación del ensayo galvanostático, y no era directa la correspondencia entre éste y el ensayo que era realizado por nuestro cliente.

De acuerdo a las especificaciones finales, la electrónica de MECEHA se diseñó a medida para las señales involucradas, debido a la alta precisión requerida tratándose de magnitudes muy pequeñas. A su vez, la diversidad de situaciones posibles a la hora de medir corrosión en estructuras reales implicó que MECEHA tuviera que ser diseñado para tener buena precisión en diferentes órdenes de magnitud tanto en medida de voltaje como en generación de corriente.

La precisión y operación eléctrica de MECEHA fue corroborada en primer lugar evaluando los parámetros eléctricos (medida de potencial y generación de corriente) con instrumentos de laboratorio. La estrategia de medición del sistema se validó utilizando un modelo eléctrico teórico de la corrosión del hormigón armado, con valores representativos de forma de conocer con precisión los resultados a ser provistos por MECEHA sin la variabilidad que se obtiene en medidas en hormigón. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios de acuerdo a las especificaciones.

Además, se dieron los primeros pasos en la validación del equipo como instrumento de medida respecto a su objetivo final, que es la medida de corrosión en probetas de hormigón y estructuras. En esta dirección, se lograron obtener resultados análogos a los publicados en la bibliografía con respecto al ensayo galvanostático, y se obtuvieron resultados concordantes con los del equipo previamente usado por nuestro cliente.

Debido a la mencionada complejidad característica del fenómeno, la validación final de MECEHA como instrumento de medida es un largo proceso que implica un gran número de ensayos por parte de los expertos, como lo muestra la trayectoria de equipos ya establecidos en el mercado.

El confinamiento espacial de la corriente, fundamental para realizar medidas en estructuras, ha sido un desafío especial de MECEHA por ser su técnica una novedad teóri-

ca y práctica para los actores involucrados en el proyecto. También presenta un desafío particular la validación del funcionamiento de esta característica, por depender de la disposición geométrica tanto de los electrodos como de la estructura de hormigón y de la distribución de la corriente eléctrica a través de éste. Si bien los primeros resultados parecen ser satisfactorios, la validación completa debe ser estudiada más a fondo, y se estima nuevamente que su utilización por parte de los expertos es una herramienta fundamental para determinar el efecto de la técnica de confinamiento de MECEHA.

Finalmente, en cuanto a los objetivos formales del proyecto podemos concluir lo siguiente:

- Se estudió la teoría de la corrosión en hormigón armado y el modelado eléctrico de este fenómeno. Se investigaron también las distintas técnicas y estrategias de medición de corrosión y confinamiento y la instrumentación necesaria para efectuar las medidas. Además, se analizaron las prestaciones de algunos equipos actualmente en el mercado que realizan medidas de corrosión y las técnicas de medición que utilizan.
- Se desarrolló e incorporó software y hardware para formar un sistema completo capaz de ser comandado por el usuario para realizar medidas de corrosión y velocidad de corrosión en probetas y en estructuras.
- El sistema desarrollado cumple con las metas de ser portable, de fácil uso y de realizar las medidas deseadas por el cliente. Además, realiza medidas en un rango que abarca todas las posibilidades esperadas para medidas de corrosión en hormigón armado, y la precisión alcanzada cumple con los objetivos planteados. En cuanto a portabilidad, usabilidad y precisión, el sistema desarrollado supera al equipo utilizado previamente por nuestro cliente, cumpliéndose el objetivo del mismo con este proyecto de obtener un equipo más moderno y de mejores prestaciones.
- El proyecto se completó dentro de las limitantes de dinero y tiempo. Los costos se distribuyeron en la compra de la placa Labjack, en la fabricación del circuito impreso de manejo de señales y generación de corriente y en la compra de componentes. El tiempo se distribuyó en el estudio del problema, la especificación,

el desarrollo del sistema (software y hardware), testing de módulos, testing del sistema y medidas en probetas de hormigón para validación del sistema.

Como conclusión final queremos destacar que este proyecto fue un desarrollo conjunto e interdisciplinario de diferentes ramas de la ingeniería y una colaboración mutua entre el Instituto de Ingeniería Eléctrica y el Instituto de Estructuras y Transporte. El producto de esta colaboración ha sido el primer desarrollo a nivel nacional de un medidor de corrosión de estructuras en campo para la investigación. Es el deseo de los estudiantes del equipo de MECEHA que esta colaboración se refuerce en el futuro para producir nuevos adelantos.

Bibliografía

- [1] J. J. B. V.S. Ramachandran, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications*. 2000.
- [2] S. F. Carmen Andrade, *Corrosión y protecciones metálicas*, vol. 1. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [3] C. A. Carmen Andrade, “Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site,” *Construction and Building Materials*, vol. 10, pp. 315–328, 1996.
- [4] V. S. Ha-Won Song, “Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review,” *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 2, pp. 1–28, 2007.
- [5] James Instruments Inc, *The GECOR8 Corrosion Rate Meter, Instruction Manual*, second ed., 2002.
- [6] B. E. R. Polder, C. Andrade, “RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete,” *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, vol. 33, pp. 603–611, 2000.
- [7] José A. González, *Métodos electroquímicos de estudio de la corrosión. En: Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*. 1984.
- [8] Marcel Pourbaix, *Lecciones de corrosión electroquímica, capítulo 4: Equilibrios electroquímicos*. tercera ed., 1987.
- [9] A. M.F. Montemor, “Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques,” *Cement and Concrete Composites - Concrete Durability*, vol. 25, no. 4-5, pp. 491–502, 2003.

-
- [10] C. A. I. Martinez, "Advances in the corrosion rate monitoring in real structures," *Proceedings of the 1st fib Congress*, pp. 223–232, 2001. Madrid, España.
- [11] Nicholas Carino, "Nondestructive techniques to investigate corrosion status in concrete structures," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 13, no. 3, pp. 96–106, 1999.
- [12] S. F. J. S. Feliu, J.A. González, "Confinement of the Electrical Signal for In Situ Measurement of Polarization Resistance in Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, pp. 457–460, 1990.
- [13] Tang Luping, "Calibration of the Electrochemical Methods for the Corrosion Rate Measurement of Steel in Concrete," nordtest project no. 1531-01, SP Swedish National Testing and Research Institute, 2002.
- [14] Gamry Instruments, "Understanding iR Compensation." http://www.gamry.com/App_Notes/Understanding_IR_Compensation/Understanding_IR_Compensation.do I need IR.
- [15] M. R. G. . B. E. Peter V. Nygaard, "Corrosion rate of steel in concrete: evaluation of confinement techniques for on-site corrosion rate measurements," *Materials and Structures*, vol. 42, pp. 1059–1076, 2009.
- [16] Sitio web oficial de Geotecnia y Cimientos S.A. www.geocisa.com/home.html.
- [17] Sitio web oficial de James Instruments Inc. www.ndtjames.com.
- [18] Sebastián Feliú et al, "Corrosion detecting probes for use with a corrosion-rate meter for electrochemically determining the corrosion rate of reinforced concrete structures," *United States Patent and Trademark Office*, 1993. Número de patente: 5,259,944.
- [19] James Instruments Inc, www.ndtjames.com/spanish/pdfs/Gecor-6.pdf, *Manual Gecor 6*.
- [20] "GalvaPulse," tech. rep., Germann Instruments A/S.

-
- [21] Radiometer Analytical, “VoltaLab Electrochemical Research Equipment.” http://www.radiometer-analytical.com/forms/all_down.asp?lien=pdf/voltalab/voltalab_catalogue_en.pdf&loc=p1.
- [22] J. R. M. D.Ñieves Mendoza, F. Almeraya-Calderón, “Guard Ring and Electrochemical Noise Employment in the Evaluation of the Steel-Concrete System,” *Portugaliae Electrochimica Acta*, no. 22, pp. 305–320, 2004.
- [23] M. E. J. González, A. Molina, “Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates - I. Polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete,” *Corrosion science*, vol. 25, no. 10, pp. 917–930, 1985.
- [24] “Norma RILEM TC - 154 EMC,” tech. rep., International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM, en francés).
- [25] HobbyLab, “PC USB Oscilloscope DiSco.” <http://www.hobbylab.us>.
- [26] Novatek, “DSO-2090 USB Digital Storage Oscilloscope.” <http://www.usb-instruments.cn/Oscilloscope.htm>.
- [27] USB Instruments, “DS1M12 ”Stingray”2+1 Channel PC Digital Oscilloscope / Logger.” http://www.usb-instruments.com/oscillo_stingray.html.
- [28] Texas Instruments, “TMS320F28027 Piccolo Microcontroller.” <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/tms320f28027.html>.
- [29] Wikipedia, “Arduino.” <http://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>.
- [30] Labjack Corporation, *Labjack U3 Users Guide*, 2008.
- [31] Maxim, *Hoja de datos de MAX4636 CMOS Analog Switches*, 2003.
- [32] John Sharp, *Microsoft Visual C# 2008 Step by step*. Microsoft Press, 2008.
- [33] “Standard ECMA-334 C# Language Specification,” tech. rep., ECMA International, 2006.

- [34] Diodes incorporated, *Hoja de datos de BSS84, Dual p-channel enhancement mode field effect transistor*, 2007.
- [35] National Semiconductor, *Hoja de datos de LMC6484 CMOS Quad Rail-to-Rail Input and Output Operational Amplifier*, 1996.
- [36] Fluke Corporation, *Fluke 45 Users Manual*, 1999.
- [37] Hewlett Packard, *HP 3245 Universal Source Manual*.

Apéndice A

Código de la rutina de cálculo de errores

```
%%% INCERTIDUMBRE EN LA CORRIENTE %%%  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Rango de corriente i = 0.2uA ... 6.6 uA  
clc  
clear all  
close all  
Vdac = [40e-3,4.95];  
Vup = -47*(4.5/86.6+Vdac/115);  
Vee = -4.514*ones(size(Vup));  
 $\Delta V$  = Vup-Vee;  
  
R1 = 5.76e3;  
  
v1=  $\Delta V(2):2e-3:\Delta V(1)$ ; %Vamos desde la  
%ca\ida de potencial m\inima a la m\axima  
 $\Delta_v1$  = 0.003; %4mV de offset en cada operacional (2)  
%+ 2mV de cuantizaci\on  
i1 = v1/R1;
```

```

Δ_R1 = 26; %como en cuenta el 0.1% de la resistencia
%y un peor caso de 20Ohms en la llave nmos
Δ_i1_v1 =(Δ_v1/R1);
Δ_i1 = sqrt(Δ_i1_v1.^2 + (v1*Δ_R1/(R1^2)).^2);

plot(v1, Δ_i1, '*');
TITLE('Error Absoluto en la corriente');
xlabel('Voltaje (V)');
%e_i1_sinR = 100*Δ_i1_v1 ./ i1;
e_i1 = 100*Δ_i1 ./ i1;

figure

plot(v1, e_i1, '.');
TITLE('Error Relativo en la corriente (%). Rango de R1 = 6kOhms');
grid on
xlabel('Voltaje (V)');

%%%%%%Rango de Corriente i = 6.6uA ... 40 uA

v2 = v1;
R2 = 40.2e3;
i2 = v2/R2;

Δ_v2 = 0.004; %mV de offset en cada operacional (2)
%+ 2mV de cuantizaci\on

Δ_R2 = 60; %como en cuenta el 0.1% de la resistencia
%y un peor caso de 20Ohms en la llave nmos
%Δ_i2_v2 =(Δ_v2/R2);
Δ_i2 = sqrt((Δ_v2/R2)^2 + (v2*Δ_R2/(R2^2)).^2);

figure

```



```

plot(v2, Δ_i2, '*');
TITLE('Error Absoluto en la corriente');
grid on
xlabel('Voltaje (V)');

e_i2 = 100*Δ_i2 ./ i2;
%e_i2_sinR = 100*Δ_i2_v2 ./ i2;
figure

plot(v2, e_i2, '.');
TITLE('Error Relativo en la corriente (%). Rango de R2 = 40kOhms');
xlabel('Voltaje (V)');

%%%%%%Rango de corriente i = 40uA ... 250 uA

v3 = v1;
R3 = 240e3;
i3 = v3/R3;

Δ_v3 = 0.004; %4mV de offset en cada operacional (2)
%+ 2mV de cuantizaci\on
Δ_R3 = 260; %como en cuenta el 0.1% de la resistencia
%y un peor caso de 100 Ohms en la llave pmos
Δ_i3_v3 =(Δ_v3/R3);
Δ_i3 = sqrt((Δ_v3/R3)^2 + (v3*Δ_R3/(R3^2)).^2);

figure

plot(v3, Δ_i3, '*');
TITLE('Error Absoluto en la corriente');
xlabel('Voltaje (V)');
%e_i3_sinR = 100*Δ_i3_v3 ./ i3;
e_i3 = 100*Δ_i3 ./ i3;

```

figure

```

plot(v3, e_i3, '.');
TITLE('Error Relativo en la corriente (%). Rango de R3 = 240kOhms');
grid on
xlabel('Voltaje (V)');
k3=find(i3 ≥ 3e−7);
k33 = k3(1);
k=1;
bandera=1;
while bandera
    Iposta(k)=i3(k33);
    eposta(k)=e_i3(k33);
    k=k+1;
    k33 = k33+1;
    if k33>length(i3)
        bandera = 0;
    end
end
i3final=i3(length(i3));
k2=find(i2 ≥ i3final);
k22=k2(1);
bandera = 1;
while bandera
    Iposta(k)=i2(k22);
    eposta(k)=e_i2(k22);
    k=k+1;
    k22 = k22+1;
    if k22>length(i2)
        bandera = 0;
    end
end
i2final=i2(length(i2));

```

```
k1=find(i1 ≥ i2 final );
k11=k1(1);
bandera = 1;
while bandera
    Iposta(k)=i1(k11);
    eposta(k)=e_i1(k11);
    k=k+1;
    k11 = k11+1;
    if k11>length(i1)
        bandera = 0;
    end
end

figure
semilogx(Iposta , eposta , 'k* ')
grid on
ylabel('Error relativo total (%)')
xlabel('corriente (A)')
```

Apéndice B

Costo del proyecto

Debido a que este proyecto es de instrumentación y medida, muy finas, se debió proceder a la importación de componentes de los Estados Unidos. El principal proveedor fue Digikey Corp ¹, donde se compraron los componentes discretos, como operacionales, resistencias, capacitores, llaves, amplificadores. La elección se debió a que esta empresa tiene un gran stock, información actualizada y de buena calidad. Asimismo, muchos docentes de Facultad ya lo han usado como proveedor y dan una evaluación positiva, lo que implica que se trata de un proveedor confiable.

Las compras en Digikey se hicieron en dos tandas, totalizando un total de 252USD, tal como se detalla en las siguientes tablas.

Item	Cantidad	Precio (USD)
Amplificador de ganancia programable LTC 6910	6	16.62
Llave MAX889	3	17.58
Operacional LMC6484	6	23.28
Resistencia $10k\Omega$	15	10.64
Capacitor $10\mu F$	4	2.72
Llave nMOS BSS138	20	3.60
Gastos de envío	UPS	10.55
Gastos de envío	Miami-Box	8
Total		88.75

¹Digikey Corporation: www.digikey.com.

Item	Cantidad	Precio (USD)
Capacitor $0,01\mu F$	30	3.03
Capacitor $10\mu F$	20	4.68
Capacitor $1nF$	20	2.02
Capacitor $1\mu F$	30	8.43
Capacitor $2,2\mu F$	10	3.95
Llave nMOS BSS138	20	3.60
Llave pMOS BSS84	25	6.20
Llave CMOS MAX4636	4	11.04
Regulador LT1964	3	9.75
Regulador LT1962	5	17.50
Resistencia $100k\Omega$	20	4.08
Resistencia $10k\Omega$	30	5.25
Resistencia $120k\Omega$	10	8.66
Resistencia $115k\Omega$	10	5.49
Resistencia $1M\Omega$	20	10.56
Resistencia $20k\Omega$	10	8.66
Resistencia $240k\Omega$	10	2.04
Resistencia $27k\Omega$	10	2.04
Resistencia $3k\Omega$	10	3.15
Resistencia $40,2k\Omega$	10	6.56
Resistencia $47k\Omega$	10	2.04
Resistencia $5,76k\Omega$	10	5.49
Resistencia $86,6k\Omega$	10	5.49
Resistencia $1,3M\Omega$	10	0.38
Resistencia $16,9k\Omega$	10	0.38
Transistor npn BC847C	10	2.99
Diodo Zener	10	0.38
Gastos de envío	UPS	16.11
Gastos de envío	Miami-Box	9
Total		162.59

Las otras compras importantes del proyecto fueron la adquisición de dos tarjetas de adquisición y control Labjack U3 -LV, cuyo costo fue de 250USD aproximadamente (contando gastos de envío) y los circuitos impresos, adquiridos a través de la empresa CCC, por unos 355USD².

Se realizaron otras compras menores en plaza, como:

- 3m de cable UTP (para obtener cables para el conexionado): \$80
- 4 terminales BNC: \$290
- conectores Molex: \$60
- pulsera antiestática: \$320
- 2 cajas de plástico 130 x 90 x 60mm: \$140
- Terminal de Cargas: \$1,255

Totalizando unos 100USD. Los despachos de Aduana fueron realizados por los integrantes del equipo de proyecto, lo que ahorró más de 300USD.

En total, el proyecto costó 956.35USD, que es menos del presupuesto máximo disponible (poco más de 1.000USD).

²En primera instancia se pensó en comprar los PCB en Plaka, pero los plazos de entrega de esta empresa (4 semanas) eran demasiado largos para los tiempos del proyecto.

Apéndice C

Diseño alternativo de la electrónica de la etapa de I/O

Se realizó un diseño alternativo de la electrónica, que funcionaba entre 0 y 5V, suministrados por la Labjack U3 -LV. La dificultad de realizar medidas de campo es que por ejemplo, no se sabe a qué potencial está la armadura con respecto a tierra. Esto ocasionaría en esta configuración, que la señal no quedara en el rango admisible de las entradas analógicas de Labjack, por lo que tuvo que descartarse esta alternativa. En verdad, este diseño funcionaría si MECEHA midiera flotando, pero esto puede agregar ruido. De todos modos, dado que fue parte del desarrollo del proyecto, consideramos interesante mostrarla, sin entrar en los detalles técnicos.

C.1. Circuito de sensado

En la figura C.1, se puede apreciar el esquemático de una configuración alternativa para implementar el circuito de sensado. Dado que se medía el voltaje sin conexión a la red, los electrodos de referencia y de trabajo se encontraban flotando. La primera etapa del circuito de sensado consiste por tanto, básicamente en un amplificador de instrumentación clásico, con polos pasabajos para eliminar el ruido de alta frecuencia. Esta etapa era seguida por el amplificador de ganancia programable LTC6910, cuya ganancia era comandada directamente por los pines DO6, DO7 Y DO8 de la Labjack. Luego,

se medía el potencial en AIN-1, restando la mitad del rango máximo (para quitar offset).

Al igual que en la versión definitiva, se implementaba la compensación de E_{corr} , usando una configuración no inversora (amplificador U2A) para el DAC2 de Labjack y comandando la llave U4B.

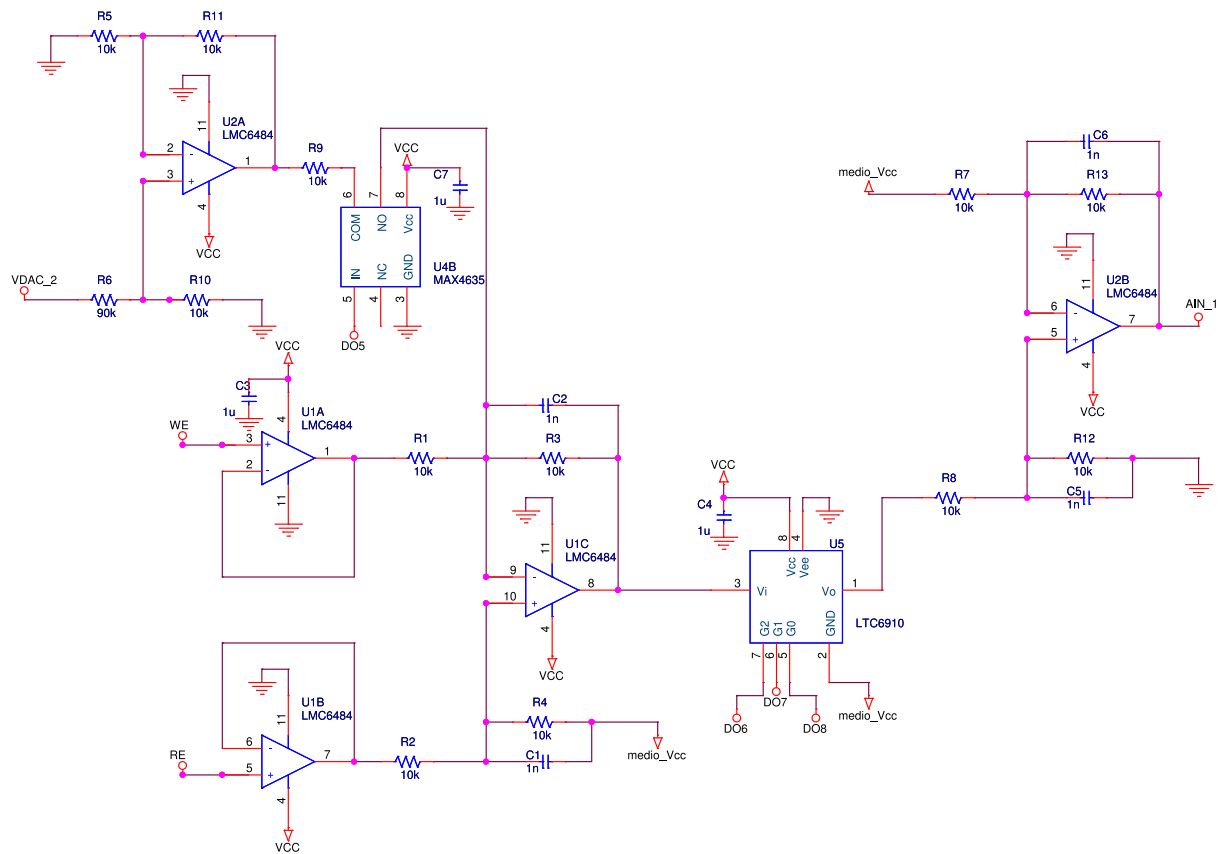


Figura C.1: Diseño alternativo del circuito de sensado.

C.2. Fuente de corriente

En la figura C.2 es el esquemático del diseño de la fuente de corriente. Esta es programable mediante el voltaje impuesto por el DAC-1 de la LabJack, mediante un divisor de resistencias de $100k\Omega$, de modo de consumir poca potencia del DAC. Las resistencias

R14, R15, R16 son los transductores de tensión a corriente, y tienen un error menor al 0,1 %, permitiendo cubrir en tres rangos, corrientes desde $0,2\mu A$ hasta $250\mu A$, con un error menor al 1 % en corrientes mayores al μA .

Al igual que en el diseño definitivo, se usan transistores bipolares, en configuración Darlington, aunque en este caso son pnp, de modo de tener un mayor β efectivo y perder menos corriente en la base de los mismos. La corriente es fijada por la diferencia de potencial entre un voltaje que es la mitad del valor del DAC y V_{CC} . Inicialmente, la llave U4A, comandada con la salida DO1 de Labjack, hace que la corriente establecida circule directamente a tierra (pin NC: Normal Closed). Esto se hace para que al hormigón no ingresen picos de corriente debidos al transitorio del encendido de la fuente. Luego de llegado al régimen (pocos ms después), la llave conmuta, dirigiendo la corriente al hormigón, comenzando el ensayo. En este caso, el contraelectrodo es fijado a un potencial arbitrario de 1V (valor intermedio en el rango de excursión de las entradas analógicas de Labjack: 0 a 2,44V).

Se realizaron simulaciones en OrCAD, para comprobar el diseño realizado, que resultaron satisfactorias. Por lo tanto, se diseñó el circuito impreso (ver figura C.3) e incluso se pidió cotización a Plaka¹, que es una empresa nacional que realiza PCB doble capa y vías metalizadas, con máscara antisoldante.

¹Plaka es una división de Eneka: www.eneka.com.uy.

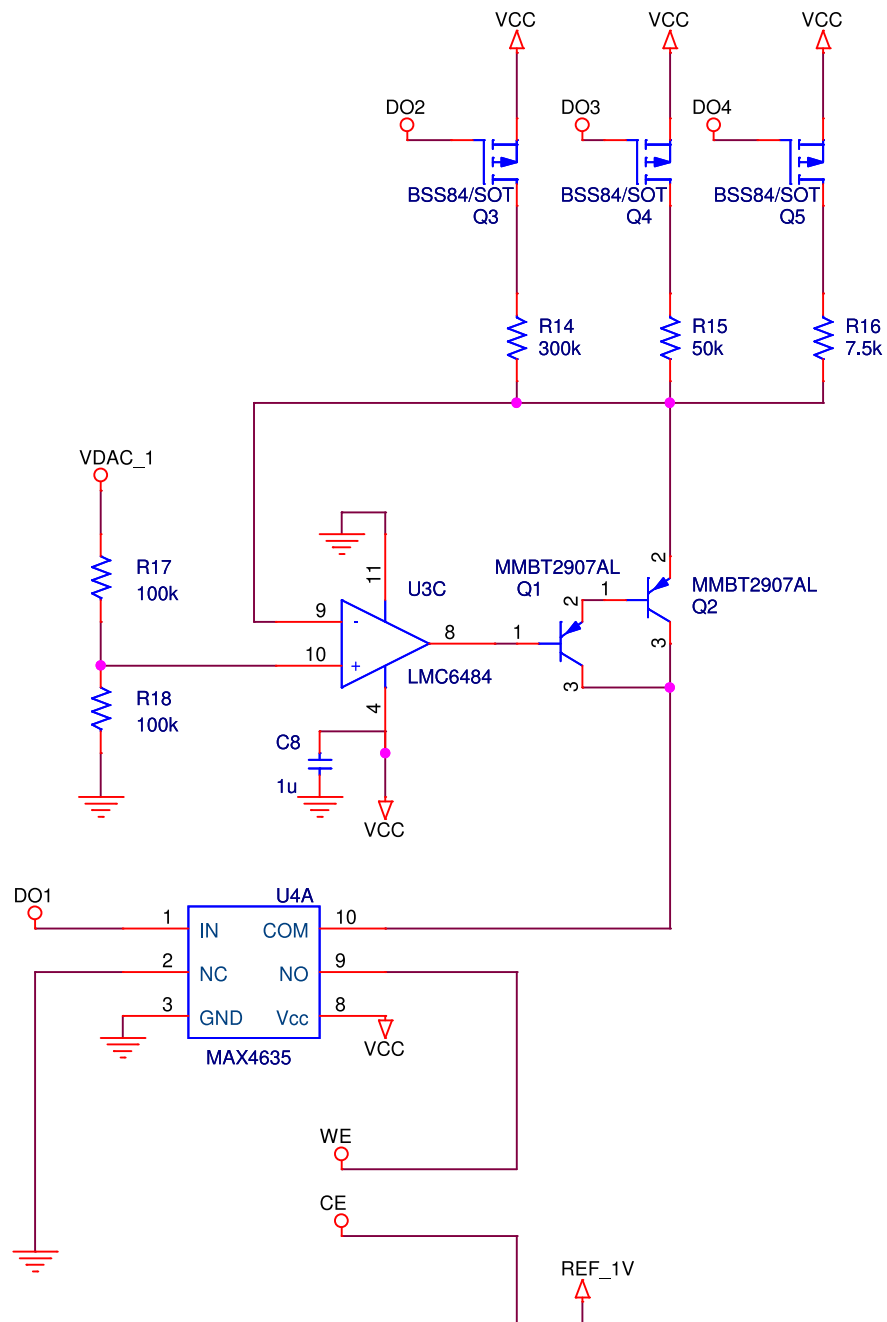


Figura C.2: Diseño alternativo de la fuente de corriente.

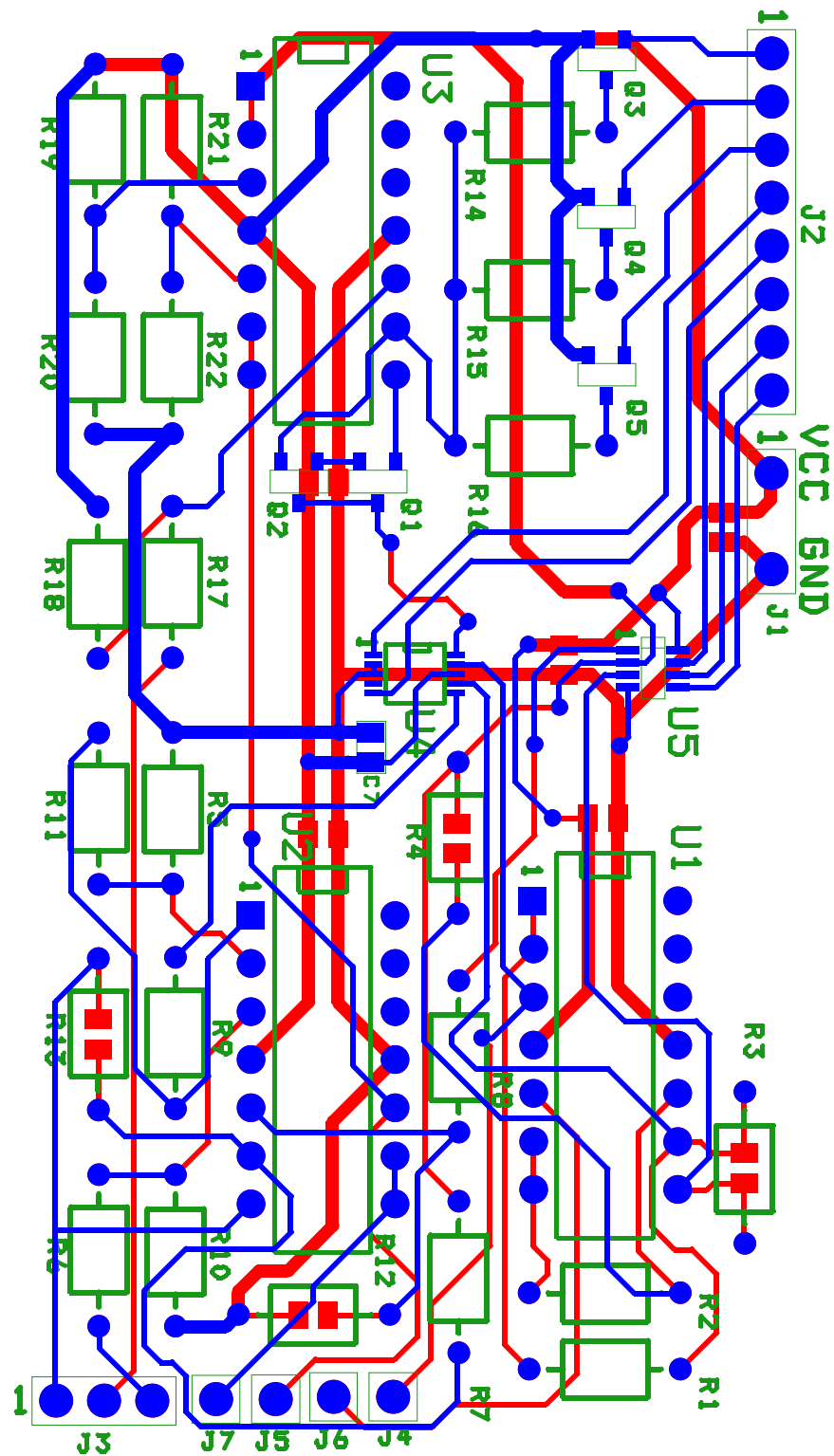


Figura C.3: Vistas top y bottom superpuestas del PCB del diseño alternativo de la etapa de I/O de MECEHA.

Apéndice D

Configuración de pines

A continuación, veremos la configuración de pines elegida para conectar la placa Labjack con el circuito de I/O:

Circuito de I/O	Labjack
DO1	FIO4
DO2	FIO5
DO3	FIO6
DO4	FIO7
DO5	EIO0
AINCalib	EIO1
DO7	EIO2
DO8	EIO3
DO9	EIO4
AIN1	FIO2
AIN2	FIO3
DAC2	DAC1
DAC1	DAC0

Apéndice E

Formato de registro de ensayo

Los resultados del ensayo de pulso galvanostático son guardados en formato .txt en un lugar elegido por el usuario, previo a comenzar el ensayo. La estructura del archivo de registro del ensayo es la siguiente:

- Nombre de archivo
- Fecha y hora
- Parámetros de ensayo
- Resultados del ensayo
- Datos registrados, en dos columnas, tiempo y potencial de media celda

La estructura del archivo está pensada para poder ser levantada fácilmente desde Microsoft Excel, que es la aplicación utilizada por nuestros clientes para procesar las medidas. A continuación, copiamos un fragmento de un ensayo real:

RB3-ConGuarda.txt

MECEHA1.0

04/12/2009 15:49:49

// Parametros de ensayo

Observaciones:

Etiqueta 1: Etiqueta 2:

Electrodo de referencia: Hg, Hg₂Cl₂|KCl (0,1M)

Diametro de confinamiento: 10 cm

Superficie de polarizacion: 39 cm²

Diametro de armadura: 10 mm

Constante B: 26 mV

Espesor de recubrimiento: 3 cm

Resistividad: 400 Ohm.m

Confinamiento: Sí

Tiempo de ensayo: 120 s

Corriente de ensayo: 15 uA

// Resultados

Ecorr: 475,2 mV

Icorr: 12,4 uA

icorr: 0,32 uA/cm²

Rp: 2091 Ohm

Rohm: 1842 Ohm

Sobrepolarizacion: 59 mV

Pendiente final: 0,02 mV/s

// Datos

t (s) Ep (mV)

0,0000 -475,2

0,0068 -475,2

0,0268 -475,2

0,0468 -475,2
0,0668 -475,2
0,0868 -475,2
0,1068 -475,2
0,1268 -475,2
0,1468 -475,2
0,1668 -475,2
0,1868 -475,2
0,2068 -475,2
0,2268 -475,2
0,2468 -475,2
0,2668 -475,2
0,2868 -475,2
0,3060 -475,2
0,3260 -475,2
0,3460 -475,2
0,3660 -475,2
0,3668 -475,2
0,3868 -475,2
0,4068 -475,2
0,4268 -475,2
0,4468 -475,2
0,4668 -475,2
0,4868 -475,2
0,5068 -475,2
0,5268 -475,2
0,5468 -475,2
0,5668 -475,2
0,5868 -475,2

PCB

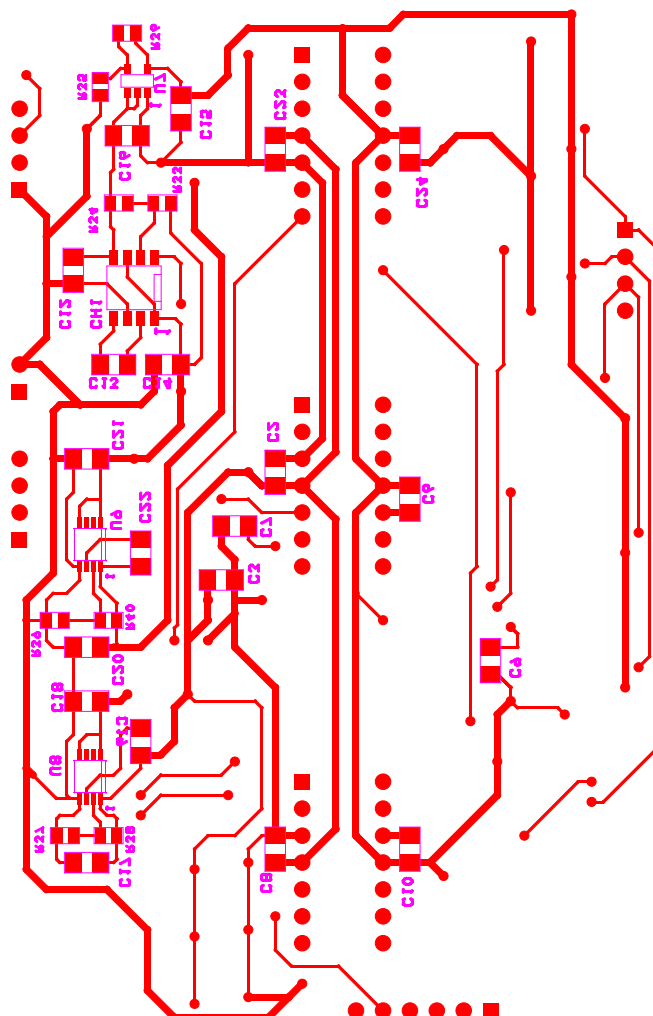


Figura F.1: Vista inferior del PCB de la etapa de I/O de MECEHA.

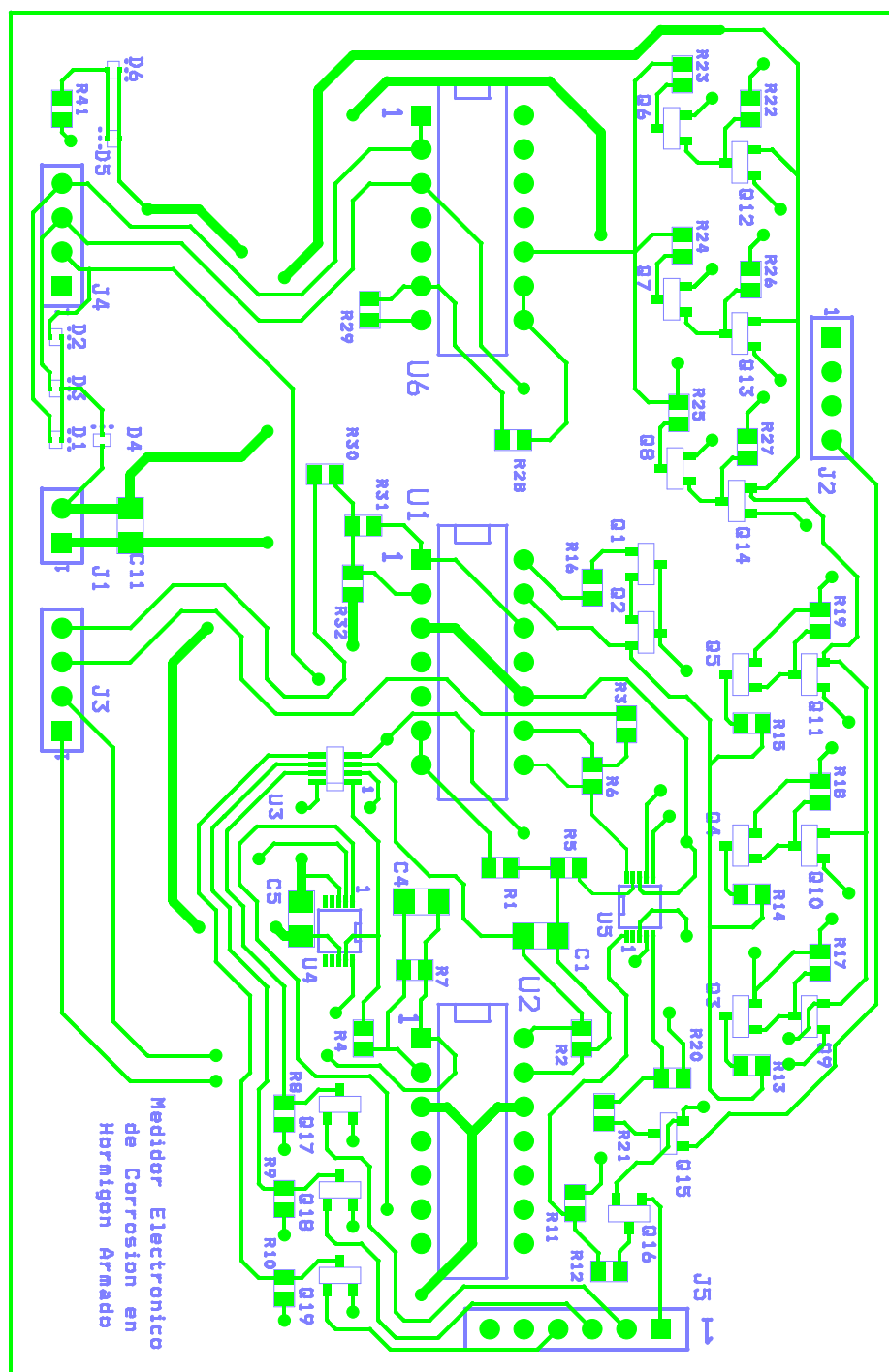


Figura F.2: Vista superior del PCB de la etapa de I/O de MECCHA.

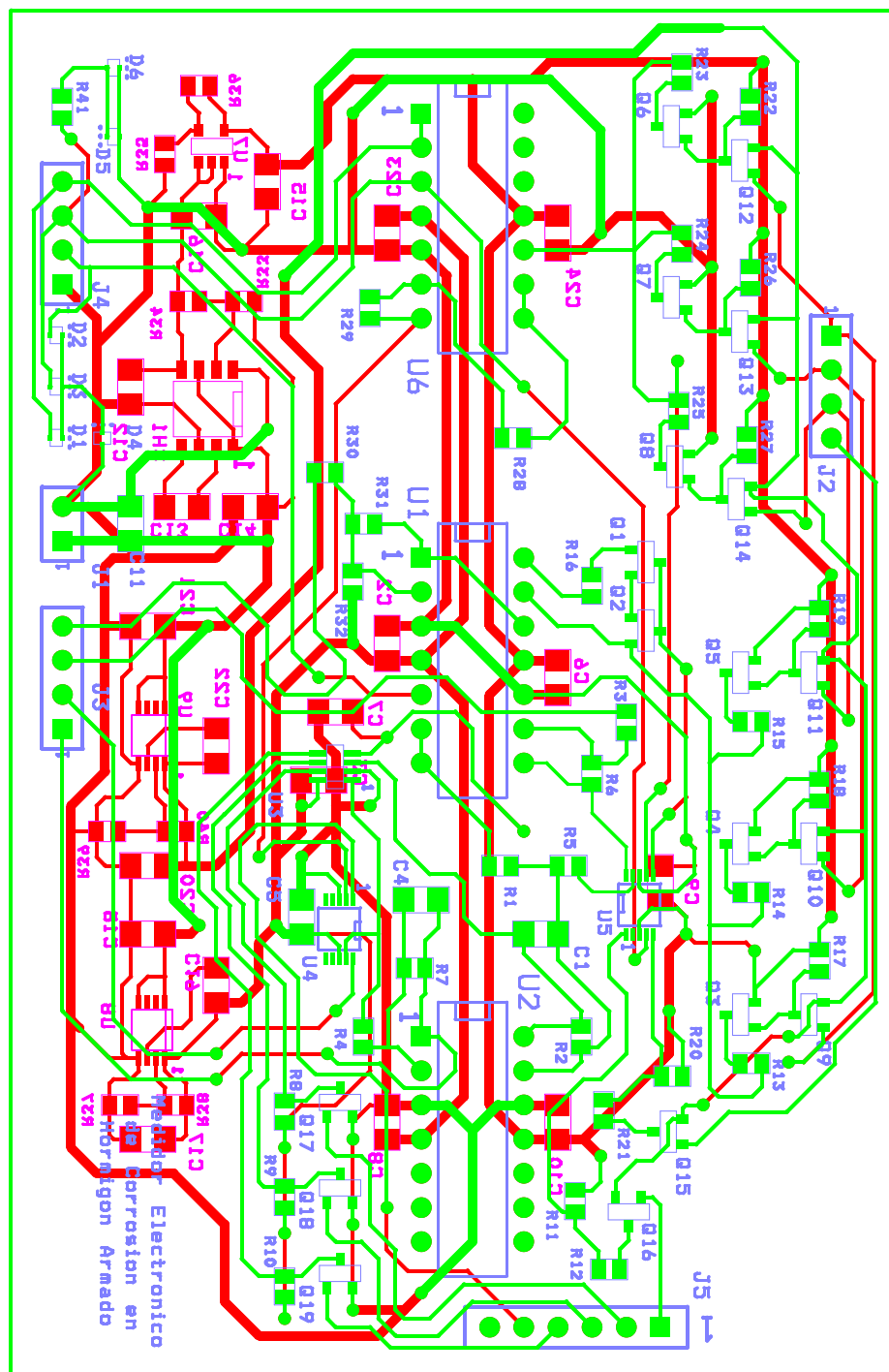


Figura F.3: PCB de la etapa de I/O de MECEHA, caras superior e inferior superpuestas.

Apéndice G

Hoja de datos

Las principales características de MECEHA pueden ser resumidas en la siguiente lista:

- Corriente generada: $300nA$ - $300\mu A$:
 $200nA - 800nA$ error menor al 4 %
 $800nA - 300\mu A$ error menor al 1,2 %
- Voltaje de entrada admisible: $[-1V, 0V]$:
 $[-100mV, 0V]$ error menor al 3,4 %
 $[-200mV, -100mV]$ error menor al 2 %
 $[-1,000mV, -200mV]$ error menor al 1 %
- Impedancia de entrada: $10T\Omega$
- Frecuencia de muestreo máxima: $2,5kHz$
- Interfaz USB 2.0/1.1
- Sistema operativo: Windows XP (con plataforma Visual C#)
- Conectores BNC: guarda de confinamiento (GC), electrodo de trabajo (WE), electrodo de referencia (RE) y contraelectrodo (CE)
- Dimensiones: $6cm \times 13cm \times 7cm$
- Peso: $0,3kg$

- Alimentación USB (5V)
- Consumo: 150mW