



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Melissa Inés de Jesús Ulloa González

Sistema electrónico para la medición en línea de ley de mineral del hierro

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 09 de agosto de 2018



Sistema electrónico para la medición en línea de ley de minería del hierro

Melissa Inés de Jesús Ulloa González

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Gonzalo Farías Castro

Profesor Guía

Sr. Héctor Vargas Oyarzún

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 09 de septiembre de 2018

Resumen

La minería del hierro chilena consiste en la extracción y purificación de este material, el cual es usado como materia prima para productos como el acero, que se venden en territorio nacional y en el extranjero.

La industria del hierro o acero chilena está asociada a la empresa CAP Minería, la cual es la principal productora de este material en Chile. Esta empresa tiene su producción principalmente en el norte del país. Una de las líneas de producción de esta empresa es la venta de pellets de hierro con un porcentaje mínimo de hierro presente en él o ley de hierro. Cumplir con esta ley es de suma importancia.

El desarrollo de este proyecto se basa en dar solución al problema de obtener una medición válida, precisa y oportuna de la ley minera del hierro.

En el capítulo 1 de este trabajo se describe el contexto en el cual surge la problemática que se soluciona y las formas en las cuales se puede solucionar actualmente. Estos métodos son la medición por laboratorio de la ley de hierro, un magnetómetro y la medición electrónica de una inductancia que es atravesada por su eje axial por una tubería que transporta pulpa de material ferroso. Se elige el método de la medición electrónica de la inductancia de la bobina.

En el capítulo 2 se describe la solución conceptual para la medición electrónica y en línea de la ley de mineral de hierro. En el capítulo se describen los métodos electrónicos para medir la impedancia de una bobina, y se elige el método del puente auto-balanceado como base de medición debido a sus características superiores. También se presenta la relación matemática de la medida de la impedancia de una bobina con la inductancia de la misma y con la ley de hierro. Se especifican las bases teóricas que sustentan la solución.

En el capítulo 3 se presentan, de forma detallada, las tareas realizadas para implementar de forma real, por hardware y software, el sistema de medición electrónica en línea de la ley de hierro minera. El hardware de este sistema consiste principalmente en el uso del circuito electrónico AD5933 que es un sistema completo para medir impedancias que se basa en el método del puente auto-balanceado explicado en el capítulo 2, y en el uso de la tarjeta electrónica Raspberry Pi 3, con la cual se puede realizar la programación del CI AD5933 para obtener una medida de la ley de hierro en base a la inductancia. El software de este sistema consiste en una interfaz gráfica de usuario que tiene la función de presentar los valores de la ley de hierro medida por el sistema en una pantalla táctil. Esta interfaz es un programa desarrollado en el lenguaje Python y se ejecuta en el entorno virtual de la Raspberry Pi 3.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de la implementación de este sistema, los cuales son todos satisfactorios.

Palabras claves: Ley de hierro, bobina, puente auto-balanceado, sistema electrónico.

Abstract

Chilean iron mining involves the extraction and purification of this material, which is used as a raw material for products such as steel, which are sold domestically and abroad. The Chilean iron or steel industry is associated with the CAP Mining Company, which is the main producer of this material in Chile. This company has its production mainly in the north of the country. One of the production lines of this company is the sale of iron pellets with a minimum percentage of iron present, or iron law, and comply with this law is of utmost importance. The development of this project is based on solving the problem of obtaining a valid, accurate and timely measurement of the iron ore law.

In chapter 1 of this paper we describe the context in which the problem that is solved arises and the ways in which it can be solved at present. These methods are the measurement by laboratory of the iron law, a magnetometer and the electronic measurement of an inductance that is traversed by its axial axis by a pipe that transports pulp of ferrous material. The method of electronic measurement of the inductance of the coil is chosen.

Chapter 2 describes the conceptual solution for electronic and online measurement of the iron ore law. It describes the electronic methods for measuring the impedance of a coil, and the self-balanced bridge method is chosen as the basis of measurement due to its superior characteristics. The mathematical relationship of the measurement of the impedance of a coil with the inductance of it and with the iron law is also presented. The theoretical bases that support the solution are made clear.

In Chapter 3, the tasks carried out to implement in real form, by hardware and software, the online electronic measurement system of the mining iron law are presented in detail. The hardware of this system consists mainly of the use of the AD5933 electronic circuit which is a complete system for measuring impedances that is based on the self-balanced bridge method explained in chapter 2, and the use of the Raspberry Pi 3 electronic card, with which the AD5933 CI programming can be performed to obtain a measure of the iron law based on the inductance. The software of this system consists of a graphical user interface that has the function of presenting the values of the iron law measured by the system on a touch screen. This interface is a program developed in the Python language and runs in the virtual environment of the Raspberry Pi 3.

Chapter 4 presents the results of the implementation of this system, which are all satisfactory.

Keywords: Iron law, coil, self-balanced bridge, electronic system.

Índice general

Introducción.....	1
1 Antecedentes generales del problema.....	4
1.1 CAP Minería.....	4
1.1.1 Problemática y proceso productivo de concentración de mineral férrico.....	5
1.2 Estado del arte para la medición de ley de hierro minera	6
1.2.1 Medición de la ley de hierro de forma manual en laboratorio	6
1.2.2 Medición de la ley de hierro mediante un magnetómetro electrónico	6
1.2.3 Medición de la ley de hierro por medición de la inductancia de una bobina	7
1.2.4 Elección del método para la medición de la ley de hierro	8
1.3 Solución propuesta	9
1.4 Objetivos generales y específicos	9
1.5 Conclusiones y comentarios finales del capítulo.....	9
2 Descripción de la solución propuesta	10
2.1 Diagrama general de la solución propuesta	10
2.2 Descripción del sistema electrónico para la medición de la ley de hierro	11
2.2.1 Descripción del sistema de adquisición de datos	11
2.2.2 Descripción del sistema de interpretación de datos y obtención de resultados	20
2.3 Descripción de la interfaz para el intercambio y comunicación de datos.....	20
2.3.1 Almacenamiento de datos	21
2.3.2 Mostrar y depurar resultados	21
2.4 Conclusiones y comentarios finales del capítulo.....	22
3 Desarrollo de la solución.....	23
3.1 Descripción de los componentes	23
3.1.1 Bobina sensora	23
3.1.2 Circuito Integrado AD5933.....	24
3.1.3 Tarjeta Raspberry Pi 3	26
3.1.4 Características de la Raspberry Pi 3	26
3.1.5 Display táctil LCD	28
3.2 Conexión física de componentes	30
3.3 Programación de componentes	31
3.3.1 Programación del CI AD5933	31
3.3.2 Programación de la Raspberry Pi 3	44
3.3.3 Programación de la interfaz de usuario.....	48
3.4 Conclusiones y comentarios finales del capítulo.....	49
4 Resultados.....	50
4.1 Resultados del soporte mecánico del sistema.....	50
4.2 Resultados sobre la exactitud del sistema	52

4.3 Resultados de la interfaz gráfica del sistema	53
4.4 Conclusiones y comentarios finales del capítulo.....	53
Discusión y conclusiones.....	54
Ideas de mejoras para el sistema.....	55
Bibliografía	57

Introducción

Chile es el mayor productor de concentrado de cobre en el mundo, pero también tiene una importante participación de otros minerales importantes, como el hierro. El desarrollo de la industria de hierro en Chile tiene su locación en la zona norte del país, en especial la tercera Región de Atacama, con variados yacimientos de este mineral.

La industria chilena del hierro está dominada por la empresa CAP Minería, la cual es la mayor productora de concentrado de hierro en Chile, y la única exportadora de este mineral.

La industria chilena del hierro es reconocida por su gran calidad de ley de hierro, o el porcentaje de hierro en la piedra que se exporta. Debido a esto, obtener una medida del porcentaje de hierro real en la roca, se vuelve muy importante, en especial cuando los procesos son rápidos y un retraso en la obtención de la medida, o una mala medición, pueden costar fácilmente miles de millones de pesos en pérdidas.

Actualmente en la industria del hierro, existen mediciones válidas de la ley de hierro, pero la certeza de las mismas y la rapidez de su obtención, no hacen de éstas una medida de ley aceptable. Se debe obtener una medida de ley de hierro válida, precisa y oportuna para evitar futuros inconvenientes provenientes de una mala ley.

El desarrollo de este proyecto da solución al problema de encontrar una medición válida a la ley del mineral de hierro presente en la industria chilena de este metal.

En el desarrollo de este proyecto se identificaron variadas formas de realizar una medición de la ley de hierro. La primera forma fue la medición directa de las concentraciones de hierro de una sección de la minera CAP mediante la toma de muestras y su análisis posterior en el laboratorio. La segunda forma consiste en el uso de un instrumento especializado llamado magnetómetro; el cual es un aparato que entrega una medición de la ley de hierro mediante una relación entre la cantidad de fuerza magnética que produce una bobina cuando ésta es atravesada, por su eje axial, por una tubería que transporta material ferroso minero. La tercera forma consiste en la medición de la inductancia de una bobina cuando es atravesada de la misma manera que el magnetómetro.

En el desarrollo de este proyecto se demostrará que la mejor manera de medir la ley de hierro es a través de la medición de la inductancia de una bobina.

El señor Jesús Martínez, quien fue alumno de la Escuela de Ingeniería Eléctrica en la PUCV, desarrolló su trabajo de tesis y logró encontrar una relación válida entre la ley de hierro en una mezcla acuosa de material ferroso, cuando transita por una tubería, y la inductancia de una bobina cuando la misma tubería la atraviesa por su eje axial.

El presente documento busca expandir lo elaborado en el trabajo del señor Martínez con el fin de crear un sistema electrónico completo para medir la ley de hierro en línea, de forma válida, precisa y oportuna para los procesos posteriores que la necesiten.

La medición de la inductancia de una bobina no es un tema trivial. Se ha presentado, en la literatura electrónica, que la inductancia no es calculada directamente, sino a través de la impedancia de la bobina. Además, es conocido que la impedancia de elementos netamente inductivos como una bobina, tienen una fuerte dependencia con la frecuencia de la onda sinusoidal con la cual se alimenta. Medir la inductancia de una bobina implica medir la impedancia de la misma, y la medición de la impedancia es válida solo cuando se conoce la frecuencia de la onda alterna de alimentación.

Existen variados métodos para medir la impedancia de bobinas y así medir la inductancia. La mayoría de ellos se basan en un arreglo especial llamado puente electrónico, el cual consiste en que la impedancia desconocida (bobina) se disponga en el puente junto a 3 impedancias conocidas y ajustables. El puente electrónico está hecho para encontrar una condición llamada "equilibrio", la cual surge cuando el voltaje entre los nodos de ramas adyacentes es nulo, esto solamente puede ocurrir cuando las impedancias de sus ramas sean iguales. De esta forma, mediante el ajuste de las 3 impedancias ajustables, para encontrar el equilibrio del puente, se logra obtener una medida indirecta de la medida de la inductancia desconocida, ya que debe ser igual a la impedancia de la rama adyacente.

El método de puente electrónico tiene inconvenientes importantes debido a que se requiere el ajuste, o sintonización, de las 3 impedancias ajustables cada vez que se requiera medir una nueva impedancia. Además de que el ajuste normalmente es hecho de forma manual.

Existe otra forma para medir impedancias inductivas que se basa en una mejora de puente electrónico. Este sistema consiste en que el equilibrio del puente electrónico es encontrado de forma automática por un sistema electrónico especializado, el cual está basado en amplificadores operacionales. Esta forma de medir impedancias inductivas se llama puente auto-balanceado y es el elegido para el desarrollo de este proyecto.

El dispositivo electrónico real elegido, que implementa la lectura de impedancias mediante el puente auto-balanceado, es el circuito integrado AD5933, el cual es fabricado por la empresa Analog Devices. Este circuito integrado, o CI, es un medidor de impedancias completo y robusto que no solo aplica la teoría del puente auto-balanceado, sino que es un sistema completo para el cálculo de impedancias y para obtener la respuesta a la frecuencia para impedancias desconocidas. El CI AD5933 es el corazón de la solución electrónica de este proyecto.

Una vez que se tuvo un dispositivo robusto, versátil y confiable para la medición de la impedancia de una bobina se pensó en la siguiente tarea a desarrollar, la cual consiste en obtener la inductancia a través de la impedancia. Éstas dos variables se relacionan mediante una forma matemática simple a través de la frecuencia de excitación de la bobina por el CI AD5933. Esta ecuación matemática no se puede implementar en el CI debido a que no cuenta con capacidades de programación avanzadas. En la búsqueda de la autonomía del sistema electrónico para medir inductancias, se buscó un elemento programable que pudiera recibir los datos de impedancia del CI AD5933 y convertirlos en datos de inductancia, además de compartirlos, guardarlos y presentarlos en dispositivos visuales de usuario, entre muchas otras tareas. Se requirió el uso, para este proyecto, de un microcontrolador.

Este proyecto busca obtener un sistema para medir, en línea, la ley de hierro presente en una muestra. Debido a lo anterior es que el desarrollo del mismo debe ser muy meticuloso considerando todas las variables del mismo.

Un desarrollo meticuloso de un proyecto requiere de una formulación de una idea que solucione un problema, la puesta a prueba de esa idea, con el fin de cerciorarse que es útil y la más eficiente, y por último la implementación de esa idea si es que fueron pasadas todas las pruebas.

Una vez definidos los problemas a resolver del proyecto y los resultados esperados del mismo, se dieron soluciones tentativas para estos problemas. En este trabajo se ponen a prueba estas soluciones, con resultados novedosos que cambian completamente la forma de solución. Este cambio se debe al considerar los elementos reales que implementarán el sistema que se fabricó.

Los proyectos electrónicos funcionan o no funcionan debido a muchos factores, uno en especial es la correcta elección de sus componentes. La elección de los componentes se basa normalmente en la historia del ejecutante con los mismos, cuando existe, y en el conocimiento técnico mínimo que se tiene sobre un componente con el cual nunca se ha trabajado. Debido a esto se hace imprescindible el entendimiento de un elemento que puede cambiar el estado binario de funcionamiento de un sistema electrónico. Todos queremos que el sistema sea un "1" lógico.

Los sistemas de prototipado sirven como primer acercamiento hacia un sistema real definitivo. El fin del prototipo es demostrar que la relación que justificó la construcción del prototipo; para la medición de inductancias (o ley de hierro), es válida en el rango esperado. Con el prototipo se quiere comprobar las relaciones y además ver los posibles errores que puedan surgir, para corregirlos cuando se construya el dispositivo final, el cual se implementará en un ambiente industrial.

El proyecto de crear un sistema para la medición, en línea, de la ley de hierro, ha traído grandes retos, como gratificaciones al resolverlos. La mayor gratificación es que se construyó un sistema completo para la medición de inductancias, el cual será analizado en este trabajo.

1 Antecedentes generales del problema

La minería chilena del hierro se basa principalmente en la extracción de material desde las faenas mineras, para luego purificarlo y concentrarlo en territorio nacional, todo esto, con el fin de ser utilizado como materia prima en la elaboración de productos importantes para la industria (como lo es el acero) los cuales pueden ser producidos tanto en Chile como el extranjero.

Los procesos de extracción, purificación y concentrado del hierro deben cumplir con ciertos estándares de calidad que garantizan un mínimo nivel aceptable de pureza del hierro, también llamada ley de hierro, para poder ser comercializados. La ley de hierro y su medición, describen el problema que se solucionará, y el cual se describirá en este capítulo.

1.1 CAP Minería

La producción y la exportación de minerales de hierro en Chile está dominada por la empresa CAP Minería [1], la cual posee los yacimientos mineros de hierro más importantes del país, debido a esto, la mayoría de los procesos de la industria minera, ocurren en esta empresa en alguna de sus faenas. Se puede decir que describir los procesos mineros del hierro en Chile, es describir los procesos mineros que se producen en CAP Minería.

La empresa CAP Minería, Compañía Minera de Pacífico S.A., fue creada en el año 1981, y desde entonces ha sido líder en la industria minera chilena y mundial. Posee múltiples yacimientos de mineral de hierro en el Valle de Copiapó, en el Valle de Huasco y en el Valle del Elqui, localizadas en el norte de Chile. En el Valle de Copiapó se encuentra la planta Magnetita, la Mina Cerro Norte y el puerto Punta Toralillo. En el Valle de Huasco se ubica la mina Los Colorados, la Planta de Pellets, la mina El Algarrobo y el Puerto Guacolda II. En el Valle del Elqui se sitúan la mina El Romeral y el Puerto Guayacán.

En la Figura 1-1 se muestra la producción en Kilo-toneladas de mineral de hierro agrupados por valle. Nótese que la mayor producción ocurre en el Valle de Huasco, debido al efecto productivo de la Planta de Pellets.

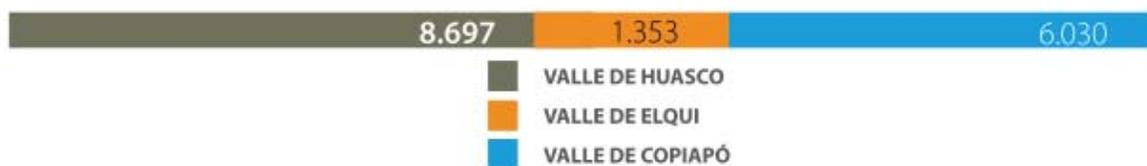


Figura 1-1. Producción en Kilo-toneladas por valle para el año 2016 (fuente: [1])

La Planta de Pellets debe su nombre a que el producto final de esta planta son pequeñas porciones de mineral de hierro con una ley mayor a 66 % llamados pellets, y el proceso por el cual se obtiene estos pellets de hierro concentrado, es común a todas las plantas de concentrado de hierro.

1.1.1 Problemática y proceso productivo de concentración de mineral férrico

El proceso productivo para concentrar el mineral de hierro, proveniente de alguna mina, cumple con ciertas tareas, siendo algunas específicas para cada planta de concentración (debido a que el producto final de concentrado de hierro requiere una especificación), y existiendo otras, sin embargo, que son comunes a todas las plantas. En esta subsección se describirá el proceso común para concentrar el mineral de hierro proveniente de una mina, contextualizando, de este modo, la principal problemática que fundamenta este trabajo.

Para describir el proceso productivo de concentración del hierro, se hará uso de la información particular de la Planta de Pellets, el cual se muestra en parte en la Figura 1-2.

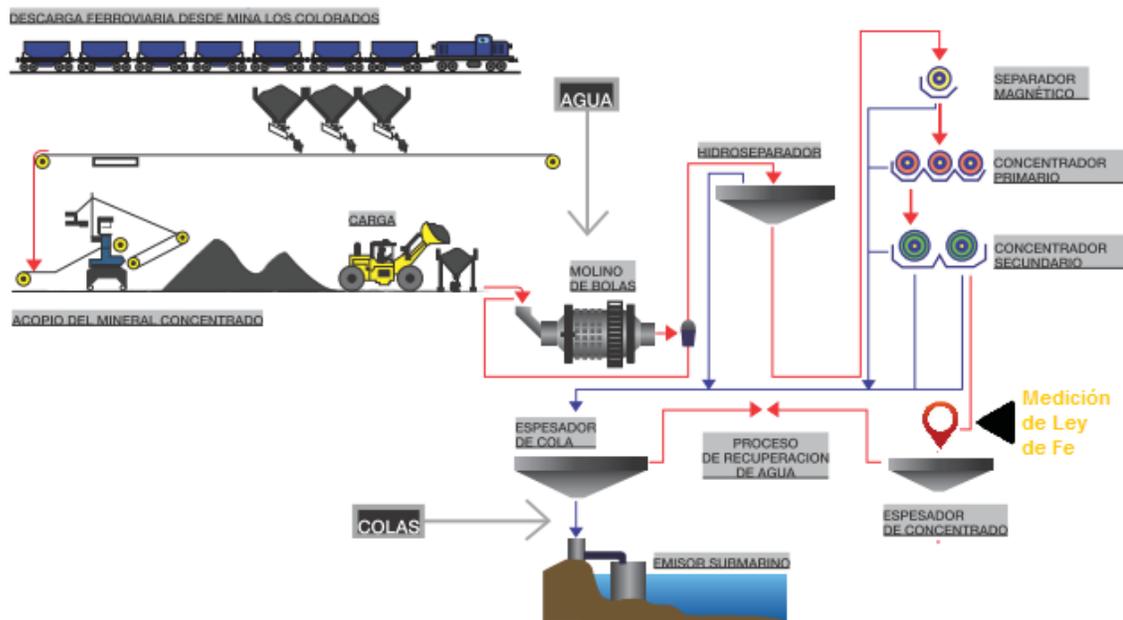


Figura 1-2. Sección del proceso de concentración de hierro en la Planta de Pellets (fuente: capminería.cl)

El proceso de concentración de hierro empieza con la descarga de material pre-concentrado desde la mina Los Colorados, el cual llega por una línea férrea de 109 Kilómetros de distancia (ver Figura 1-2), para luego acopiarse en pilas de material pre-concentrado. La siguiente etapa es de molienda, donde el material se envía a un molino de bolas el cual lo reduce hasta que el 80 % de este material sea menor que 44 micrones. El siguiente paso es la concentración de material de hierro de manera húmeda, la cual se obtiene con mineral de hierro mezclado con agua, dando lugar a lo que se denomina pulpa. En esta etapa se concentra el mineral de hierro mediante la aplicación de fuertes campos magnéticos. La concentración del mineral de hierro se hace además en un concentrador secundario para garantizar una aceptable ley de hierro.

En la sección inferior derecha de la Figura 1-2 (marcado en letras amarillas) se puede observar el lugar donde es necesario obtener o medir la ley de hierro del material acuoso concentrado (pulpa). Esta medición es de suma importancia debido a que permite obtener un parámetro para realizar las acciones correctivas necesarias en caso de que el porcentaje de ley de hierro sea menor a lo requerido, debido a que afectará la calidad de los procesos posteriores de concentración de la pulpa de hierro.

La problemática de este proyecto es la correcta, precisa y oportuna medición de la ley de hierro minera.

1.2 Estado del arte para la medición de ley de hierro minera

Existen variadas formas para obtener la ley de hierro, las cuales se describirán a continuación, para entender la elección que se ocupó en el desarrollo de este proyecto.

1.2.1 Medición de la ley de hierro de forma manual en laboratorio

La medición de la ley de hierro en el laboratorio es una medida manual. Consiste en la toma de muestras de la pulpa presente en la línea de transporte de material (ver Figura 1-2, parte inferior derecha) para luego separar sus componentes, mediante técnicas de laboratorio, y pesarlos. Los componentes se separan en elementos ferrosos y no ferrosos. Luego de eso, se ocupa una simple relación matemática para determinar la ley de hierro, la que consiste en dividir el peso del material ferroso sobre el peso total de la muestra, tal como se presenta en la ecuación 1-1.

$$\text{Ley de Hierro}(\text{manual}) = \frac{\text{Peso de material ferroso}}{\text{Peso total de la muestra}} \cdot 100 \% \quad (1-1)$$

La ventaja de esta forma de medición es que se tiene una medida directa, no derivada, de la ley de hierro minera. Las desventajas de esta forma de medición son el tiempo de demora entre la toma de muestras y el resultado de la medición, el cual puede tardar alrededor de 2 horas, y el uso de personal calificado para realizar la medición por laboratorio, convirtiendo a este método en uno no automático sino manual.

1.2.2 Medición de la ley de hierro mediante un magnetómetro electrónico

Un magnetómetro es un instrumento usado para medir la fuerza de una señal u onda magnética. Se mostrará, en la siguiente sección, que existe una relación directa entre la cantidad de material ferroso que atraviesa el núcleo de una bobina, con el valor de su inductancia. Así, midiendo la inductancia, se tiene una medición indirecta del porcentaje de hierro presente en una muestra.

El magnetómetro puede medir la fuerza magnetomotriz asociada con un campo magnético. El campo magnético es creado cuando se alimenta a una bobina con corriente alterna, y tiene una relación directa con la cantidad de material de hierro que atraviesa la bobina, por ende, el magnetómetro da una medida indirecta de la ley de hierro minera.

Las ventajas de este instrumento es que no se requiere de personal especializado para su operación, y una vez instalado y calibrado, entrega información en línea sobre la ley de hierro presente en una sección de CAP Minería. La desventaja de este instrumento es la calibración del mismo; la cual se hace en CAP en períodos aproximados de una semana y requiere personal especializado para esta tarea. En la Figura 1-3 se muestra el magnetómetro presente en CAP.



Figura 1-3. Magnetómetro presente en CAP Minería.

1.2.3 Medición de la ley de hierro por medición de la inductancia de una bobina

Tal como se explicó en la sección anterior, es necesario realizar la medición de la ley de hierro, o el porcentaje de hierro que se transporta en forma de una mezcla acuosa del mineral (ver Figura 1-2), debido a que se necesita tener una pureza o ley de hierro mínima para no perjudicar a los procesos siguientes, y para garantizar la calidad del producto de hierro final. La ley de hierro necesaria, para los productos férricos de la empresa CAP Minería, es de un 66% mínimo.

Para poder medir la ley de hierro en una mezcla acuosa del material, se buscó y encontró una relación entre la cantidad presente de hierro (en la pulpa), y la medida de la inductancia de una bobina, cuando la mezcla acuosa atraviesa el núcleo vacío de una bobina, tal como se esquematiza en la Figura 1-4.

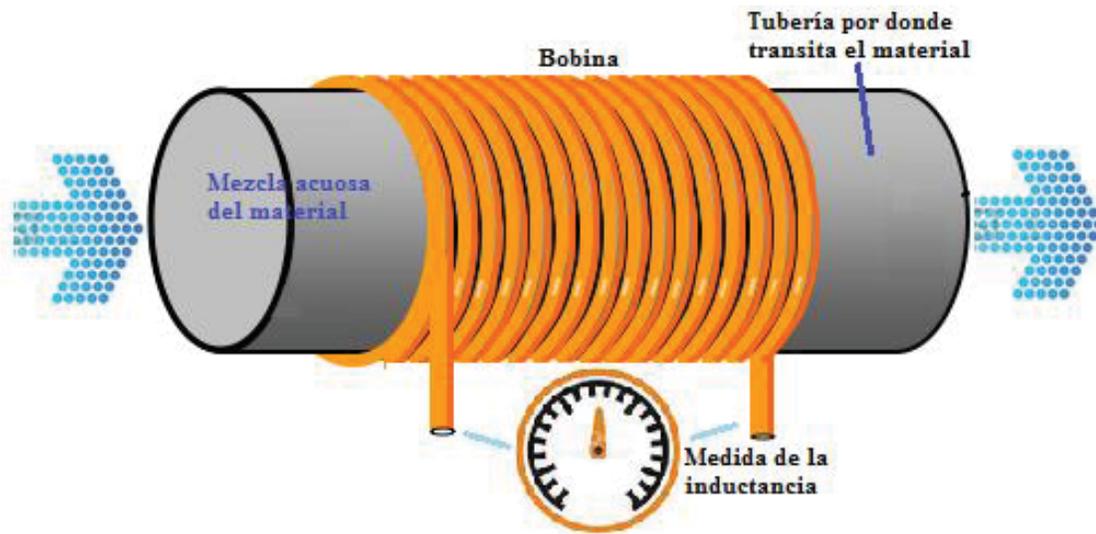


Figura 1-4. Descripción general de la medición la ley de hierro en base a la medida de la inductancia.

La relación directa entre la ley de hierro y la inductancia en una bobina de alambre de cobre fue realizada y presentada en el trabajo de tesis de Jesús Martínez, el cual fue alumno de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la PUCV. Los datos y conclusiones más importantes de su trabajo, se presentan en esta sección.

Existe una relación directa entre la inductancia de una bobina y la cantidad de material ferroso que pasa por una mezcla acuosa en un sistema similar al mostrado en la Figura 1-4. Esta relación se sustenta en que la cantidad de material de hierro presente en la mezcla acuosa, modifica la permeabilidad magnética del núcleo magnético de la bobina cuando ésta se somete a una corriente alterna, y de esta forma, se modifica el valor de la inductancia de la misma [2]. Se puede obtener entonces, una medida indirecta del porcentaje de hierro presente en la mezcla acuosa, o ley de hierro, si se mide la inductancia de una bobina cuando se dispone como la Figura 1-4.

La medición de la inductancia de la bobina debe cumplir con ciertas condiciones para garantizar la representatividad de la relación mencionada [2]. Estas condiciones son:

- **Porcentaje de sólido de la mezcla:** El porcentaje de sólido de la pulpa minera está limitado, debido a que esta debe transportarse por una tubería larga, por lo tanto, se debe mantener la fluidez de la mezcla. Esta consideración limita el porcentaje de sólido a un 40 % máximo. La variación de solidez de la pulpa minera, en los procesos de CAP Minería,

están entre 5.3% y 25.9 % de solidez [2]. Cabe notar que la solidez no solo se debe al mineral de hierro, sino también a otros minerales presentes en la roca chancada (ver Figura 1-2). En la Figura 1-5 y 1-6 se muestra la relación directa entre la inductancia y el nivel de ley de hierro. Estas observaciones fueron obtenidas mediante estudios de laboratorio en la PUCV, y demuestran empíricamente esta relación.

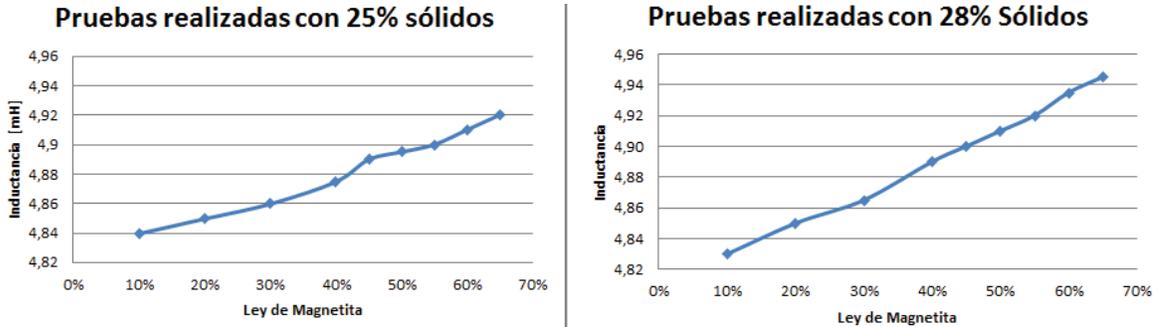


Figura 1-5. Pruebas de la relación entre inductancia para un 25 % y un 28 % de sólidos en la muestra.

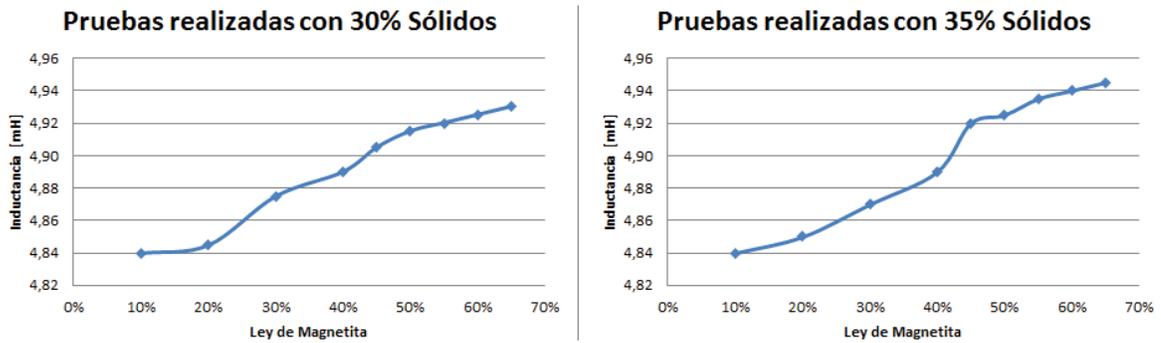


Figura 1-6. Pruebas de la relación entre inductancia para un 30 % y un 35 % de sólidos en la muestra.

- **Cantidad de mezcla necesaria en el núcleo de la bobina:** Las mediciones de la inductancia de la bobina son más susceptibles al cambio de la cantidad de hierro en la tubería, si esta última contenía una cantidad mínima de mineral de hierro [2]. Esta consideración solo es importante en el ambiente de laboratorio, debido a que, en el ambiente industrial de CAP Minería, esta condición se cumple a cabalidad [2].

1.2.4 Elección del método para la medición de la ley de hierro

Las características para los métodos descritos en secciones anteriores, se presentan comparados en la Tabla 1-1.

Características	Medición por laboratorio	Magnetómetro	Medición de inductancia
Uso de personal calificado	Sí	No	No
Calibración	No aplica	Cada semana	Una sola vez
Medición en línea	No	Sí	Sí

En base a los datos presentados en la Tabla 1-1, la solución al problema se hará mediante el método de la medición de inductancia, el cual fue explicado en la sección 1.2.3.

1.3 Solución propuesta

El problema a resolver consiste en realizar la medición de la ley de hierro de forma oportuna, precisa y en línea, para poder ocupar este dato en el control de los procesos de la empresa CAP Minería.

La solución propuesta consiste en la fabricación de un sistema electrónico completo y robusto, para la medición de la ley de hierro presente en CAP Minería, mediante la medición de la inductancia de una bobina cuando la pulpa ferrosa minera, pasa a través del núcleo de la bobina.

1.4 Objetivos generales y específicos

El objetivo general de este proyecto es:

Analizar, diseñar e implementar un sistema de medición electrónico en línea del porcentaje del hierro en un flujo de pulpa mediante el uso de propiedades electromagnéticas.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Estudiar las propiedades electromagnéticas del flujo de pulpa de alimentación y su uso para la medición de la ley de hierro magnético.
- Diseñar un circuito electrónico de medición de propiedades electromagnéticas de la pulpa para la obtención en línea de la ley del hierro.
- Fabricar e implementar el dispositivo electrónico para la medición de hierro magnético en un ambiente de laboratorio.

1.5 Conclusiones y comentarios finales del capítulo

Chile es un país con una producción de mineral importante, el cual produce distintos tipos de minerales, en especial, el mineral del hierro. La empresa CAP Minería es la productora más grande del país, y la única exportadora de mineral del hierro, debido a que controla la mayor cantidad de yacimientos y plantas procesadoras de mineral, las que, en su mayoría, están presentes en la zona norte del país. Debido a la importancia de CAP Minería, se puede decir que los procesos de la obtención del producto del hierro en Chile son los procesos de esta empresa.

El proceso de extracción del hierro ocurre en las minas, para luego ser enviado a plantas procesadoras, incrementándose el porcentaje de hierro presente en el material y de esta forma obteniendo un producto final de calidad. La forma de conocer el grado de calidad del producto es obteniendo el porcentaje de hierro presente en el mismo, conocido como ley del hierro, el cual se busca superior al 66%. La obtención de la medida de este porcentaje, o ley de hierro, de forma precisa, oportuna y en línea, es el objetivo de este proyecto.

Existen variadas formas para medir la ley de hierro minera, las cuales son: medida manual por laboratorio, uso de un magnetómetro y medida de la inductancia de una bobina cuando la pulpa ferrosa atraviesa el núcleo de esta. Según lo presentado en este capítulo, la mejor forma de realizar la medida de la ley de hierro es a través de la medida de inductancia de una bobina.

2 Descripción del sistema electrónico propuesto

El objetivo general de este proyecto es analizar, diseñar e implementar un sistema de medición electrónica en línea de la ley de hierro minera, con partes o etapas totalmente claras y definidas. Se debe analizar las características, virtudes y limitaciones del sistema completo actual, para encontrar el mejor método o técnica ingenieril de construcción o desarrollo. Se debe también diseñar, con las técnicas o métodos escogidos en la etapa anterior, para que las variables de ese método coincidan o se adapten al desarrollo del sistema electrónico que se quiere implementar. Y, por último, se debe realizar la implementación del sistema electrónico completo, para el cual se pondrá a prueba, y modificarán o mejorarán, los estudios anteriores.

Este capítulo describe las ideas o métodos generales de construcción sugeridos para poder desarrollar el objetivo general, y específicos, de este proyecto.

2.1 Diagrama general de la solución propuesta

El sistema completo de la solución se puede describir con las etapas mostradas en la Figura 2-1.

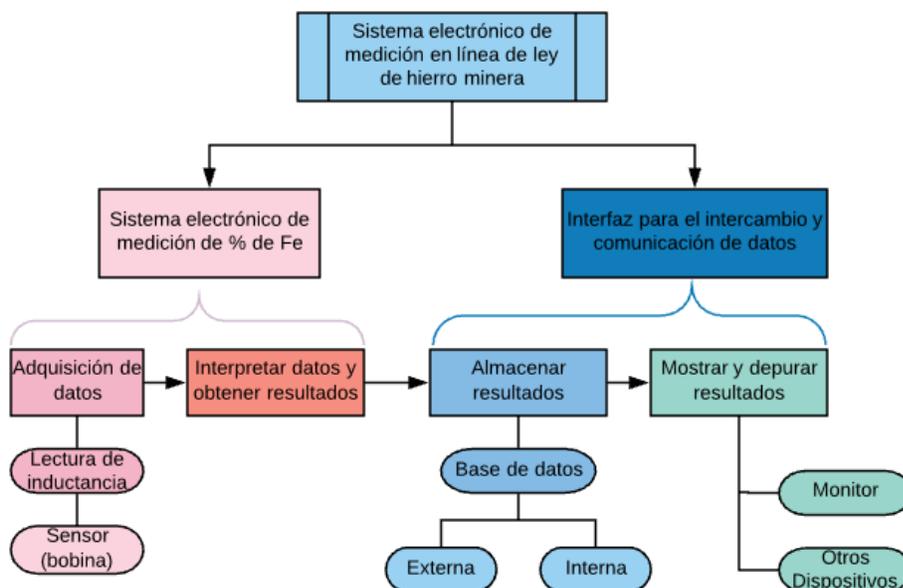


Figura 2-1. Diagrama general de la solución electrónica propuesta.

En la Figura 2-1, de la página anterior, se muestran las etapas generales de la construcción del sistema. En esta figura se puede observar como el sistema electrónico se puede separar en 2 grandes subsistemas: Fabricación del sistema electrónico de medición del porcentaje de hierro, y el Desarrollo de la interfaz para el intercambio y comunicación de los datos obtenidos por el subsistema anterior.

2.2 Descripción del sistema electrónico para la medición de la ley de Fe

Como su nombre lo indica, este sistema electrónico es el encargado de adquirir la información relevante proveniente del sensor, y que tiene relación con la cantidad de hierro proveniente de una tubería de material acuoso (ver Figura 1-4), para luego interpretar esa información y obtener una medida válida de porcentaje de hierro en la muestra. Esta medida precisa del porcentaje de hierro será guardada, de forma interna o externa al sistema, y también será presentada en una pantalla.

En esta subsección se describen las tareas del sistema electrónico fabricado para la medición de la ley de hierro minera. La descripción de la interfaz gráfica será descrita en la siguiente subsección.

2.2.1 Descripción del sistema de adquisición de datos

La tarea de adquisición de datos es la primera tarea del sistema electrónico a desarrollar. Consiste en la adquisición de la medida válida, precisa y oportuna de la inductancia de una bobina que es atravesada por una tubería que lleva la pulpa ferrosa minera (ver Figura 1-4).

La tarea de adquisición, tal como se dijo en el capítulo 1, es en base a una bobina sensora, cuyo valor de inductancia cambia de forma proporcional al cambio de hierro en una muestra minera. La adquisición de datos consiste en leer de forma adecuada, y electrónica, la inductancia de la bobina sensora.

La inductancia de la bobina, cuando cumple con ciertas condiciones de operación, varía en relación al porcentaje de hierro presente en la tubería que la atraviesa, debiéndose medir la inductancia de la bobina de forma externa a la misma. La medición de inductancias no es un tema trivial, debido a que las propiedades de cualquier bobina son fuertemente dependientes de la frecuencia de operación de las mismas, por lo que los resultados de alguna medición variarán de acuerdo a la frecuencia con la cual se mida [3].

Medición electrónica de la inductancia de la bobina sensora

La mayoría de las medidas de inductancias se hacen con un inductómetro comercial digital, el cual agrupa a la adquisición de datos del sensor con el microcontrolador para medir correctamente la inductancia (ver Figura 2-1). El pañol de la Escuela de Ingeniería Eléctrica posee un multímetro digital que es capaz de leer inductancias de bobinas, una parte de este multímetro se muestra en la Figura 2-2.



Figura 2-2 Multímetro UNI-T UT70A, con sus rangos de inductancias a medir (Fuente: dx.com).

Cabe notar que para este trabajo se fabricó un sistema electrónico completo para la medición de inductancias. Este sistema se prefirió a uno prefabricado debido a los múltiples beneficios que posee el primero. Uno de estos beneficios; es obtener la medición de inductancia como una salida adecuada, la cual puede usarse como dato de entrada para procesos posteriores.

Método elegido para medir inductancias de forma electrónica

Una propiedad intrínseca a las inductancias es que el valor de su impedancia varía, conforme cambia la frecuencia de la fuente senoidal que la alimenta o excita [4]. Esta configuración se presenta en la Figura 2-3.

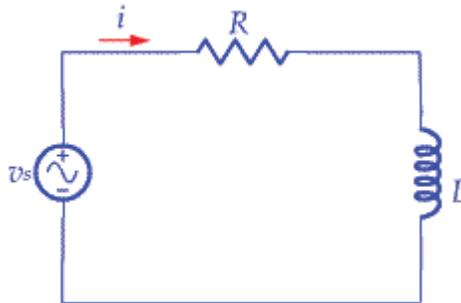


Figura 2-3. Alimentación de una bobina por una fuente de voltaje alterno (Fuente: <http://simulacionymedidashalo.blogspot.cl>).

Nótese de la Figura 2-3 como se presenta una resistencia R en serie con la inductancia, esta resistencia representa la resistencia del cable que forma a la bobina. La variación matemática que relaciona la impedancia de una bobina, con respecto a la frecuencia de la fuente alterna que la alimenta, se presenta en la ecuación 2-1 [3], donde Z_L es el valor de impedancia de la bobina, ω es la frecuencia angular de la fuente de alimentación, y L es la inductancia de la misma. Tal como se ve, es una relación directa.

$$Z_L = j\omega L \quad (2-1)$$

Los métodos para medir la inductancia se basan en excitar una bobina con una fuente de voltaje alterno con frecuencia conocida y con un medidor de impedancia. En base al conocimiento de estos parámetros, se despeja el valor de la inductancia de la ecuación 1-1.

Los métodos más usados para medir inductancias son los llamados puentes de corriente alterna [4], tales como los puentes de Maxwell y de HAY, los cuales se basan en realizar un arreglo eléctrico especial, con un cierto número de ramas, donde la bobina a medir forma una de las ramas. Luego se busca, mediante la manipulación o modificación de los valores de las ramas externas, el equilibrio del puente, para después obtener la medida de la inductancia en base a un cálculo matemático con una fórmula característica para cada puente.

Los métodos tipo puente de Maxwell o HAY tienen el inconveniente de que necesitan una modificación externa de los componentes de sus ramas para alcanzar el equilibrio, y esta modificación debe hacerse cada vez que se requiera medir una inductancia de valor diferente. Esta adecuación o modificación de las ramas es difícilmente hecha de forma automática, siendo normalmente hecha de forma manual. La forma manual de las modificaciones de las ramas trae consigo el problema de la calibración constante de los elementos del puente, la cual se debe hacer por una persona de forma periódica para garantizar una medida aceptable. Cabe notar que en la empresa CAP Minería, ya existe un medidor de inductancia basado en el método puente de CA (magnetómetro; ver sección 1.2.2), y ocurre el problema descrito anteriormente [2].

Para evitar la calibración de forma constante de los métodos basados en puente de CA, con tal de obtener una correcta medición de la inductancia, se buscó otro método para garantizar la calibración automática de sus elementos. Este método es el Puente Auto-Balanceado.

Puente Auto-Balanceado

El método del puente auto-balanceado es un arreglo electrónico especial usado para garantizar la modificación, adecuación o balanceo de sus componentes para obtener el equilibrio del puente [5]. Este funcionamiento del puente auto-balanceado está basado mayormente en el uso de un amplificador operacional, el cual se describirá a continuación.

Amplificador Operacional (AO)

El amplificador operacional es un dispositivo electrónico que está hecho para emular a una fuente de voltaje controlada por voltaje [3]. El símbolo del amplificador operacional se muestra en la Figura 2-4. Nótese que el amplificador operacional se debe alimentar mediante una fuente de voltaje externo para su correcto funcionamiento.

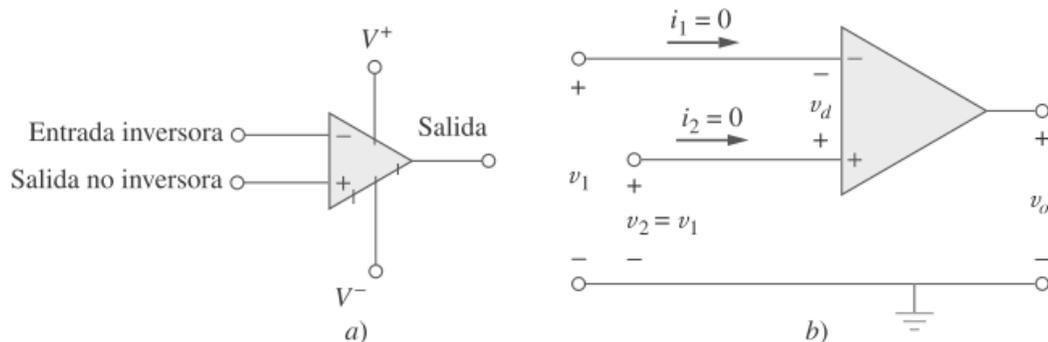


Figura 2-4. Amplificador Operacional, a) modelo, b) AO ideal (Fuente: [3])

El funcionamiento del amplificador operacional se describe de mejor manera con los supuestos del modelo ideal del AO, tal como lo muestra la Figura 2-4 b). El modelo ideal del AO indica que:

1. Las corrientes de entrada del AO son nulas.
2. La diferencia de voltaje de las entradas del AO es nula.

La primera condición indica que el amplificador operacional ideal no exige corriente en sus entradas para funcionar correctamente, por lo tanto, tiene una impedancia de entrada infinita o se comporta como una fuente de voltaje ideal. La segunda condición indica que los voltajes de entrada del AO serán iguales en el caso ideal. A estas condiciones se les llama como “Las reglas de oro de los amplificadores operacionales” (ver Figura 2-4 b)) [3].

El modelo ideal es útil para describir el AO, ya que en la práctica el AO tenderá a cumplir las reglas antes mencionadas de forma automática, siempre que se mantenga la fuente de alimentación entre sus terminales (ver Figura 2-4 a)).

El puente auto-balanceado se basa en un amplificador operacional para su funcionamiento. Este puente se ilustra en la Figura 2-5, la cual se presenta en la página siguiente.

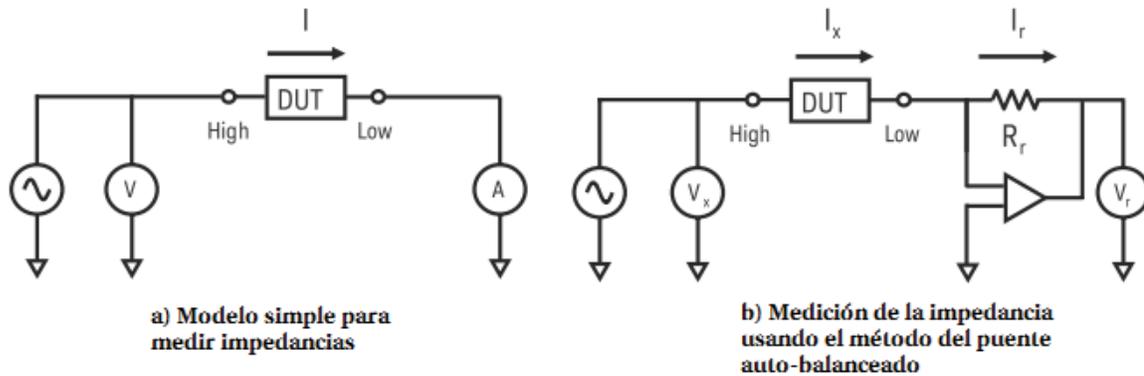


Figura 2-5. Puente auto-balanceado (Fuente: [5]).

El método del puente auto-balanceado se basa en medir la impedancia de un dispositivo desconocido (Marcado como DUT en la Figura 2-5) de forma simple mediante la ley de Ohm, la cual se presenta en la ecuación 2-2.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2-2)$$

El análisis del método supone que el puente posee una fuente de voltaje alterno que está conectada directamente a la impedancia, debido a ello una corriente I entra por un terminal de esta, y sale por otro: marcados como High y Low en la Figura 2-6. Nótese también que el voltaje en el terminal High se mide con un voltímetro marcado como V_x en la Figura 2-5 b).

La corriente I pasa a través de un arreglo especial formado por un AO un resistor conectado con realimentación hacia una entrada, el cual es llamado “arreglo inversor” o “convertidor de corriente a voltaje” [3].

El puente auto-balanceado también posee un medidor de voltaje en a la salida del amplificador operacional, marcado como V_r en la Figura 2-5 b). En la página siguiente se describirá la teoría matemática del puente auto-balanceado.

Teoría Matemática del puente Auto-Balanceado

La impedancia del elemento desconocido se obtiene mediante la ley de Ohm descrita en la ecuación 2-2, la cual exige para realizar el cálculo, el valor del voltaje y la corriente a través del elemento a medir. De la segunda ley de oro del AO se tiene que el voltaje entre las entradas del AO es cero, pero como una entrada está conectada a tierra o voltaje nulo (ver Figura 2-5 b)), el voltaje en la otra también es nulo. Debido a esto se aprecia que el voltaje de la impedancia es igual al medido por el voltímetro V_x , que es lo mismo que:

$$V_x = V_{impedancia} \quad (2-3)$$

La regla de oro 1 de los AO indica que por las entradas del mismo no pasa corriente idealmente, lo cual indica que la corriente que atraviesa por la impedancia a medir, pasa completamente por la resistencia R de la Figura 2-6. Debido a esto, y a que la resistencia tiene un terminal conectado en una entrada del AO (lo cual significa que ese terminal tiene voltaje nulo) el voltaje de la resistencia es el mismo que mide el voltímetro V_r , que es lo mismo que:

$$V_r = V_{Resistencia R} \quad (2-4)$$

El voltaje de la resistencia R es creado por la corriente I que pasa a través de ella, la cual también pasa por la impedancia desconocida, lo cual implica que:

$$I = \frac{V_r}{R} \quad (2-5)$$

Por lo tanto, se tiene una forma simple de calcular el valor de la impedancia del elemento desconocido (DUT en la Figura 2-6) mediante la ecuación 2-2, la cual se expande en la ecuación 2-6, la cual se forma como una combinación de las ecuaciones 2-3, 2-4 y 2-5:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_x}{\frac{V_r}{R}} = \frac{V_x \cdot R}{V_r} \quad (2-6)$$

De esta forma se puede calcular el valor de la impedancia desconocida, que en especial, será la impedancia de una bobina. La impedancia de la bobina depende de la frecuencia angular con la cual se está excitando a la misma (Ver Figura 2-4 y ecuación 2-2). Como se requiere la inductancia de la bobina, y no la impedancia de la misma, esta se puede obtener a través de la ecuación 2-2, la cual se presenta despejada en la ecuación 2-7:

$$\text{Inductancia} = \frac{Z_L}{w} \quad (2-7)$$

Cabe notar que la frecuencia w se mide de forma angular, pero la mayoría (sino todas) de las fuentes de voltaje alterno expresan su frecuencia en Hertz ([Hz]). Para obtener el valor en Hertz de una fuente de voltaje alterno f a través de la medida angular w se tiene que usar la ecuación 2-8:

$$w = 2\pi f \quad (2-8)$$

Combinando la ecuación 2-6, 2-7 y la 2-8 se tiene el cálculo de la inductancia en la bobina, la cual se presenta como la ecuación 2-9:

$$\text{Inductancia} = \frac{V_x \cdot R}{2\pi f \cdot V_r} \quad (2-9)$$

Cabe notar que la implementación del puente auto-balanceado requiere de medidores de voltajes V_x y V_r que no están incluidos en el AO. Se requiere de un sistema completo especial para llevar a cabo la medida de impedancia mediante este puente.

Sistema medidor de inductancia a través del CI AD5933

El CI AD5933 es un sistema completo para la medición de impedancias complejas, y está basado en la teoría del puente auto-balanceado explicado anteriormente. Este CI fue el elegido para desarrollar el subsistema de adquisición de datos de inductancia.

En esta subsección se explica la manera en que funciona este circuito integrado, y las tareas generales que realiza para obtener una medida válida, precisa y rápida de la inductancia de una bobina, con el fin de entender conceptualmente su funcionamiento. La descripción detalla de la programación de este CI, será presentada en el capítulo 3.

El circuito integrado AD5933 es un sistema completo para medir impedancias desarrollado por la empresa Analog Devices [6]. También se puede decir que el AD5933 es un convertidor de impedancia, el cual convierte los valores particulares de voltaje para cada impedancia en el dominio de tiempo, al dominio de la frecuencia.

El diagrama general de las funciones que realiza este circuito integrado se muestra en la Figura 2-6. Nótese que se marca en azul, la parte de un puente auto-balanceado más notoria en este CI (Ver Figura 2-5 b), la cual corresponde al amplificador operacional en la conexión inversora.

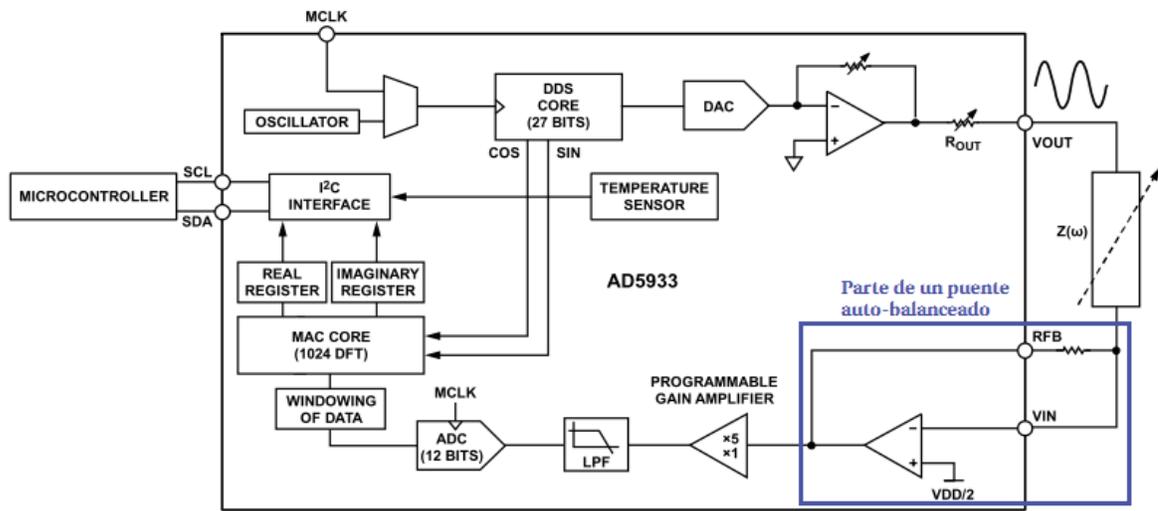


Figura 2-6. Diagrama general de las funciones del CI AD5933 (Fuente: [6]).

Como se nota en la Figura 2-6, el AD5933 realiza muchas tareas especializadas, las que se describen a continuación:

- Síntesis Digital Directa (DDS): Es un método o técnica que permite generar señales de alta representación o pureza desde una representación digital de la misma [7], es decir, es un generador de señales digitales de alta precisión. Particularmente para el AD5933, el DDS puede generar frecuencias con una resolución de 0.1 [Hz] [6]. Cabe notar que las señales representadas digitalmente, son senoides con una frecuencia determinada, y una amplitud a determinar en una etapa de amplificación posterior.
- Convertidor Analógico a Digital (DAC): Se requiere excitar a la bobina para hacer uso del método del puente auto-balanceado, pero la excitación debe ser realizada por una señal senoidal lo más pura posible. El módulo encargado de esto es el DAC el cual toma la palabra binaria (digital) de 27 bits, y la convierte en un nivel de voltaje asociado a la información escrita en esa palabra. La combinación de los voltajes consecutivos a la salida del DAC, forma la señal sinusoidal que excita a la bobina.
- Amplificador de señal: El amplificador de señal tiene como objetivo cambiar la amplitud de la señal del voltaje del ADC para adecuarse a los requerimientos de potencia y latencia de la bobina. Esta amplificación solo cambia la magnitud de la señal recibida y no su frecuencia. Para realizar esta amplificación se utiliza un AO de ganancia programable. Nótese de la Figura 2-6 que solo el AO encerrado en un cuadro azul (abajo) es parte del sistema del puente auto-balanceado descrito anteriormente.
- Pines VIN y VOUT: Entre los pines de VIN y VOUT se conecta la impedancia que se quiere describir mediante este CI AD5933. Nótese que desde el pin VOUT se excita a la bobina con una frecuencia, o grupos de frecuencias conocidas, y desde el pin VIN se recibe las señales senoidales análogas modificadas por la bobina en particular. Como la conexión de la bobina es bidireccional, no es necesario especificar a qué pin se conectará cada terminal de la bobina.
- AO para el puente auto-balanceado: En la Figura 2-6 inferior derecha, encerrado entre un rectángulo azul, se encuentra el AO que es usado para seguir el funcionamiento típico del

método del puente auto-balanceado, el cual fue descrito anteriormente, y por el cual se puede obtener la impedancia de una bobina por el balanceo automático del puente.

- Filtro Pasa Bajos (LPF): El filtro pasa bajos es un filtro de frecuencia el cual permite el paso a ondas sinusoidales con una cierta frecuencia máxima o menores que ellas. Este filtro permite que se cumple el teorema de Nyquist, o de la frecuencia máxima de muestreo, el cual permite que se pueda analizar a las ondas sinusoidales en una etapa posterior.
- Convertidor Análogo a Digital (ADC): El convertidor análogo a digital convierte la señal sinusoidal a cierta frecuencia en una palabra digital de 12 bits. Esta conversión se hace necesaria para realizar en análisis siguiente, el cual solo es válido para señales digitales o discretas.
- Transformada Discreta de Fourier (DFT): La DFT es la versión de la transformada de Fourier para elementos discretos en el tiempo, y en amplitud, que permite cambiar el dominio temporal de una señal discreta en el tiempo, en un dominio frecuencial [8]. Una aplicación típica de la DFT es realizar el análisis espectral de una señal discreta, el cual consiste en la separación de la misma en sus componentes, particularmente en sus componentes reales e imaginarios. Debido a esto último, se puede obtener la parte real e imaginaria asociada con la impedancia de una bobina. Estos datos se guardan en 2 registros independientes, un registro con la impedancia real o resistencia, y otro con la impedancia imaginaria o reactancia. La obtención de la impedancia real e imaginaria de una bobina no se obtiene directamente de estos registros, sino que se debe compensar mediante una fórmula matemática simple, la cual se verá en secciones posteriores.

En la Figura 2-7 se muestra el diagrama de flujo que resume el funcionamiento del CI AD5933.

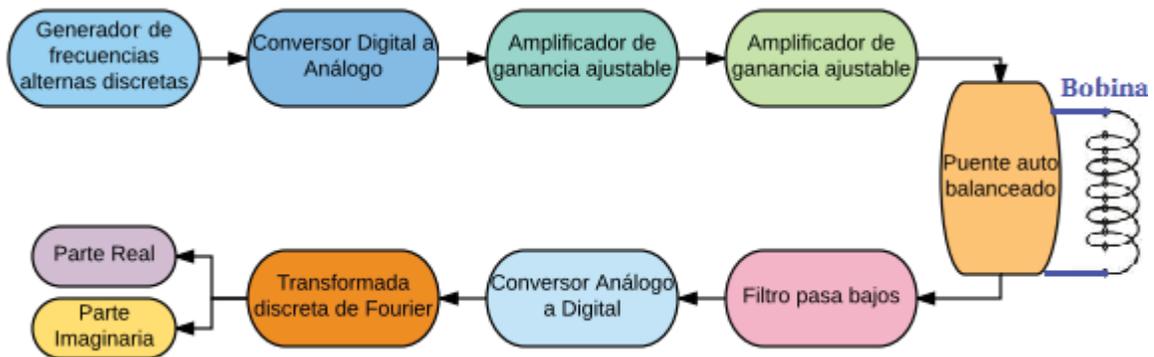


Figura 2-7. Diagrama de flujo de las tareas del CI AD5933.

Nótese de la Figura 2-7 que las tareas que realiza el AD5933 son muchas más que las presentadas anteriormente del puente auto-balanceado. El AD5933 garantiza un rango y una precisión en las medidas menores al 1% [6].

Método del cálculo de la inductancia de una bobina a través del CI AD5933

Una vez que las tareas del AD5933 están finalizadas (ver Figura 2-7), se obtienen dos valores relacionados a la parte real e imaginaria de la inductancia conectada entre sus terminales. Los valores reales e imaginarios se guardan en registros digitales que se describirán en detalle en el capítulo 3.

El cálculo de la magnitud de la impedancia se presenta en la ecuación 2-10 [6], que se presenta en la página siguiente.

$$\text{Impedancia} = (\text{Factor de ganancia} \cdot \text{Magnitud})^{-1} \quad (2-10)$$

Donde la Magnitud se obtiene mediante la ecuación 2-11.

$$\text{Magnitud} = \sqrt{R^2 + I^2} \quad (2-11)$$

Donde el valor de R corresponde al código, en formato decimal, del valor guardado de la parte real de la impedancia, e I corresponde al valor guardado de la parte imaginaria de la impedancia.

El valor del factor de ganancia se obtiene mediante un proceso de calibración del CI AD5933. Este proceso consiste en colocar una resistencia de calibración entre los pines 4 y 5 del CI (ver Figura 2-6, recuadro azul) y colocar una resistencia conocida entre los terminales VIN y VOUT del CI (ver Figura 2-6), para luego empezar el proceso normal del AD5933 y obtener los valores R e I de los registros reales e imaginarios respectivamente. Con este procedimiento, el cálculo del factor de ganancia se especifica en la ecuación 2-12 [6].

$$\text{Factor de ganancia} = \frac{1}{\frac{\text{Impedancia de prueba}}{\text{Magnitud de calibración}}} \quad (2-12)$$

Cálculo de la Fase de una bobina

Nótese de la ecuación 2-11, que el valor calculado corresponde al valor de la magnitud de la impedancia o inductancia a leer, pero no el de su fase. Lo requerido para calcular la inductancia de la bobina, es la parte imaginaria o reactancia de la misma.

Se puede estar tentado a asumir que lo que está presente en registro imaginario corresponde a la parte imaginaria de la impedancia, pero esto no es así, debido a que el valor de la magnitud es multiplicado por un factor de ganancia para obtener la magnitud real calculada, por lo tanto, el valor del registro imaginario no corresponde directamente con el valor de la parte imaginaria de la impedancia.

Existe otra forma para realizar el cálculo de la parte imaginaria de la bobina, y es en base al siguiente procedimiento [6]:

1. Se calcula la fase cuando se conecta un simple resistor entre VIN y VOUT.
2. Se calcula la fase cuando se conecta la bobina que se quiere medir.
3. Se restan las fases calculadas anteriormente.

El cálculo de las fases de cualquier impedancia se obtiene mediante la ecuación 2-13.

$$\text{fase} = \tan^{-1}\left(\frac{I}{R}\right) \quad (2-13)$$

Donde I es el contenido, en formato decimal, del registro imaginario de datos, y R es el contenido del registro real de datos, en formato decimal.

El objetivo del procedimiento del cálculo de la fase es compensar el atraso que experimenta la fase de cualquier bobina, debido a la circuitería interna del CI AD5933. Por lo tanto, la fase real de cualquier inductancia, en especial de una bobina, se calcula mediante la ecuación 2-14.

$$\text{fase real de la inductancia} = \theta - \beta \quad (2-14)$$

Donde θ corresponde a la fase calculada, mediante la ecuación 2-13, de la inductancia desconocida, y β corresponde a la fase de una resistencia, calculada de igual forma.

Cálculo de la inductancia de una bobina

El valor de la inductancia de una bobina está asociado al valor de la parte imaginaria de su impedancia, o su reactancia inductiva. Debido a esto es necesario obtener este valor para obtener el valor de inductancia.

El cálculo de la reactancia inductiva para una bobina se obtiene como:

$$\text{Reactancia inductiva} = (\text{Impedancia calculada}) \cdot \sin(\text{fase real de la inductancia}) \quad (2-15)$$

Debido a la ecuación 2-15, el valor de la inductancia de una bobina se obtiene como:

$$\text{Inductancia real de una bobina} = \frac{\text{Reactancia inductiva}}{\text{Frecuencia de operación}} \quad (2-16)$$

Donde la frecuencia de operación (w) está dada en radianes por segundos. De esta forma se obtiene el valor final de la inductancia, que es lo deseado para obtener una medida calculada de la ley de hierro presente en una mezcla acuosa del material ferroso minero.

En la Figura 2-8 se presenta un esquema resumido de los pasos necesarios para obtener el valor de la inductancia de una bobina a través del CI AD5933. En esta figura se resumen los cálculos que se deben realizara en las ecuaciones 2-10 hasta la 2-16.

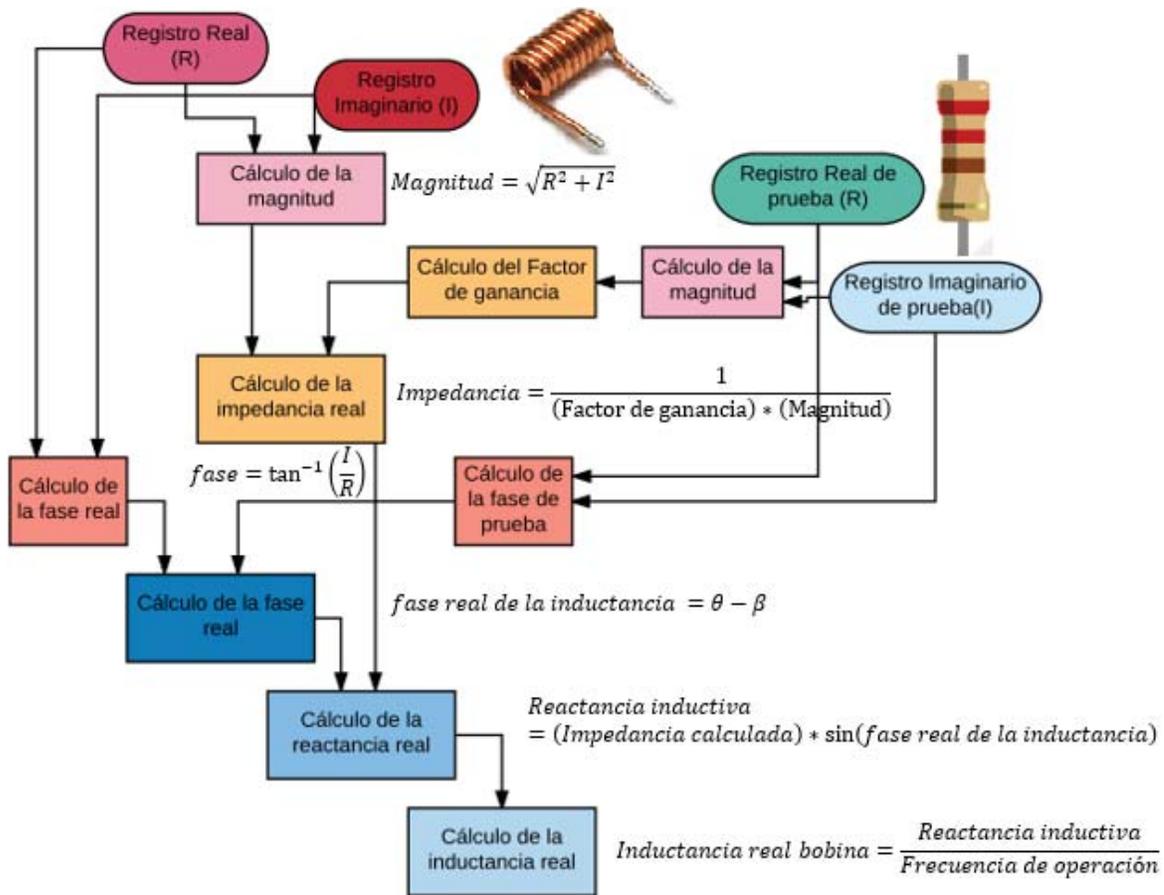


Figura 2-8. Resumen del procedimiento para el cálculo de la inductancia por el CI AD5933.

2.2.2 Descripción del sistema de interpretación de datos y obtención de resultados

La subtarea de interpretación de datos y obtención de resultados sigue después de la subtarea de adquisición de datos (ver Figura 2-1). Consiste en la interpretación del dato digital obtenido luego de la medición de la inductancia, el cual estará en unidades de la misma (Henry o [Hy]), pero no en unidades de ley de hierro (porcentaje [%]). En esta tarea se convierte la medida de inductancia en una medida válida de la ley de hierro.

El proceso de convertir la medida de inductancia, obtenido de la subtarea de adquisición de datos, en la medida de la ley de hierro, se basa en el uso de una fórmula matemática similar a la ecuación 2-17. Esta ecuación toma como entrada el valor de la inductancia obtenida de la ecuación 2-16 proveniente de la medición realizada por el AD5933.

$$\text{Ley de Hierro} = \frac{\text{Inductancia bobina[Hy]} \cdot \text{Factor de relación (K)}}{\% \text{ Sólido}[-] \cdot \text{Densidad} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} \quad (2-17)$$

La ecuación 2-17 describe la forma genérica de la relación entre la inductancia de la bobina sensora, y la ley de hierro, más otros parámetros que serán explicados a continuación:

- Inductancia de la bobina: Se relaciona con la ley de hierro de forma directa, lo cual fue explicado en el capítulo 1.
- % de Sólido: La relación entre la ley de hierro y la inductancia está relacionada con el porcentaje de sólido de la pulpa con material ferroso, presente en la tubería minera [2]. Debido a esto, el porcentaje de sólido se incluye de forma directa para el cálculo de la ley de hierro según la ecuación 2-17. El valor de este porcentaje de sólido se encuentra (indirectamente) a través de otro dispositivo llamado densímetro.
- Densidad: La densidad de la muestra también se relaciona con la medida de la ley de hierro. Su relación se entiende debido a la relación de esta medida con la densidad del sólido presente. El valor de la densidad de la pulpa se encuentra a través de otro dispositivo llamado densímetro.
- Factor de corrección K: El factor K es un término que relaciona a los otros 3 explicados anteriormente con la ley de hierro de forma única, para asegurar una adecuada medida del porcentaje de hierro presente en la muestra. El valor del factor K debe determinarse de forma empírica en alguna planta de CAP. Este factor también puede encontrarse de forma empírica en ambientes de laboratorio.

Nota: La ecuación 2-17 es una representación genérica de la forma por la cual se obtiene la medida de la ley de hierro a través de la medida de la inductancia. Esta ecuación es genérica debido a que el factor K está indeterminado hasta que se encuentre empíricamente en la planta en un proceso de calibración.

2.3 Descripción de la interfaz para el intercambio y comunicación de datos

La interfaz para el intercambio y comunicación de datos tiene por objetivo ser el soporte virtual para que la información de la medida de la ley de hierro (calculada de forma similar a la ecuación 2-17) sea guardada, depurada y presentada en múltiples dispositivos de una forma clara y oportuna. Es un sistema posterior al sistema electrónico para la medición confiable de la inductancia de la bobina.

2.3.1 Almacenamiento de datos

El almacenamiento de datos o de resultados de la medición de la inductancia de la bobina, tiene por objetivo realizar un respaldo de la información que se recibe desde el sistema electrónico de medición de la ley del hierro (ver Figura 2-1). Esta información será respaldada, debido a que con ella se pueden realizar una serie de análisis con los cuales inferir una idea del funcionamiento actual del proceso de purificación del concentrado de hierro, como también un análisis histórico y futuro del mismo.

El almacenamiento de los datos se puede realizar de dos maneras: de forma interna o de forma externa. La forma interna se basa en que los datos son guardados en una memoria física cercana a los dispositivos electrónicos de medida y control. La forma externa se basa en almacenar los datos en memorias muy lejanas al lugar al lugar desde donde se producen. Normalmente el transporte y visualización de estos datos se hace a través de internet. Las ventajas que posee esta última forma es que; en caso de accidente local donde se vea afectado el microcontrolador o el sensor, los datos seguirán almacenados de forma indefinida. Otra ventaja es la mayor comodidad al acceso de la información por parte de uno o múltiples solicitantes, ente muchas otras.

En la Figura 2-10 se muestra el diagrama típico de almacenamiento de datos de forma externa o remota.



Figura 2-9. Diagrama típico de almacenamiento de datos de forma externa (fuente: wordpress.com)

2.3.2 Mostrar y depurar resultados

Se obtienen los datos de inductancia del microcontrolador, los cuales se pueden almacenar de forma interna como externa, pero también se necesitan visualizar (ver Figura 2-1). La forma obvia de hacer la visualización de datos es a través de una pantalla que debería estar cerca de la bobina de medición, o en algún lugar adecuado de la planta de concentrado de hierro-. Esto con el fin de usar esa información para llevar un análisis actual del proceso y realizar acciones correctivas en caso de que se requieran.

Existe una forma no tan obvia de realizar la visualización de datos los cuales se basa en observarlos en pantallas de dispositivos que pueden, o no, estar en la cercanía de la planta, pero

todos ellos pueden acceder a los datos a través de internet mediante una dirección común, tal como se presentó en la sección 2.4.1.

2.4 Conclusiones y comentarios finales del capítulo

El sistema electrónico implica mucho más que solo medir la inductancia de la bobina sensora de forma idónea, sino que también implica el almacenamiento de esos datos y la presentación de forma adecuada de los mismos. La medición de la inductancia debe hacerse mediante un circuito electrónico especial, debido a que los inductómetros comerciales podrían no adecuarse a las condiciones de operaciones de la planta minera. La adquisición e interpretación de los datos de medición de la inductancia se harán mediante un microcontrolador especializado, basándose en la capacidad de estos de conectarse con elementos periféricos fácilmente. El almacenamiento de datos se hará de las 2 maneras mostradas, pero la forma principal será el almacenamiento externo, y el interno se ocupará como respaldo de la información. La visualización de datos se hará de forma presencial mediante una pantalla local, y también se visualizará en cualquier dispositivo que pueda conectarse a internet y que posea pantalla.

Cabe notar que el cálculo de la inductancia de la bobina no es un proceso interno del AD5933, ya que este CI solamente devuelve el valor de sus registros reales e imaginarios. Le corresponde al microcontrolador calcular este valor mediante las ecuaciones presentadas en este capítulo.

Otra razón importante para almacenar los datos de ley de hierro, es que este dispositivo normalmente no posee una amplia cantidad de memoria interna, por lo que no podría guardar una cantidad importante de datos, que representen los porcentajes de concentración de hierro en la tubería por días, meses e incluso años.

El desarrollo del sistema presentado conceptualmente en la Figura 2-1, se presenta en el capítulo 3.

3 Desarrollo de la solución

El objetivo principal del sistema electrónico a construir para la adquisición de datos, es el de medir de la forma más exacta posible, la inductancia de la bobina (ver Figura 2-1), la cual tiene relación directa con el porcentaje de hierro de la muestra del material minero, que es la variable deseada final del sistema que se fabricó.

En este capítulo se describen los componentes, las conexiones y la programación de los elementos elegidos para llevar a cabo la solución.

3.1 Descripción de los componentes

En el capítulo 2 se presentaron los sistemas y subsistemas a desarrollar por la solución o sistema propuesto (ver Figura 2-1), que pueden resumirse como: un sistema electrónico para la medición de la ley de hierro y una interfaz gráfica para el intercambio y comunicación de datos. Cada una de estas tareas es hecha de forma automática por componentes reales o virtuales que fueron elegidos para su uso. En esta subsección se describen los componentes elegidos.

3.1.1 Bobina sensora

El sensor a ocupar es una bobina, la cual se enrolla sobre la tubería por donde circula el material ferroso (ver Figura 1-4). Esta bobina es la primera etapa descrita en la Figura 2-1. En la Figura 3-1 se presenta una bobina real fabricada para ser ocupada en pruebas de laboratorio.

El valor de inductancia de esta bobina fue establecido en 4.96 [mHy], debido a que es el valor de la bobina anterior fabricada por el señor Jesús Martínez [2].

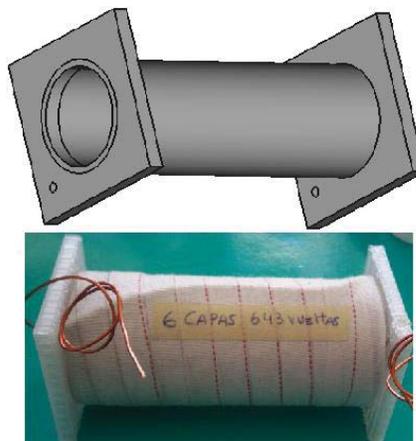


Figura 3-1. Bobina real fabricada, junto con el modelo 3D de su base.

3.1.2 Circuito Integrado AD5933

El circuito integrado AD5933 es el corazón o elemento fundamental del sistema construido. Mediante este CI se puede obtener parámetros precisos relacionados con la impedancia particular de cada bobina sensora.

En la Figura 3-2 se muestra el AD5933 encerrado en un cuadro de color naranja. Nótese que el CI está soldado a una placa de desarrollo. Nótese también lo pequeño del circuito integrado.

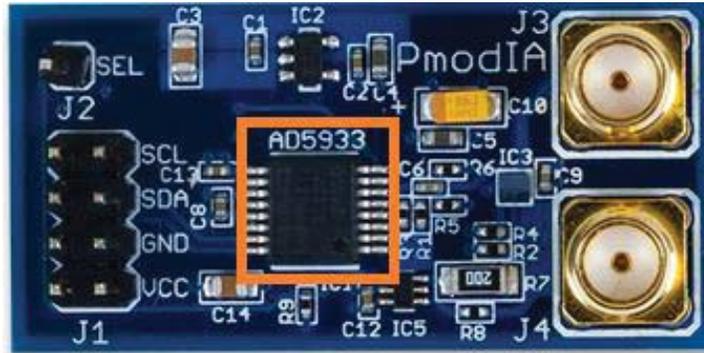


Figura 3-2. CI AD5933 montado sobre una placa (Fuente: digilentinc.com).

Descripción de la comunicación con el CI AD5933

La comunicación externa con el circuito AD5933 se realiza mediante una interfaz I2C, la cual se muestra a la izquierda, marcado en un recuadro rojo, de la Figura 3-3. En esta figura se puede ver también la conexión hacia la bobina, marcada en un recuadro azul en la parte derecha. Nótese que la conexión de la bobina se realiza mediante los pines marcados como VOUT o salida de señal alterna hacia la bobina, y VIN o entrada de la señal alterna al AD5933.

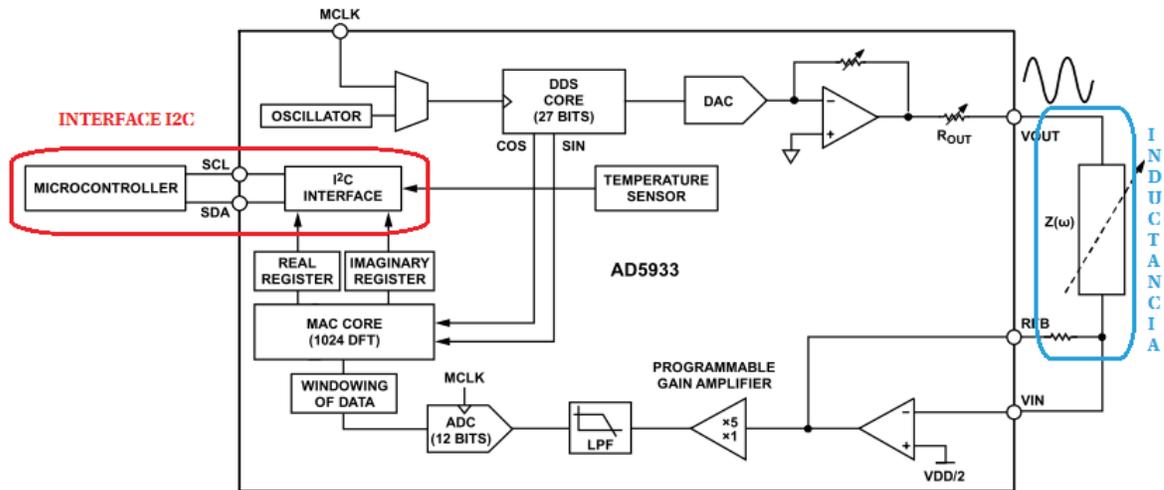


Figura 3-3. Diagrama general simbólico del CI AD5933 (Fuente: [6]).

La interfaz I2C consiste en un sistema físico por el cual se transmite información en serie por una única línea, la cual es llamada SDA (Data). Existe otra línea llamada SCL (Clock) que sirve como reloj para sincronizar los tiempos de envío y recepción entre los elementos conectados al bus I2C.

También existen resistencias entre Vcc y las líneas SDA y SCL cuyo fin es subir o mantener un nivel de voltaje alto en el puerto, tal como lo exige el protocolo I2C.

El modelo de conexión de elementos al puerto I2C se muestra en la Figura 3-4. En esta figura se observa la única línea de datos existente.

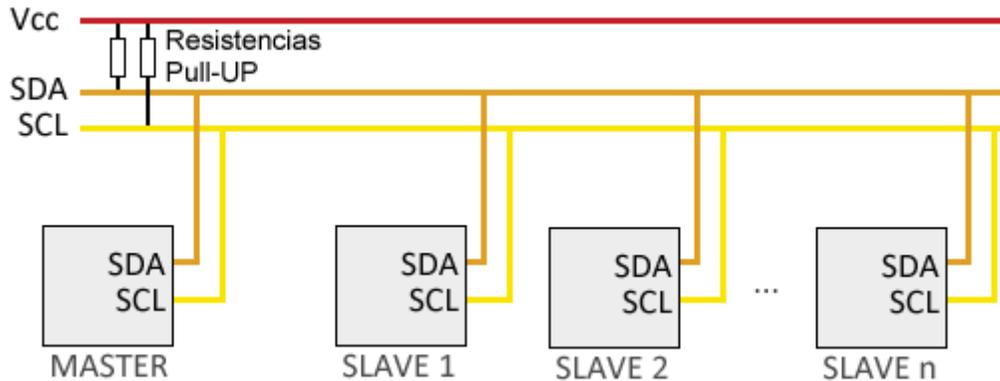


Figura 3-4. Modelo de conexión de elementos al puerto I2C (Fuente: <https://www.luisllamas.es>)

Nótese que existe un dispositivo que puede solicitar datos, llamado Master (amo), a otros dispositivos, llamados Slave (esclavos) que estén conectados al mismo puerto I2C. Estas peticiones o intercambio de información se hacen mediante procesos de lectura y escritura de datos (bytes) que se cargan, suben o escriben al puerto I2C, para luego ser leído por otro elemento del mismo puerto. Cabe mencionar que cualquier elemento del puerto, tanto Master como Slave pueden leer o escribir datos al puerto, uno a la vez, pero solo el Master maneja el proceso o sistema de comunicación; definiendo el inicio, desarrollo y término de la misma.

El sistema físico de la interfaz I2C se basa en que un dispositivo con conexión a este puerto, como un microcontrolador (ver Figura 3-3 izquierda), funciona como un Master y programa al CI AD5933, que funciona como esclavo, mediante la conexión de este integrado al mismo puerto. Esta interfaz es similar a la mostrada en la Figura 3-4, pero con solo un Slave.

Interfaz I2C mediante registros digitales

La comunicación del AD5933 (esclavo) con el Master es realizada mediante la única línea de datos SDA (ver Figura 3-3), lo que implica que solo un bit o nivel de voltaje (bajo o alto) es transmitido a la vez, pero la forma en que este circuito integrado maneja la información que escribe o recibe de la línea SDA es agrupada mediante 8 niveles de voltaje continuos en el tiempo, llamados registros de datos (Registers). Una descripción visual de estos registros digitales de 8 bits se muestra en la Figura 3-5.



Figura 3-5. Registro de datos de 8 bits (fuente: vidaembebeida.wordpress.com)

El procesamiento, almacenamiento, escritura, lectura y programación del CI AD5933 se hace en base al manejo de registros digitales de 8 bits. La programación de este CI se verá en una sección posterior de este mismo capítulo.

3.1.3 Tarjeta Raspberry Pi 3

Las tarjetas electrónicas de desarrollo son dispositivos físicos que permiten probar, depurar e implementar desarrollos electrónicos de variadas dificultades; desde pequeños proyectos hasta sistemas completos, mezclando potencia de cálculo en una pequeña tarjeta electrónica programable. En la Figura 3-6 se muestra una de las tarjetas de desarrollo más populares, cuyas características serán presentadas en las siguientes secciones.



Figura 3-6. Tarjeta Raspberry Pi 3. (Fuente: amazon.es)

3.1.4 Características de la Raspberry Pi 3

La tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 tiene múltiples características importantes, pero particularmente para este proyecto, son decisivas solo unas cuantas. Estas características son resumidas en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Características importantes de la Raspberry Pi 3.

Tarjeta de desarrollo	Raspberry Pi 3
Velocidad de reloj	1.2 [Gb] a 64 bits
Memoria RAM	1 [GB]
Salida de Video	HDMI, DSI, Video compuesto
Comunicación por Ethernet	LAN 10/100
Comunicación Inalámbrica	Genérico BLE 4.1, Wi-Fi
Puerto I2C	Sí posee
Pines de entrada/salida	40 GPIO digitales

La tarjeta Raspberry Pi 3 es una tarjeta de desarrollo electrónico que es prácticamente un computador en miniatura, la cual está fabricada para crear soluciones de software potentes, y de hardware aceptables, aunque no es tan eficiente en hardware como la tarjeta Arduino DUE. Como es un computador en miniatura, puede desarrollar tareas avanzadas como comunicación

genérica inalámbrica y alámbrica de alta velocidad, salida y procesamiento de video genérico, entre muchas otras tareas complejas.

La tarjeta Raspberry Pi 3 es un computador completo encapsulado en un pequeño espacio. Dentro de las múltiples características de este computador, las útiles a este proyecto son:

- Computador poderoso capaz de realizar complejas tareas de procesamiento.
- Capacidad para poder comunicarse con el exterior, a través de los pines GPIO. Esto le permite conectarse a sensores y a actuadores. También posee comunicación por el protocolo I2C, lo que permite su conexión al CI AD5933.
- Posee comunicación directa o salida directa con una etapa de video, la cual permite manejar y mostrar contenidos por una pantalla. Cabe notar que esta tarea sería muy complicada para otros microcontroladores actuales (como Arduino) debido al poder de cálculo necesario para ella.
- Permite conectarse con dispositivos o sistemas exteriores con facilidad. Esta tarjeta permite:
 - Conectarse a una red wifi de forma genérica y sin dispositivos externos.
 - Conectarse con otro dispositivo inalámbrico mediante el protocolo Bluetooth, sin dispositivos externos.
 - Permite conectarse a una red local o global (internet) mediante un puerto LAN.
- Permite expandir su capacidad de memoria mediante memorias externas micro SD.

Una imagen de esta tarjeta, con la descripción de sus componentes, se muestra en la Figura 3-7.

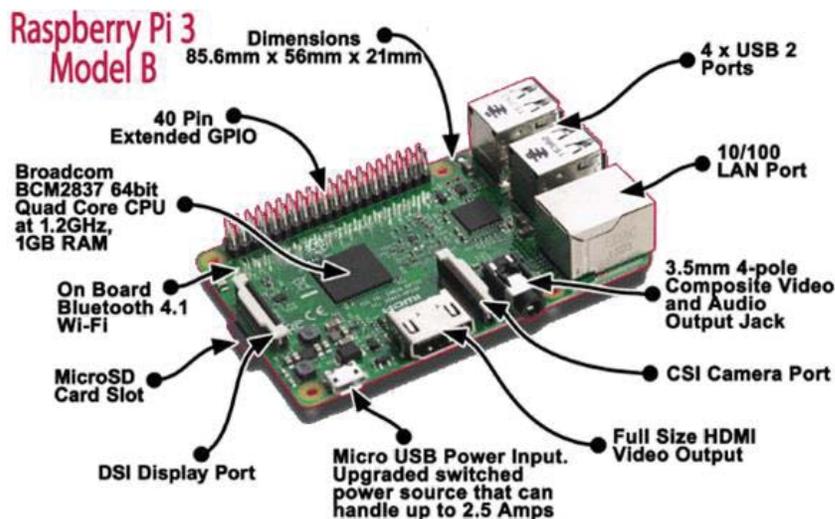


Figura 3-7. Elementos de la tarjeta Raspberry Pi 3 (fuente: <https://cenaptec.com>).

Conexión de la Raspberry Pi 3 con el CI AD5933

Una tarea importante de la interfaz a diseñar, es la depuración e interpretación de la información proporcionada por el AD5933, por lo tanto, debe existir comunicación entre estas dos tarjetas. De la Figura 3-3 se nota que la comunicación con los registros de salida de AD5933 son a través del puerto serial I2C. De la Tabla 1-1 se nota que una clase de comunicación externa de la tarjeta Raspberry Pi 3, es a través del puerto I2C, por lo tanto, puede existir comunicación entre estas dos tarjetas. Esta subsección describe el puerto I2C de la Raspberry Pi 3.

La tarjeta Raspberry Pi 3 posee pines de entradas y/o salidas digitales, agrupados bajo el nombre de GPIO (Gate Port In Out) o puerto de entrada/salida de propósito general [9]. El puerto I2C está ubicado en un par de pines GPIO de esta tarjeta, tal como se muestra en la Figura 3-8.

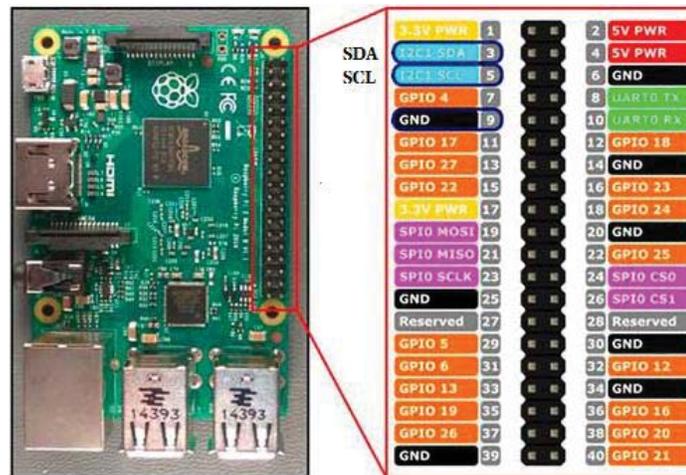


Figura 3-8. Puerto GPIO de la tarjeta Raspberry Pi 3, (Fuente: <https://itblogsogeti.com>).

Nótese de la Figura 3-8, como están marcados los pines característicos de la conexión I2C; SDA y SCL en los pines 3 y 5 respectivamente. La conexión entre las tarjetas se debe realizar conectando los pines SDA y SCL de cada tarjeta. La comunicación entre la tarjeta Raspberry Pi 3 y el circuito integrado AD5933 será descrita de forma conceptual y visual en una siguiente sección.

3.1.5 Display táctil LCD

El display táctil LCD es la pantalla oficial de la Raspberry Pi, debido a esto, está diseñada para ofrecer el mejor compromiso entre calidad, capacidad y conexionado idóneo con la tarjeta Raspberry Pi. En la Figura 1-6 se muestra esta pantalla.



Figura 3-9. Componentes de la pantalla LCD oficial, (fuente: rcomponents.com).

A continuación, se listan sus principales características:

- Pantalla con múltiples entradas de datos. Permite reconocer hasta un máximo de 10 entradas diferentes (dedos).
- Pantalla de 7 pulgadas.
- Resolución de 800 x 480 pixeles a 60 tramas por segundo (fps).
- Colores RGB a 24 bit.
- Ángulo de visión de 70°.
- Solo requiere 2 conexiones de la Raspberry Pi.
- Fuente de poder flexible.
- Insensible a la interferencia electrónica.
- Posee la mejor funcionalidad en el uso de la Raspberry Pi.

Conexión del Display LCD con la raspberry Pi 3

Una capacidad importante y útil para el sistema completo, o la interfaz de comunicación e intercambio de datos, es la capacidad de mostrar visualmente los resultados útiles del proceso, tal como el porcentaje de ley en una pantalla o display. Este display debe ir conectado al Raspberry Pi 3 mediante uno de los puertos especializados de video mostrados en la Tabla 3-1. En la Figura 3-10 se muestra la conexión de una pantalla táctil de 7 pulgadas, la cual es una pantalla genérica para el Raspberry Pi.



Figura 3-10. Raspberry Pi 3 conectado a una pantalla táctil de 7 pulgadas (Fuente: <http://docs-europe.electrocomponents.com>)

Como se nota en la Figura 3-10, se tiene una Raspberry Pi 3 conectado a una pantalla táctil mediante el puerto para display DSI (ver Figura 3-7), mediante una conexión con un cable tipo plano de 15 pines. Este cable va hacia la tarjeta de la pantalla táctil, la cual está debajo del Raspberry Pi 3 en la Figura 3-10.

Las tareas descritas en el capítulo 2 deben hacerse mediante componentes reales o virtuales, que se eligieron, describieron, adquirieron, conectaron y programaron para obtener un sistema completo idóneo para la solución. En la sección 3.2. de este capítulo, se describe la forma particular de la conexión eléctrica o electrónica de los dispositivos elegidos. En la sección 3.3 se describe la programación de estos elementos.

3.2 Conexión física de componentes

La conexión entre el Master (Raspberry Pi 3) y el Slave (CI AD5933) se realiza a través del puerto I2C, el cual solo indica un protocolo físico de conexión. Además, el AD5933 debe alimentarse con un voltaje de corriente directa entre los pines de alimentación, y además debe tener una conexión segura y robusta a la bobina mediante un conector especial. Se necesita dar soporte físico a los componentes del sistema completo, en especial al CI AD5933.

En esta subsección se presentan los trabajos realizados con el fin de dar soporte físico a los elementos del sistema general.

El diagrama de conexiones del circuito integrado AD5933 se muestra en la Figura 3-11. Nótese como las conexiones a este CI son relativamente pocas, pero resultan ser de mayor precisión debido al reducido tamaño del componente.

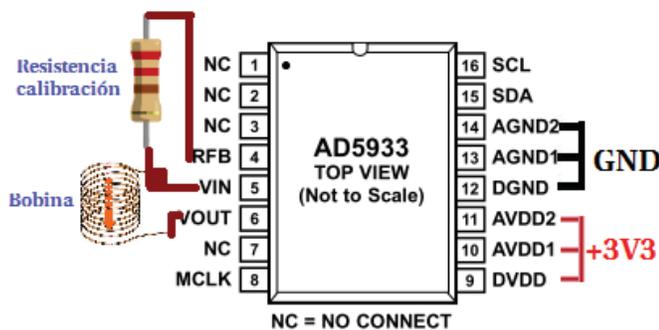


Figura 3-11. Diagrama de conexiones del circuito integrado AD5933.

En la Figura 3-12 se muestra la conexión general de todos los elementos descritos en este capítulo.



Figura 3-12. Diagrama general de conexión física del sistema completo.

3.3 Programación de componentes

Los componentes descritos en este capítulo son los encargados de llevar a cabo las tareas de este proyecto, e implementar los sistemas que lo componen, tal como se mostró en el capítulo 2 (ver Figura 2-1).

En esta sección se describen las tareas de programación de los componentes presentados, en especial, del CI AD5933 por ser éste el núcleo del proyecto.

3.3.1 Programación del CI AD5933

El CI AD5933 es el corazón de la solución electrónica para la medición de la bobina sensora, y por ende, de la medición electrónica de la ley de hierro. Este circuito integrado realiza muchas tareas internas para la medición de la inductancia, pero no lo hace de forma automática. Se deben programar estas tareas o funciones. La programación de estas tareas implica una comunicación con el CI AD5933, por parte de un elemento programador externo que es la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3.

La programación y comunicación con el CI AD5933 se hace a través de un puerto serie como lo es el puerto I2C, y la base de comunicación con este puerto se hace a través de registros de datos de 8 bits (ver sección 3.1.2).

El CI AD5933 posee una extensa documentación de las funciones del mismo, las cuales son necesarias para programarlo. Estas funciones se activan mediante lectura y escritura arreglos de 8 bits específicos, llamados registros, cuyo acceso se tiene a través del puerto I2C. El conjunto de todos los registros de este CI se llama mapa de registros.

Cabe mencionar que el sistema de registros es el medio físico o electrónico de programación, en el cual se describen funciones en formato de 8 bits, pero estas funciones también pueden ser descritas en formato simbólico; desarrollándolas y expandiéndolas como una explicación conceptual de las mismas y sin considerar el registro electrónico asociado. En siguientes subsecciones se describirán las funciones a programar de forma simbólica.

Mapa de registros del CI AD5933

El mapa de registros del CI AD5933 agrupa a 9 registros electrónico con finalidades diferentes, los cuales son escritos, leídos o ambos (según corresponda), cuando se realiza la conexión con el Master externo (Raspberry Pi 3) para el correcto funcionamiento del medidor de impedancia.

En la Tabla 3-2 y Tabla 3-3 (página siguiente), se presentan los 9 registros accesibles desde el puerto I2C por parte del Raspberry Pi 3 (ver Figura 3-4 y 3-12).

Tabla 3-2. Mapa de registros del CI AD5933 parte 1 (fuente: [6]).

Nº Registro	Nombre	Bits Registro	Función
0x80	Control	D15 a D8	Lectura/Escritura
0x81		D7 a D0	Lectura/Escritura

La programación de estos 9 registros definirá las funcionalidades del AD5933.

Tabla 3-3. Mapa de registros del CI AD5933 parte 2(Fuente: [6])

N° Registro	Nombre	Bits Registro	Función
0x82	Frecuencia de inicio	D23 a D16	Lectura/Escritura
0x83		D15 a D8	Lectura/Escritura
0x84		D7 a D0	Lectura/Escritura
0x85	Incremento de frecuencia	D23 a D16	Lectura/Escritura
0x86		D15 a D8	Lectura/Escritura
0x87		D7 a D0	Lectura/Escritura
0x88	Número de incrementos	D15 a D8	Lectura/Escritura
0x89		D7 a D0	Lectura/Escritura
0x8A	Número de configuración de ciclos de tiempo	D15 a D8	Lectura/Escritura
0x8B		D7 a D0	Lectura/Escritura
0x8F	Estatus	D7 a D0	Sólo lectura
0X92	Datos de temperatura	D15 a D8	Sólo lectura
0X93		D7 a D0	Sólo lectura
0X94	Dato real	D15 a D8	Sólo lectura
0X95		D7 a D0	Sólo lectura
0X96	Dato imaginario	D15 a D8	Sólo lectura
0X97		D7 a D0	Sólo lectura

Algunos registros presentes en la Tabla 3-2 y 3-3 fueron descritos en el capítulo 2 (ver sección 2.2.1), como el registro de frecuencia de inicio, o el de incremento de frecuencia, o el número de incrementos. También fueron descritos los registros que guardan el dato real y el dato imaginario del barrido de frecuencias. En esta subsección se expandirá su explicación.

Registro de Control

El registro de control es un registro de 16 bits separado en 2 registros de 8 bits cada uno, el 0x80 y el 0x81. En este registro se pueden comandar, entre otras cosas, una gran cantidad de funciones descritas anteriormente según la combinación de los bits de este registro.

Particularmente se puede programar o controlar el valor de voltaje de salida que alimenta a las terminales de la bobina, este es controlador por la combinación de los bits D10 y D9 del registro

0x81 (ver Tabla 3-2). En la Tabla 3-4 se presentan los valores programados de voltaje de salida posibles para el CI AD5933 [6].

Tabla 3-4. Combinaciones de voltaje de salida debido a D10 y D9 en el registro de control.

D10	D9	N° rango	Rango voltaje
0	0	1	2 [Vpp] típico
0	1	4	200 [mVpp] típico
1	0	3	400 [mVpp] típico
1	1	2	1 [Vpp] típico

Nótese de la Tabla 3-4 que los valores del rango no tienen un orden natural, sino que tiene relación con el nivel de voltaje en la salida, así el mayor voltaje estará en el primer nivel.

En la Tabla 3-5 se muestran las funciones que se pueden programar mediante la combinación de los bits D15 a D12 del mismo.

Cabe mencionar que los pines D15 a D12 programan el control total de las operaciones del AD5933.

Tabla 3-5. Funciones como combinación de los pines D15 a D12 del registro de control

D15	D14	D13	D12	Descripción de la función
0	0	0	1	Inicializar con la frecuencia inicial
0	0	1	0	Empezar el barrido de frecuencia
0	0	1	1	Incrementar la frecuencia
0	1	0	0	Repetir la frecuencia
1	0	0	0	Sin operación
1	0	0	1	Medir temperatura
1	0	1	0	Activar el modo Power-down
1	0	1	1	Activar modo Standby

Es necesario mencionar que las tareas descritas en la Tabla 3-5 son las tareas mencionadas en secciones posteriores. La presentación de ellas, en esta tabla, se hace con el fin de que se entienda la forma física del activación o desactivación de las funciones del CI AD5933. Un ejemplo práctico de esto: es que cuando se requiera empezar el barrido de frecuencia (para obtener como producto final un dato válido en el registro real e imaginario), se debe escribir en el registro 0x80 un valor como 0x80= XXXX0100, en donde las “X” son bits que no importan para activar o no la función.

En la Tabla 3-6 se muestran los valores de los pines especiales del registro de control, que comandan funciones especiales con su activación o desactivación.

Tabla 3-6. Funciones de los bits especiales del registro de control.

Bits	Descripción de los Bits
D11	Sin operación
D8	Ganancia del voltaje de entrada, 0=x5 y 1=x1
D7	Reservado, seteado en 0
D6	Reservado, seteado en 0
D5	Reservado, seteado en 0
D4	Reset
D3	Clock del AD5933, 0=MCLK, 1= Externo
D2	Reservado, seteado en 0
D1	Reservado, seteado en 0
D0	Reservado, seteado en 0

Registro de estado o estatus

El registro de estado o de estatus guarda, en sus 8 bits, información importante sobre el estado de otras funciones que se llevan a cabo en el CI AD5933. En la Tabla 3-7 se muestran los resultados del registro de estados.

Tabla 3-7. Registro de estado (Fuente: [6])

Palabra de control	Descripción de la función
00000001	Medición de la temperatura válida
00000010	Dato real e imaginario válido
00000100	Barrido de frecuencias completo

Configuración de tiempos para acceso a los registros del CI AD5933 mediante el puerto I2C

La programación del AD5933 debe hacerse mediante la línea de datos SDA, por el Master (Raspberry Pi 3), según lo presentado en la sección 3.2. La programación debe escribir o leer en los registros de 8 bits del CI AD5933 para realizar las funciones que se describieron anteriormente. Un esquema de la situación práctica de la comunicación se muestra en la Figura 3-13, la cual se muestra en la página siguiente.

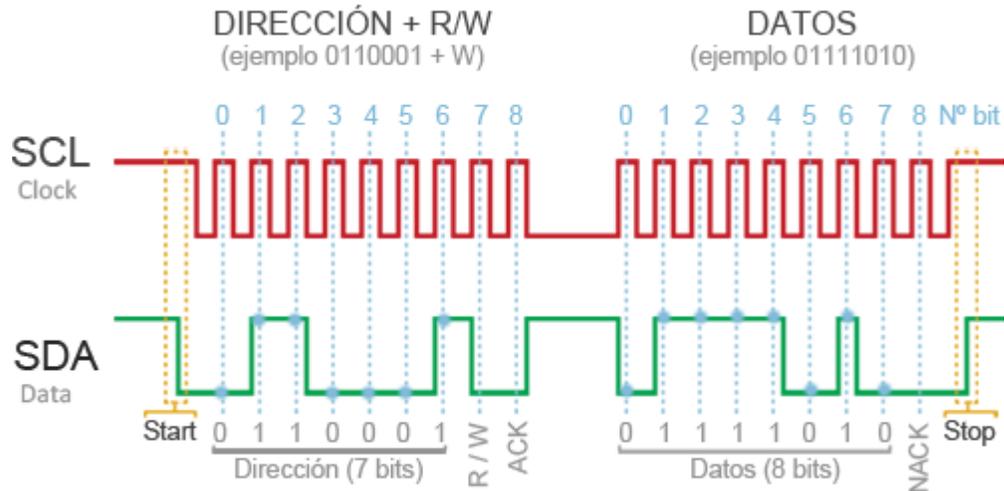


Figura 3-13. Esquema de la comunicación por el puerto I2C para registros de 8 bits (fuente: www.luisllamas.es).

La comunicación en serie por un puerto I2C se basa en el cambio de voltaje de la señal de data (SDA) en el tiempo, de alto a bajo con un significado especial. Para el caso especial de la comunicación con el AD5933 se tiene registros con un largo fijo de 8 bits, por lo tanto, se espera que los datos de entrada, de lectura o escritura hacia o desde el puerto, tengan esa dimensión máxima, tal como se muestra en la Figura 3-13.

Para compensar la falta de líneas de control en el puerto I2C se ocupan condiciones especiales de reconocimiento y no-reconocimiento, partida y parada de transmisión de datos.

El traspaso de información típica de datos entre el Raspberry Pi 3 y el CI AD5933, y viceversa, está mostrado en la Figura 3-14.

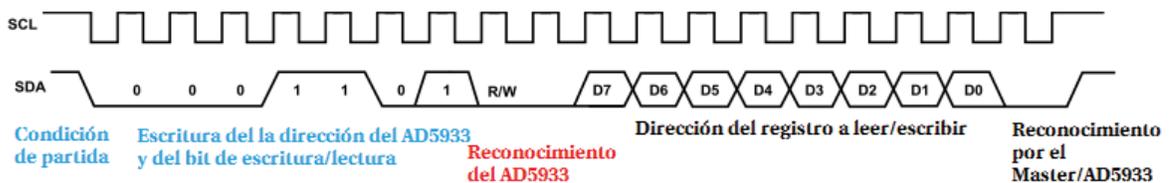


Figura 3-14. Diagrama de tiempos de la comunicación con el AD5933 (Fuente: [6])

La forma de comunicarse con el AD5933 se basa en un simple algoritmo que se repite continuamente. Este algoritmo se basa en que existen solo 2 acciones con respecto al uso del puerto I2C; escritura o lectura del puerto. Ambas acciones son desarrolladas por el Master (Raspberry Pi 3) y el Slave (AD5933), pero solo un elemento ocupa (escribe o lee) el puerto a la vez.

Cabe notar de la Figura 3-14 que las acciones que realiza el Master son nombradas con letras azules, las que realiza el AD5933 son nombradas con letras rojas, y las que pueden ser realizadas por cualquiera de los 2 elementos, son nombradas con letras negras.

La comunicación la empieza el Master cambiando la línea de datos SDA desde alto (condición normal) a bajo, pero cuando la línea de reloj CLOCK (SCL) está en nivel alto. Luego el Master escribe a la línea la dirección binaria del Slave, que para el caso particular del AD5933 es la dirección binaria de 7 bits: 0001101 [6], lo cual habilita la comunicación con el CI. Luego el

siguiente bit que ingresa el Master es el bit de lectura/escritura con un valor 0 y 1 lógico respectivamente. Este bit le indica al AD5933 que se le pedirá leer o escribir, según el bit, un registro del CI con una trama de 8 bits.

La trama de 8 bits especifica o “avisa” al CI AD5933 que se leerá o escribirá en un siguiente diagrama de tiempos, el cual es la copia desplazada del mostrado en la Figura 3-14. Por último, se tiene un reconocimiento del Master o del AD5933 donde se reconoce que la trama ha llegado a su fin, lo cual pone a la línea de datos en un nivel alto, desde un nivel bajo, solo cuando el nivel del CLOCK (SCL) está en alto.

El diagrama de tiempos presentado en la Figura 3-14 presenta la programación general de los comandos en el tiempo que deben realizarse, por elementos, para que exista comunicación con el AD5933, pero no describe un proceso de escritura o lectura completo de variables por parte del Master.

Para desarrollar la explicación sobre este tema, se hará uso de letras que representan abreviaciones de tareas más complejas, las cuales son:

- S=Start o inicio de la comunicación.
- P= Stop o parada de la comunicación.
- R= Read o lectura de un registro del AD5933.
- W= Write o escritura de un registro del AD5933.
- A= Acknowledge o reconocimiento de un dato por parte del Master o del AD5933.
- NAC=No- Acknowledge o no-reconocimiento por parte del AD5933.

En la Figura 3-15 se muestra el proceso de escritura de un registro del CI AD5933.

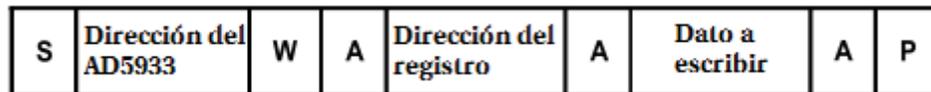


Figura 3-15. Proceso de escritura del registro AD5933 (Fuente: [6])

En la Figura 3-15 se nota que el proceso empieza con el comando de inicio, seguido de la dirección del AD5933, y del bit que le indica al CI que se escribirá en algunos de sus registros. Luego el Master ingresa la dirección del registro a escribir y el Slave (AD5933) lo reconoce con un comando de reconocimiento. Luego el Master escribe el dato de 8 bits en el registro previamente direccionado, después de eso el CI manda un dato de reconocimiento. Para finalizar el Master envía un dato de stop o parada a la línea de datos I2C, la cual la pone a nivel alto y la comunicación se detiene.

Cabe notar que la escritura de un registro del AD5933 por parte del Master tiene como objetivo programar alguna función o característica especial del mismo, las cuales fueron definidas anteriormente en las tablas de registros.

La Figura 3-16 se muestra el proceso de lectura de un registro desde el Master.



Figura 3-16. Proceso de lectura del registro AD5933 (Fuente: [6]).

El proceso de lectura del registro se inicia igual que el de escritura; el Master envía la señal de inicio de la comunicación junto con la dirección del AD5933, para luego enviar un bit de read o lectura que le indica al AD5933 que la dirección del registro que reciba en los siguientes 8 bits, debe colocarlas en la línea para su correspondiente lectura. Una vez que esto concluye, el Master debe indicarle al AD5933 que los datos fueron leídos, esto se hace por un dato de no-reconocimiento. Cabe notar que el dato de no-reconocimiento recibe ese nombre debido a que, para el caso de lectura, el Slave no es quien reconoce la comunicación, sino el Master, que es el caso menos esperado, y es como una negación a lo que ocurre normalmente.

La comunicación termina cuando el Master sube el nivel de la línea mediante un código de parada.

Cabe notar que la escritura de algún dato de los registros del AD5933 tiene como objetivo la obtención de datos importantes, como los valores de los registros reales o imaginarios obtenidos después del proceso de barrido de frecuencia, pero también se pueden y deben obtenerse datos sobre el estado de los procesos internos del AD5933 mediante la lectura del registro de estatus (ver Tabla 3-7).

Descripción simbólica de las funciones que realiza el AD5933

Las tareas que realiza este circuito integrado, de forma general simbólica, son mostradas en la Figura 3-17. Estas tareas fueron descritas en el capítulo 2, pero son replicadas para apoyar el entendimiento de las mismas por parte del lector.

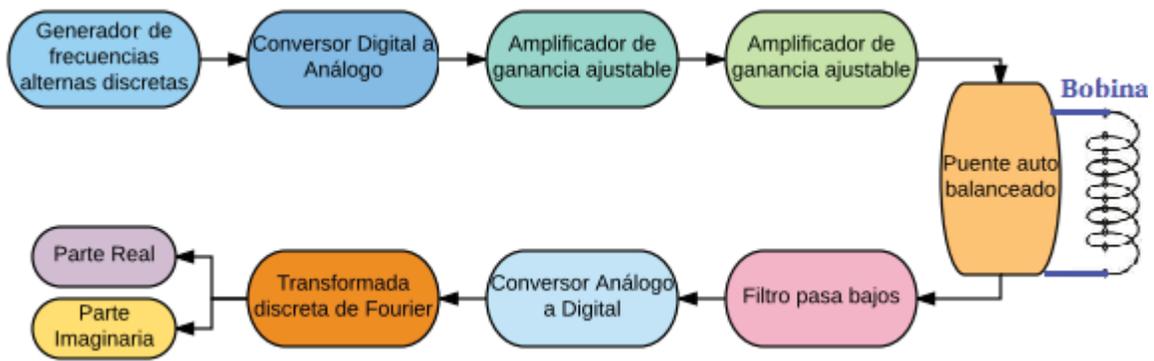


Figura 3-17. Funciones simbólicas realizadas por el AD5933.

Las tareas mostradas en la Figura 3-17 tienen como fin la obtención de la impedancia cuando se realiza un barrido de frecuencia sobre ella. Esto también permite obtener el valor de su impedancia particular a cierta frecuencia, y es la razón por la cual se puede obtener el valor de inductancia de una bobina (ver capítulo 2).

Descripción de las funciones de programación del CI AD5933

El CI AD5933 se programa mediante el manejo del contenido de los diferentes registros del integrado mediante el puerto I2C, por medio de funciones o procesos digitales que adecuan los datos de los respectivos registros para realizar las tareas presentadas en la Figura 3-17. No todas las tareas descritas en la Figura 3-17 se deben programar, lo cual será descrito en esta misma sección.

Cabe notar que las funciones de programaciones que se describen a continuación describen solo una parte del proceso de la misma, centrándose en una descripción simbólica de ella.

El diagrama de las funciones programables del CI AD5933 se muestra en la Figura 3-18.

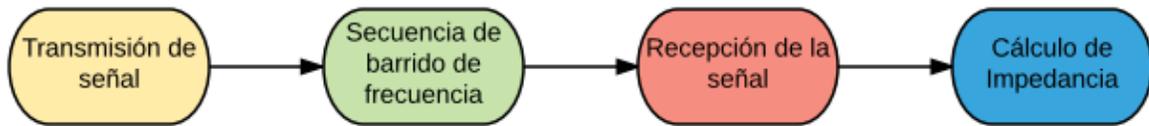


Figura 3-18. Diagrama de funciones programables del CI AD5933.

Nótese de la Figura 3-18, que se deben programar solo estas 4 tareas para obtener el valor de impedancia de un elemento a considerar, debido a que alguno de los procesos que permiten obtener el valor de impedancia deseado, los cuales se muestran en la Figura 3-17, no se deben programar directamente, sino que solo se deben inicializarse y el CI AD5933 los realiza de manera automática.

Transmisión de señal

La etapa de transmisión de señal agrupa a todos los procesos que deben programarse para que la señal alterna, proveniente del generador de frecuencias (ver Figura 3-17) llegue a la entrada de la impedancia o bobina a considerar.

Ganancia de salida de la señal

La primera tarea que se debe programar es la ganancia de salida de señal alterna visto desde el CI AD5933, o entrada de señal alterna visto desde la impedancia. Esto se muestra en la Figura 3-19, marcado en un recuadro azul.

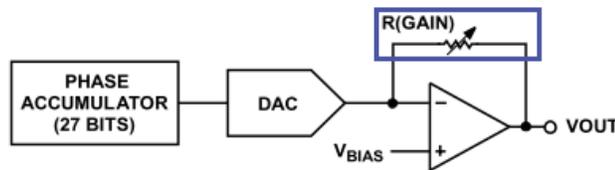


Figura 3-19. Etapa de transmisión de señal (Fuente: [6]).

La resistencia de ganancia se puede programar para permitir amplitudes diferentes de señal de salida alterna hacia la bobina, las cuales pueden condicionar un mejor funcionamiento de proceso general de barrido de frecuencias, debido a la particular respuesta de cada impedancia a dicha amplitud de excitación. Los valores posibles de excitación programables se muestran en la Tabla 3-8 [6].

Tabla 3-8. Posibles valores de voltaje de salida de la señal, según alimentación @ 3V3

Rango	Amplitud de voltaje de salida	Nivel de salida DC
1	1.98 [Vpp]	1.48 [V]
2	0.97 [Vpp]	0.76 [V]
3	383 [mVpp]	0.31 [V]
4	198 [mVpp]	0.173 [V]

Consideraciones de inicio para el barrido de frecuencias

Antes de poder realizar el barrido de frecuencia sobre la impedancia desconocida a medir, se deben setear o definir las consideraciones de inicio para el barrido de frecuencias. Estas consideraciones son necesarias para definir la forma en que se realiza este barrido.

Las consideraciones de entrada son 3:

1. Frecuencia de entrada inicial de la señal
2. Pasos o resolución entre frecuencias
3. Número de incrementos de la señal.

Frecuencia de entrada de la señal

La frecuencia de entrada de la señal es con la cual el barrido de frecuencias empieza a excitar a la bobina, es la frecuencia inicial de la misma. La frecuencia de inicio de la bobina se guarda como una palabra de 24 bits en 3 registros diferentes de 8 bits cada uno: los registros con direcciones 0x82, 0x83 y 0x84 de acuerdo al mapa de registros del AD5933 que es presentado en una sección anterior. El cálculo de los valores que se deben escribir a los registros, llamado código de frecuencia de inicio, se presenta en la ecuación 3-1.

$$\text{Código de frecuencia de inicio} = \frac{\text{Frecuencia de Inicio Requerida}}{\frac{MCLK}{4}} \cdot 2^{27} \quad (3-1)$$

Para un caso de ejemplo con una frecuencia inicial deseada de 30 [KHz], y con la velocidad del reloj (MCLK) del propio circuito integrado AD5933 de 16 [MHz] [6] se tiene un resultado que se muestra a continuación:

$$\text{Código de frecuencia de inicio} = \frac{30 [KHz]}{\frac{16 [MHz]}{4}} \cdot 2^{27} = 1006632 = 0x0F5C28$$

Con el último número escrito en formato hexadecimal. De esta forma, este número hexadecimal se separa para su escritura en los registros del CI; el valor 0x0F se escribe al registro 0x82, el valor 0x5C se escribe al registro 0x83 y el valor 0x28 se escribe al registro con dirección 0x84.

Incrementos de frecuencia

Los incrementos de frecuencia son la separación, en unidades de frecuencia (Hertz), entre señales continuas en el barrido de frecuencias. Indica la resolución del barrido. El valor del incremento o resolución del barrido debe escribirse como un código hexadecimal hacia los registros del CI AD5933 con direcciones 0x85, 0x86 y 0x87 (ver Tabla 3-3). El cálculo del código de incrementos de frecuencia se presenta en la ecuación 3-2.

$$\text{Código de incremento de frec} = \frac{\text{Incremento de frecuencia requerido}}{\frac{MCLK}{4}} \cdot 2^{27} \quad (3-2)$$

Para un caso de ejemplo donde se requiera una resolución de 10 [Hz] y el mismo MCLK de 16 [MHz] el resultado es el siguiente:

$$\text{Código de incremento de frecuencia} = \frac{10 [Hz]}{\frac{16 [MHz]}{4}} \cdot 2^{27} = 335 = 0x00014F$$

Con el último número escrito en formato hexadecimal. De esta forma, este número hexadecimal se separa para su escritura en los registros del CI; el valor 0x00 se escribe al registro 0x85, el valor 0x01 se escribe al registro 0x86 y el valor 0x4F se escribe al registro con dirección 0x87.

Número de incrementos

El número de incrementos es la cantidad total de veces que se incrementa la frecuencia, en el valor deseado, partiendo desde la frecuencia inicial. Es el número de frecuencias diferentes que se hacen en el barrido de frecuencias para obtener la impedancia desconocida. Este valor es una palabra de 9 bits, lo que implica un máximo de 511 incrementos posibles, que se escribe de forma hexadecimal en los registros con direcciones 0x88 y 0x89 del AD5933.

Secuencia de barrido de la señal

La siguiente etapa de programación para el correcto funcionamiento del CI AD5933 es la programación de la secuencia de barrido de la señal (ver Figura 3-18). Esta programación es necesaria debido a que el inicio del barrido no es automático. Los pasos para programar la secuencia de barrido en el AD5933 se describen a continuación:

1. Entrar al modo de espera (Standby): Antes de emitir el código de inicio de frecuencia, el CI AD5933 debe estar en el modo de espera, el cual consiste en que los pines que se conectan a la bobina, VIN y VOUT, se ponen a tierra internamente. El modo de espera se ejecuta escribiendo al registro de control en las direcciones 0x80 y 0x81.
2. Entrar al modo de inicio: En este modo se excita a la bobina o impedancia con la señal alterna inicial de entrada, pero no se adquiere ni se procesa la entrada de datos a la salida de la bobina (ver Figura 3-3). Esto es necesario debido a que las bobinas con un mayor factor de calidad Q requieren un tiempo de asentamiento no despreciable para la obtención adecuada de su impedancia. El tiempo de asentamiento es un valor que se puede programar mediante un registro de control.
3. Entra al modo de inicio de barrido de frecuencia: Cuando se activa este modo, y después que haya transcurrido el tiempo de asentamiento explicado en el punto anterior, el ADC del AD5933 (ver Figura 3-3) empieza a adquirir datos y realiza los procesamientos normales que lo llevarán a obtener el valor de la impedancia desconocida. Para activar este modo se debe escribir en un registro de control del CI.

Recepción de la señal

La recepción de la señal es una etapa de programación (ver Figura 3-18) que tiene relación con la ganancia programable que se puede modificar a la entrada de la señal al CI proveniente de la bobina (ver Figura 3-3). Esta etapa se muestra en la Figura 3-20.

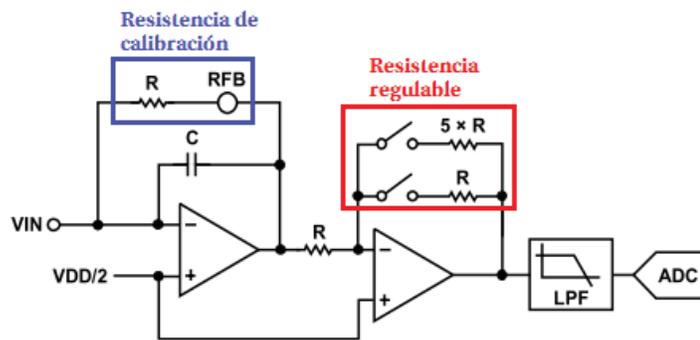


Figura 3-20. Etapa de recepción de la señal (Fuente: [6]).

En la Figura 3-20 (página anterior) se muestra que existe la posibilidad de programar la ganancia en la entrada de datos hacia el CI mediante la elección de resistencias, marcadas en un recuadro rojo en la Figura 3-20, con 2 valores diferentes de 5R y de 1R para una amplificación de 5 veces o unitaria, respectivamente. Esta elección se hace escribiendo sobre un bit del registro de control en la dirección 0x80.

Nótese de la Figura 3-20 que existe una resistencia externa al CI que debe colocarse entre los pines 5 y 4 del AD5933, y la cual es necesaria para el proceso de cálculo de la inductancia de la bobina.

La última función simbólica programable se presentó en la Figura 3-18, y es llamada “cálculo de la impedancia”, por la cual se obtiene la impedancia de la bobina sensora. Mediante cálculos descritos en el capítulo 2, sección 2.1.2, se describieron de forma detalla las tareas que realiza esta función.

Programación de las funciones del CI AD5933

El AD5933 es un circuito integrado programable y basa su funcionamiento en la programación en base a registros digitales [6]. La programación de registros consiste en que la memoria interna de este CI posee las funciones o instrucciones necesarias para hacer funcionar al dispositivo, y solo se debe comunicar al CI AD5933 que ejecute esa función, mediante una escritura a sus registros, para luego leer u obtener el resultado de la función ejecutada, leyendo otros registros internos, tal como se muestra en la Figura 3-21. Nótese que la llamada a funciones, escritura o lectura de registros de este CI, se hace a través de la única línea de datos del puerto I2C.

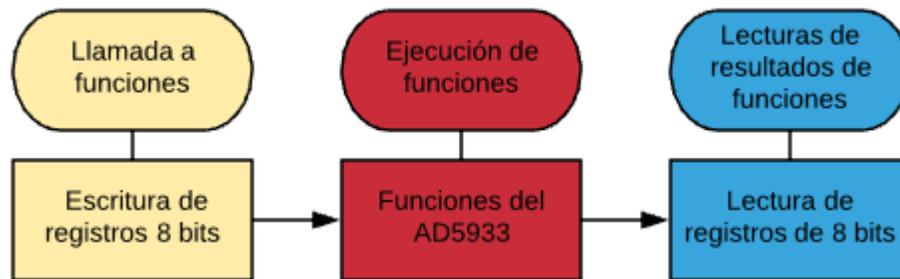


Figura 3-21. Diagrama general del procedimiento de programación del CI AD5933.

El CI AD5933 posee muchas funciones para programarse, de entre todas ellas se mencionarán las funciones que se utilizaron en el desarrollo de este proyecto, estas funciones se presentan en la Tabla 3-9 y la Tabla 3-10, que es la continuación de la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Funciones usadas en el CI AD5933 parte 1.

Funciones	N°	Descripción	Resultados	Condiciones
Set Clock	1	Define el tipo de entrada de reloj	Interno, externo	ninguna
Reset	2	Reset al CI	Modo Stanby	ninguna
Set Frecuencia	3	Fija el valor de frecuencia inicial	Valor en registro	ninguna
Set SetlingTime	4	Fija el tiempo de espera antes de medir	Valor en registro	ninguna

Tabla 3-10. Funciones usadas en el CI AD5933 parte 2.

Funciones	N°	Descripción	Resultados	Condiciones
Set Stepsize	5	Fija la distancia en frecuencia en mediciones del barrido	Valor en registro	ninguna
Set NumbreIncr	6	Fija el número de incrementos del barrido de frecuencias	Valor en registro	ninguna
Set PGAGain	7	Fija la amplitud del amplificador de entrada	Valor en registro	ninguna
Set VIN	8	Fija el valor Vpp de voltaje alterno de salida en el barrido	Valor en registro	Ninguna
Get GainFactor	9	Obtiene el valor de factor de ganancia de una R de calibración	Factor de ganancia y corrimiento de fase en registros	1 a 8 ejecutadas
Set Mode	10	Fija el modo de funcionamiento del AD5933	Modo de funcionamiento	1 a 8 ejecutadas
Get Complex	11	Obtiene el valor real e imaginario de una impedancia	Valor real e imaginario (Z) en registros	1 a 10 ejecutadas

Como se puede observar de las Tabla 3-9 y 3-10, el CI AD5933 tiene muchas funciones utilizadas, pero algunas dependen de otras para poder utilizarse. Describiendo de forma más precisa; las funciones 9 a 11 dependen de que las funciones 1 a 8 hayan sido ejecutadas anteriormente para poder devolver u obtener resultados satisfactorios. Se puede decir que las funciones 1 a 8 son las funciones de Setup (establecimiento), y las funciones 9 a 11 son las funciones que se ejecutan en un estado de Loop (que operan cíclicamente).

El nombre de las funciones de las Tablas 3-9 y 3-10 no corresponden con el nombre de las funciones descritas en la hoja de datos del componente (Datasheet), pero se dispuso de esa forma para darle un sentido práctico relacionado con el uso y el resultado que entrega cada función, para poder ser explicada fácilmente.

Para la programación particular del CI AD5933, se ocuparon dos programas diferentes debido a que cada función de ellos es diferente. Estos programas son llamados “Calibración” y “Medida Continua”.

Programa Calibración del AD5933

El programa Calibración del AD5933 tiene como objetivo la obtención de los parámetros de resultados que son obtenidos al ejecutar las funciones 1 a 10. Estos resultados son el Factor de Ganancia de una resistencia en particular, y el corrimiento de fase que es conseguido cuando se conecta entre los terminales del AD5933 la misma resistencia. En otras palabras: es obtener los valores particulares de variables leídas por el CI AD5933 para una impedancia conocida, y asociarla con el valor conocido de esa impedancia. En resumen: es el acto de calibrar.

En la Figura 3-22 se muestra el diagrama de flujo del programa de calibración del AD5933.

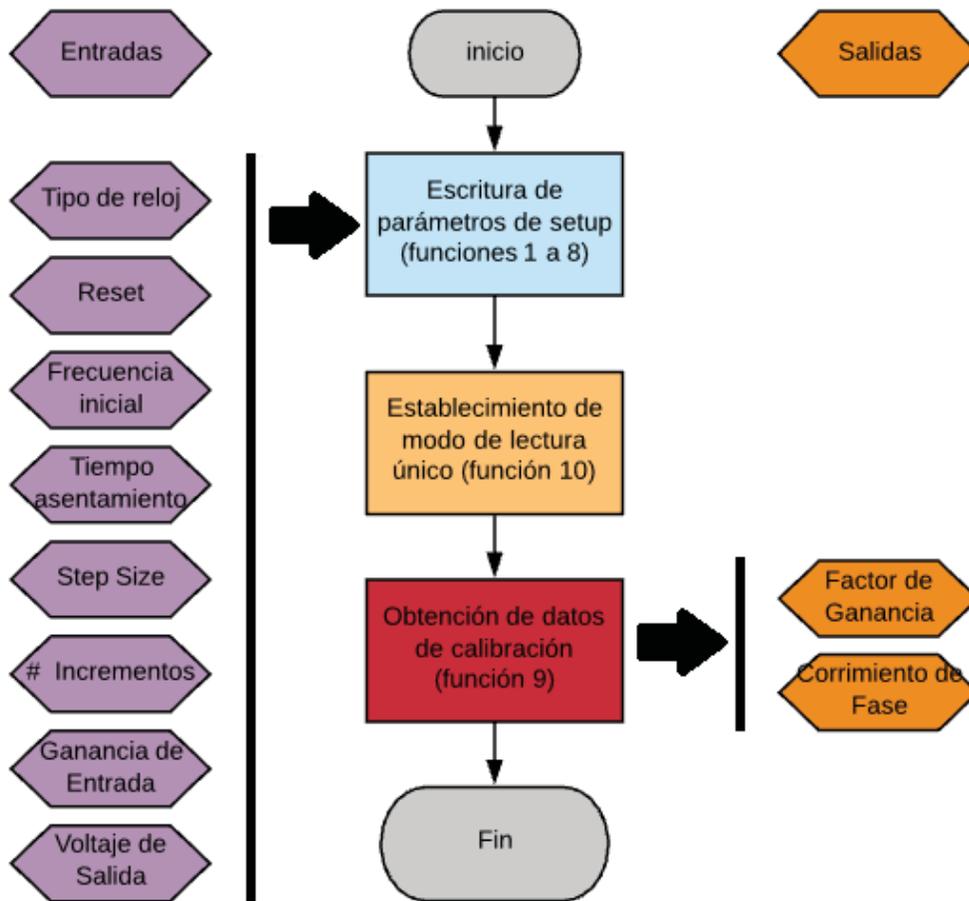


Figura 3-22. Diagrama de flujo general del programa Calibración en el AD5933.

De la Figura 3-22 se puede notar que el programa Calibración toma como entrada 8 parámetros iniciales o de Setup para funcionar. Luego se fija el modo de funcionamiento en una única lectura o ciclo de trabajo de lectura para el AD5933, esto se realiza debido a que solo se requieren los parámetros de una resistencia de calibración, la cual se espera que no varíe en el tiempo.

El último paso es ejecutar la función de lectura, la cual devuelve o escribe en registros de salida, el valor de Factor de ganancia y el corrimiento de fase de la resistencia de calibración. Se guardan estos datos para el siguiente programa de Medición Continua.

Programa Medida Continua del AD5933

El programa Medida Continua del AD5933 tiene como objetivo la medida continua de los valores relacionados a una impedancia desconocida cuando el sistema de medición ya fue calibrado, o cuando ya se obtuvieron los datos de factor de ganancia y corrimiento de fase para una resistencia conocida. El programa Medida Continua mide continuamente los valores reales e imaginarios de una impedancia desconocida, los cuales están relacionados con el valor característico de su impedancia a cierta frecuencia. Estos valores son actualizados constantemente en los registros de salida que guardan estos valores, para su posterior lectura por la Raspberry Pi 3. Esto se explicará en una siguiente subsección.

En la Figura 3-23 se muestra el diagrama de flujo del programa de Medición Continua del AD5933.

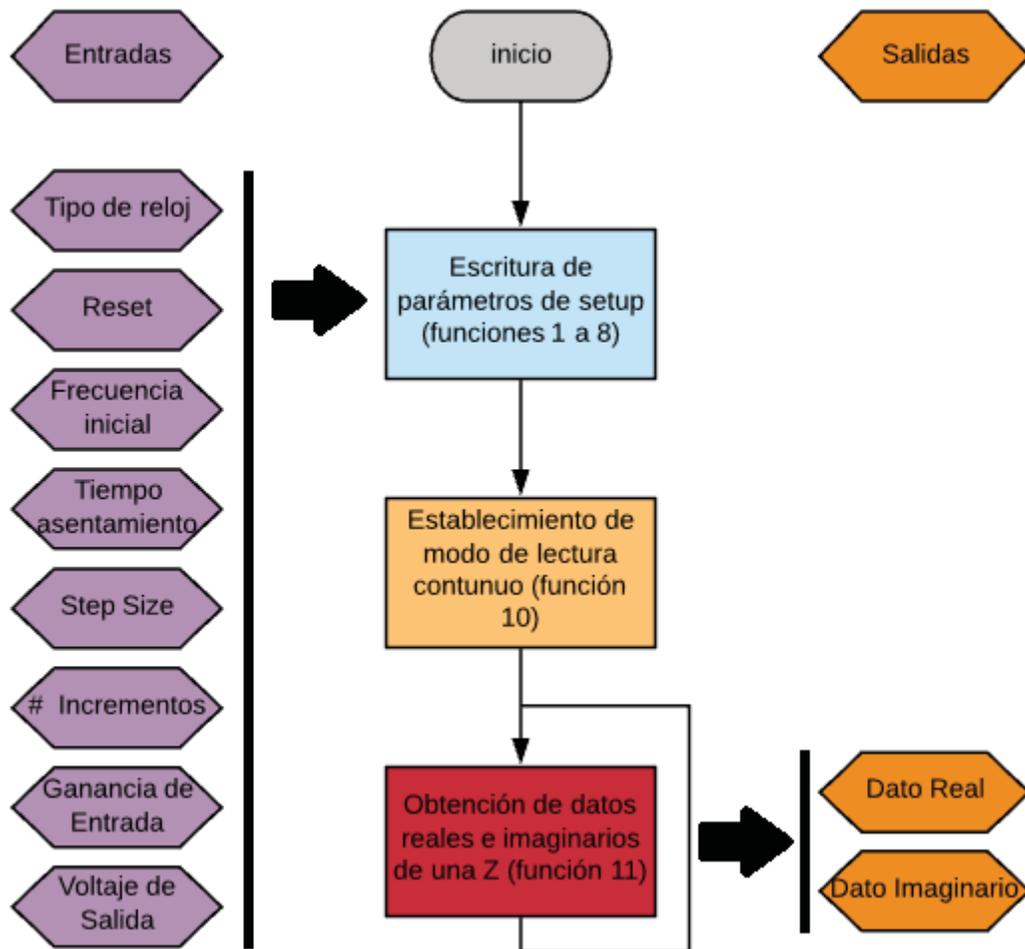


Figura 3-23. Diagrama de flujo general del programa Medida Continua de AD5933.

Como puede observarse en la Figura 2-3, este programa es similar al presentado en la Figura 3-22, pero con la diferencia de que el modo de funcionamiento de AD5933 se fija en lectura continua, y no una única lectura. La otra diferencia importante es que en este programa no se lee el factor de ganancia, sino que se lee directamente la parte imaginaria y la parte real de una impedancia desconocida. Con estos valores se puede tener el valor de la impedancia total desconocida, la cual debe ser modificada o escalada por el factor de ganancia, y la fase, obtenidos mediante el programa de calibración.

El proceso de cálculo de la impedancia fue descrito en detalle en la sección 2.1.2. Debido a que el CI AD5933 solo entrega los datos reales o imaginarios, la tarea de cálculo de impedancia le corresponde a la tarjeta Raspberry Pi 3, la cual es el Master.

3.3.2 Programación de la Raspberry Pi 3

La tarjeta Raspberry Pi 3 es un poderoso microcomputador que posee muchas características idóneas para el desarrollo de este proyecto, las cuales fueron mencionadas al inicio de este capítulo. Esta tarjeta tiene la particularidad de que puede ser ocupada como un computador personal, simplemente conectando un teclado, un mouse y una pantalla a sus periféricos.

Todo computador personal moderno tiene incorporado un entorno visual por el cual controlarlo y programar tareas, este entorno es el sistema operativo. El cual no solo da soporte visual al computador, sino además agrupa la mayoría de las instrucciones para poder acceder y controlar las características del mismo.

Las características o tareas que no sean incluidas en el sistema operativo oficial, se pueden programar dentro del mismo sistema operativo, para poder aumentar las capacidades del computador. La tarea que se debe programar en la Raspberry Pi 3, es la comunicación con el CI AD5933 y el entorno visual que será observado y controlado por el usuario. Para eso se debe describir el sistema operativo particular que fue elegido para ser usado en la Raspberry Pi 3.

Raspbian

Raspbian OS es la distribución por excelencia para la Raspberry Pi. Es la más completa y optimizada de las existentes, por eso cuenta con apoyo oficial. Raspbian OS se basa en la potente distro Debian Wheezy (Debian 7.0) optimizando el código de ésta para la SBC Raspberry Pi.

En la Figura 3-24 se muestra el entorno Raspbian el cual está instalado en la Raspberry Pi 3 usada en este proyecto. Nótese la sección de programación (Programming) de Raspbian, la cual cuenta con programas pre-instalados para programar sobre la tarjeta. Nótese, además, particularmente el programa IDLE de Python, el cual fue el ocupado para programar sobre la Raspberry Pi 3.



Figura 3-24. Entorno de programación Raspbian instalado en la Raspberry Pi 3 (fuente: www.geektopia.es).

La distribución es ligera para moverse ágilmente en el hardware de la Raspberry Pi, con un entorno de escritorio LXDE y Midori como navegador web predeterminado. Además, incluye herramientas de desarrollo muy interesantes, como IDLE para Python, Scratch para programar videojuegos (muy interesante sobre todo si se combina con Arduino), la tienda de aplicaciones denominada Pi Store, y muchas aplicaciones interesantes que justifican su elección como entorno visual y de programación para la Raspberry Pi 3.

Python

Python es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca que el código sea lo más legible. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, usa tipado dinámico y es multiplataforma.

Es administrado por la Python Software Foundation. Posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License, que es compatible con la Licencia pública general de GNU a partir de la versión 2.1.1, e incompatible en ciertas versiones anteriores.

Python (nombrado así por la popular serie de televisión Monty Python's Flying Circus) es un lenguaje de programación joven y ampliamente usado, orientado a objetos, que fue desarrollado en el principio de la década de 1990, y que ha ganado popularidad significativa durante la década del 2000 y la expansión del movimiento moderno de la Web 2.0 que trajo el desarrollo de muchos servicios online flexibles que fueron motorizados por este gran lenguaje. Es muy fácil de aprender, pero extremadamente poderoso y puede ser usado para crear aplicaciones compactas, pero robustas. El logo de Python es mostrado en la Figura 3-25.



Figura 3-25. Logo de Python. (Fuente: Python.org)

Desde el mismo momento en que fue creado en el distante 1991, Python se enfocó en la “legibilidad del código”, y la reducción de complejas estructuras que causaban problemas a los desarrolladores que quisieran experimentar con objetos, programación imperativa, programación funcional y estilos procedurales. Esto fue posible introduciendo una gran biblioteca de estándares, gestión automatizada de memoria y sistema de tipos dinámicos. Todo esto hizo que Python esté listo no sólo para ser usado como un lenguaje de programación totalmente completo, sino también como un lenguaje de scripting poderoso que hoy está integrado a innumerables proyectos alrededor del mundo entero tanto en la web como offline.

Uno de los ejemplos más populares de cómo Python logró impactar la historia moderna de internet es la creación del lenguaje Ruby, el cual fue hecho por científicos de computación japoneses y el programador de software Yukihiro Matsumoto para ser una mezcla funcional entre Perl y Python.

Python, al igual que Java, corre en muchas plataformas como Windows, Linux, Mac OS X, OS/2, Amiga, Palm Handhelds, e incluso en teléfonos móviles Nokia. Sus implementaciones más populares son: CPython (modelo de referencia de Python gratuito que tiene un desarrollo de código abierto increíblemente grande y activo que innova cada año), Jython, IronPython, y PyPy.

El entorno de programación de Python en el sistema operativo Raspbian viene pre-instalado en sus 2 versiones disponibles: Python 2.X.X y Python 3.X.X. Para este proyecto en particular se ocupó la versión Python 3.4.2 debido a su robustez, cantidad de información en la red, y compatibilidad de desarrollar una interfaz simple de usuario mediante la librería Tkinter, la cual es explicada en una sección posterior.

Programación de la comunicación del CI AD5933 con la Raspberry Pi 3

La Raspberry Pi 3 debe programar o comunicarse con el CI AD5933, para que esta ejecute sus funciones, y leer del CI, los resultados de las funciones que este ejecuta. También se verá en la siguiente sección, que en la Raspberry Pi o en su sistema operativo Raspbian, se ejecuta la interfaz de usuario que muestra datos y puede interactuar con un usuario a través de la pantalla táctil.

La forma de realizar la conexión electrónica entre la Raspberry Pi 3 y el CI AD5933 es a través del puerto I2C, tal como se describe al inicio de este capítulo. La conexión por el puerto físico I2C crea un puerto virtual de comunicación, donde ambos elementos pueden compartir datos entre ellos. Este puerto virtual es llamado puerto de comunicación o puerto COM.

En la Figura 3-26 se presenta el diagrama de flujo del programa que se ejecuta en la Raspberry Pi 3, y que lo comunica con el CI AD5933.

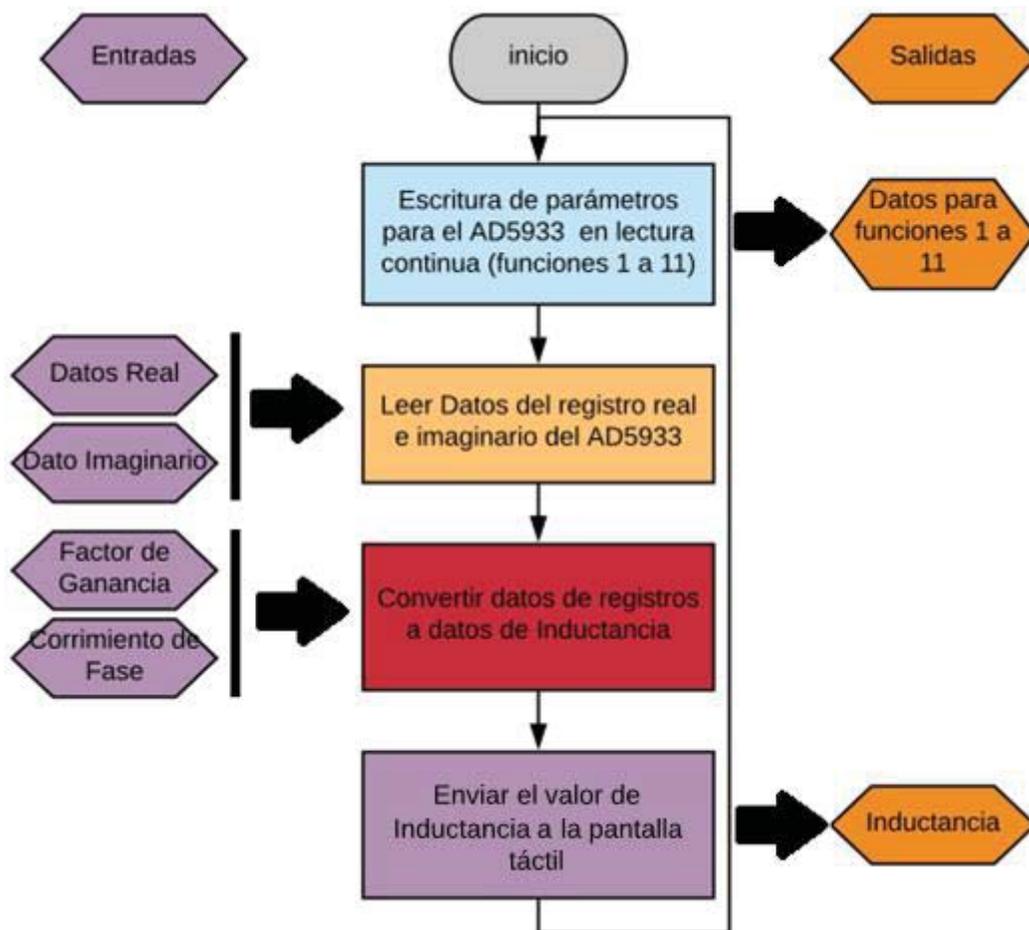


Figura 3-26. Diagrama de flujo de la comunicación entre la Raspberry Pi y el CI AD5933.

Como se observa en la Figura 3-26, es la Raspberry Pi 3 la encargada de obtener los datos de las funciones que ejecuta el CI AD5933. Estas funciones devuelven los valores con los cuales se actualiza o calcula el valor real de una inductancia desconocida. El valor de la inductancia calculada se envía a la pantalla táctil para su correcta visualización e interpretación por parte del usuario.

3.3.3 Programación de la interfaz de usuario

La interfaz de usuario es un programa que se desarrolló con el objetivo de tener un control y visualización avanzada de los datos de impedancia o inductancia obtenidos a través de la medición del CI AD5933. La forma en la cual este programa recibe los datos de inductancia calculados para una bobina desconocida, es a través del puerto COM o el puerto serie que se crea virtualmente cuando se conecta el CI AD5933 con la Raspberry Pi 3 mediante el puerto I2C.

En la Figura 3-27 se observa un diagrama de la forma en que intercambian información los elementos que se programan en este sistema.

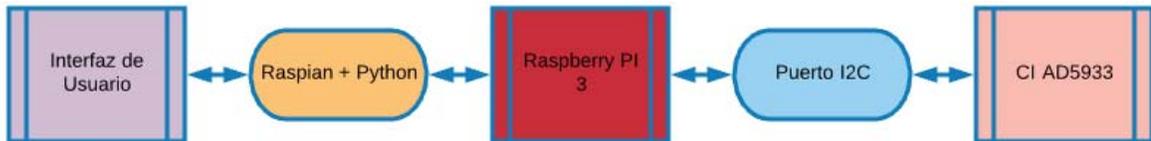


Figura 3-27. Intercambio de información a través de puertos en el sistema.

En la Figura 3-27 se observa que la comunicación de los elementos que se programan es a través de los puertos físicos o digitales que los conectan. En la Figura 3-28 se muestra el diagrama de flujo para la interfaz de usuario, la cual se ejecuta en un programa Python en el entorno Raspbian.

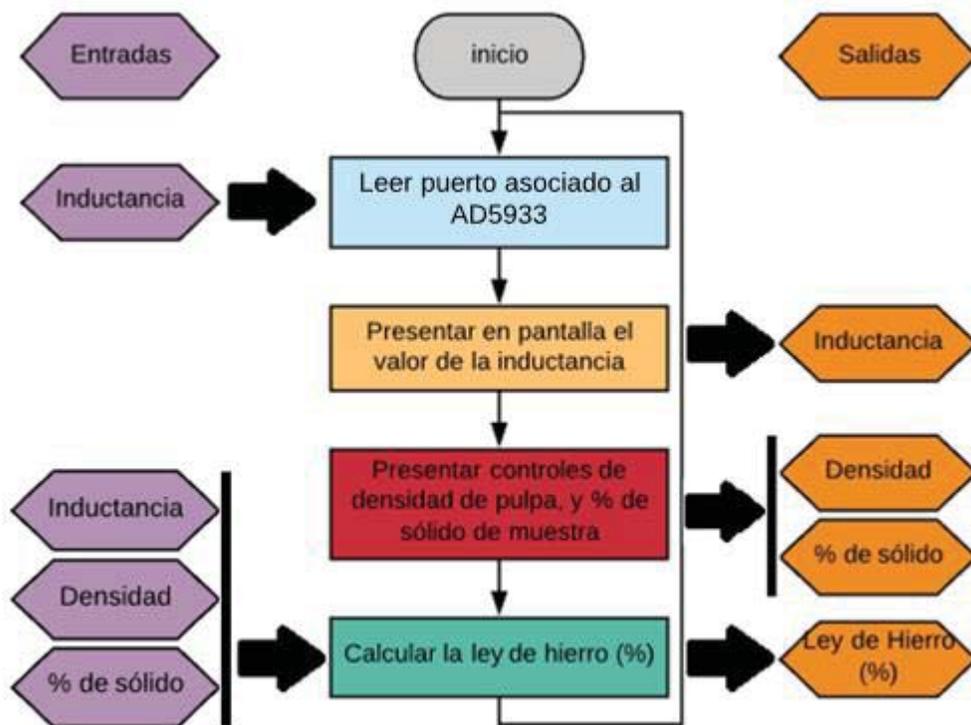


Figura 3-28. Diagrama de flujo del programa de interfaz de usuario, ejecutado en un computador personal.

En la Figura 3-28 se puede observar como la interfaz de usuario es ocupada solamente para mostrar el valor de inductancia por pantalla, y para presentar controles de densidad y % de sólido de una muestra de pulpa simulada, que, junto al valor de la inductancia, permiten calcular el valor final de ley del hierro o porcentaje de hierro presente en una muestra simulada de pulpa.

En la Figura 3-29 se muestra la captura de la interfaz de usuario real programada, vista en la pantalla táctil conectada a la Raspberry Pi 3.



Figura 3-29. Interfaz de usuario del sistema.

En la Figura 3-29 se observa que se tienen los controles de densidad y porcentaje de sólido de una pulpa de material ferroso simulado. Estos controles permiten modificar estos valores en un cierto intervalo real de variación, para luego, y en conjunto al valor de la inductancia, calcular el valor del porcentaje de hierro o ley de hierro de la pulpa simulada. Este cálculo se hace mediante la ecuación 3-2.

$$\text{Ley de Hierro (\%)} = \frac{\text{Inductancia[Hy]} \cdot \text{Factor de Ganancia K}}{\% \text{ Sólido[-]} \cdot \text{Densidad} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]} \quad (3-2)$$

3.4 Conclusiones y comentarios finales del capítulo

La programación del sistema tiene 2 diferentes componentes para programarse; el CI AD5933 y la tarjeta Raspberry Pi, en la cual se ejecutan los programas de comunicación con el AD5933, y la interfaz de usuario. La programación del primero es a base a registros, la programación del segundo es base del lenguaje de programación Python, el cual es ejecutado en el sistema operativo Raspbian que se ejecuta en la Raspberry Pi.

El valor de las variables de Setup, o establecimiento, del programa del AD5933, o del programa de la interfaz de usuario son dados sin justificación, debido a que el objetivo de la construcción de este sistema prototipo es comprobar y presentar el funcionamiento de un medidor de ley de hierro, donde lo importante del sistema mismo es la variación positiva de la variancia de la ley de hierro, con respecto al valor de la inductancia medida por el sistema. La calibración del mismo será hecha en un proceso posterior.

4 Resultados

En los anteriores capítulos se definieron los elementos a ocupar para este sistema, y la forma en que estos se programaron para realizar las tareas esperadas del mismo. En este capítulo se presenta al sistema completo, fabricado en este proyecto, para la medición de la ley de hierro minera. Se presentan su fabricación física que da soporte mecánico al mismo. También se presentan los resultados de la implementación de este sistema cuando se lo somete a ciertas pruebas simples de funcionamiento, con el objetivo de comprobar el uso del mismo ante una bobina real cuya permitividad magnética varía, y por ende, el valor de su inductancia. Se comparan estos resultados entregados por el sistema con respecto a los resultados entregados por un inductómetro comercial, para comprobar el correcto funcionamiento.

4.1 Resultados del soporte mecánico del sistema

El sistema completo que se desarrolló, agrupa a los elementos que se eligieron para formarlos. Los elementos importantes son el CI AD5933, la Raspberry Pi 3 y la pantalla táctil, pero no son los únicos. También existen conectores mecánicos para las bobinas, botones de encendidos, piezas de soporte estructural y alimentadores de energía, que no son imprescindibles para el sistema electrónico, pero sí lo son para el sistema completo funcional debido a la comodidad para el usuario final.

Para brindar soporte mecánico a los elementos del sistema se fabricó un soporte mecánico de material plástico de impresión 3D, llamado PLA, en una impresora 3D. Este material se eligió debido a sus buenas propiedades mecánicas y de acabado, y porque se pueden crear piezas con diseños innovadoras con él. En la Figura 4-1 se muestra la conexión mecánica entre la pantalla táctil y la Raspberry Pi 3. Nótese que la Raspberry Pi 3 aparece en esta figura en un color plomo.

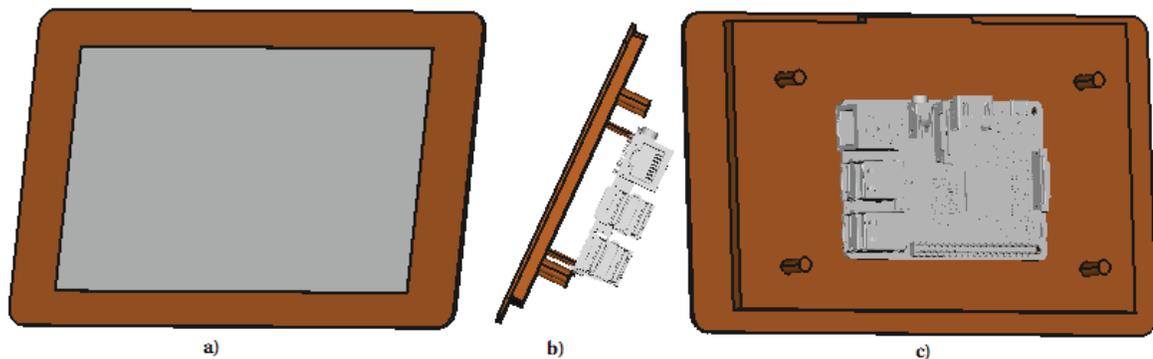


Figura 4-1. Conexión mecánica entre la pantalla táctil y la Raspberry Pi 3. a) vista frontal, b) vista lateral y c) vista posterior.

En la Figura 4-2 se muestra el soporte completo del sistema en formato virtual.

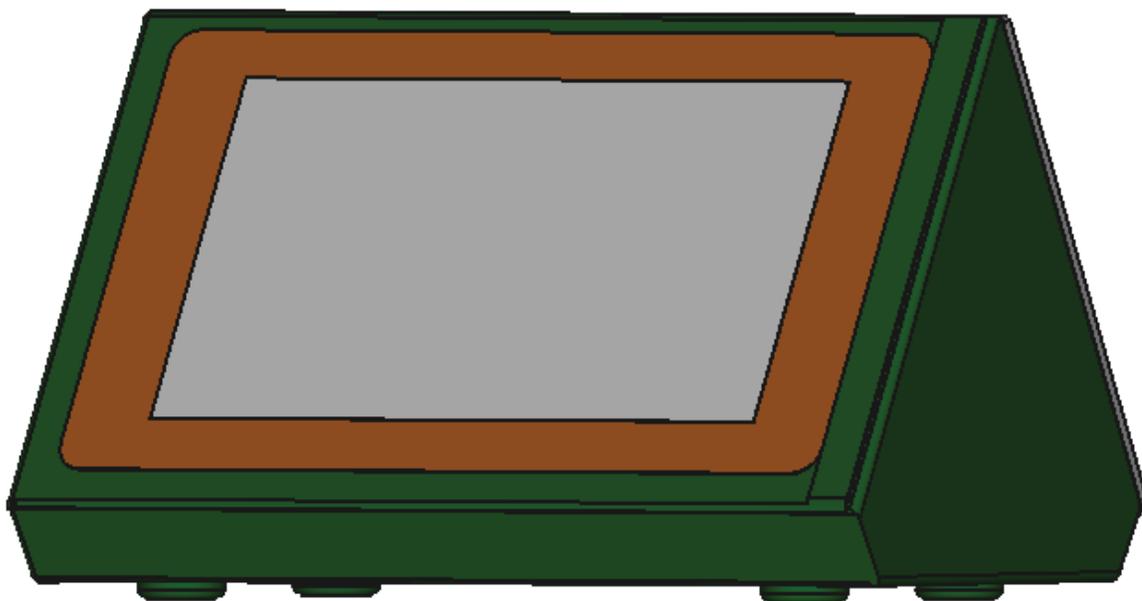


Figura 4-2. Soporte virtual del sistema completo.

En la Figura 4-3 se muestra el dispositivo real fabricado para dar soporte a todo el sistema. Nótese el uso de conectores especiales, tipo caimán, para las bobinas y de un transformador de alimentación.

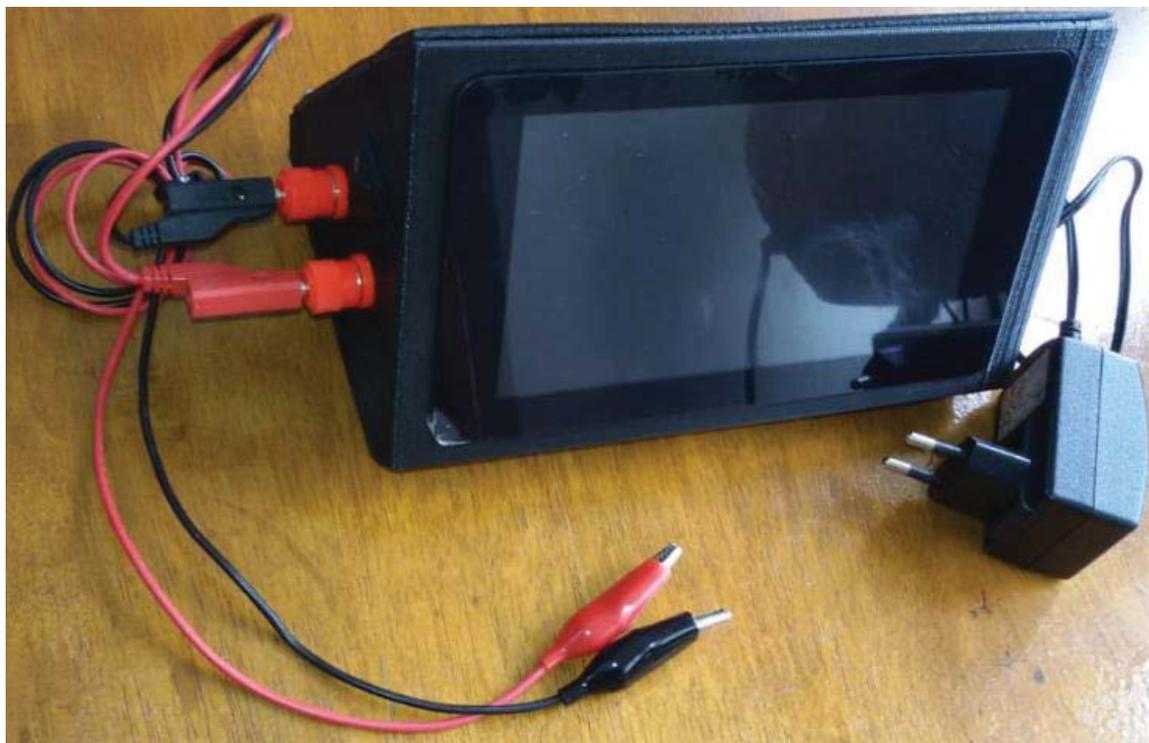


Figura 4-3. Soporte mecánico total para el sistema real, junto con sus accesorios.

4.2 Resultados sobre la exactitud del sistema

El sistema se realizó con el propósito de medir la ley de hierro en base a la medición de la inductancia de una bobina, cuando la pulpa ferrosa atraviesa el núcleo magnético de esta. En otras palabras, el sistema mide la inductancia de una bobina. Este valor de inductancia es interpretado o relacionado con la ley de hierro para obtener el valor final de esta ley (ver Figuras 1-5 y 1-6).

En la Tabla 4-1 se muestra la exactitud del sistema cuando se lo compara con las medidas de la inductancia de un inductómetro comercial. El inductómetro comercial es el UNI-T UT70A, cuya exactitud en la medida es de $\pm 2\%$ [10]. Nótese que las medidas de la inductancia, como parámetro, son las medidas obtenidas a través del inductómetro comercial. En esta tabla también se muestra el valor de ley de hierro que tendría una muestra de material con un valor fijo de solidez igual al 28 % (Ver Figura 1-5).

Tabla 4-1. Exactitud del sistema versus el inductómetro comercial UNI-T UT70A.

Inductancias (Inductómetro) [mHy]	Medidas sistema [mHy]	Error relativo [%]	Ley de Fe (@ 28 % de solidez)
4.82	4.77	1.0	0 %
4.83	4.78	1.0	10 %
4.84	4.79	1.0	15 %
4.85	4.80	1.0	20 %
4.86	4.82	1.1	25 %
4.87	4.83	0.8	30 %
4.88	4.84	0.8	35 %
4.89	4.86	0.6	40 %
4.90	4.87	0.6	45 %
4.91	4.88	0.6	50 %
4.92	4.90	0.6	55 %
4.93	4.91	0.4	60 %
4.94	4.92	0.4	63 %
4.95	4.94	0.2	65 %

Cabe notar que los valores medidos de las inductancias, por el inductómetro, fueron obtenidos variando la permeabilidad del núcleo de una bobina de 4.82 [mHy] en vacío hasta los valores de la primera columna de la Tabla 4-1, para luego ser medidos por el sistema desarrollado. Estos valores se interpretaron para obtener el valor de la ley de hierro para un porcentaje de solidez.

Como se puede notar en la penúltima columna de la Tabla 4-1, la exactitud del sistema queda demostrada en el rango de inductancias presentado, cuando la solidez se mantiene constante.

4.3 Resultados de la interfaz gráfica del sistema

El desarrollo del sistema para la medición de la ley de hierro consiste en 2 grandes etapas: el sistema electrónico para la medición de las inductancias y la interfaz visual de datos. En la sección anterior se describió los resultados de la exactitud de la medición de la inductancia, pero esos resultados pueden no estar presentados de forma clara hacia los usuarios finales. La interfaz visual tiene como objetivo la presentación de la información obtenida por el sistema de manera fiable y clara hacia el usuario final, para que tome las decisiones correspondientes de acuerdo a la ley de hierro que muestra el sistema.

En la Figura 4-4 se muestra el desarrollo real de la interfaz visual de sistema, en su funcionamiento normal.



Figura 4-4. Interfaz visual del sistema completo.

Nótese en la Figura 4-4 la medida de la inductancia y la respuesta, en ley de hierro, que entrega el sistema. También nótese que existen unos compensadores digitales que permiten variar a voluntad la densidad y el porcentaje de sólido de una muestra simulada.

4.4 Conclusiones y comentarios finales del capítulo

Se desarrolló un sistema completo para el soporte mecánico de los elementos electrónicos definidos en el capítulo 3. Este soporte mecánico no solo da soporte estructural, además entrega un acabado estético para el sistema mismo, y un confort de operación para un usuario final.

Las mediciones realizadas de inductancia, contrastadas entre el inductómetro comercial y el sistema fabricado, muestran que el error relativo tiene unos niveles máximos aceptables para ser ocupado con seguridad. El sistema de medición de la inductancia funciona de acuerdo a los requerimientos, ya que se puede relacionar directamente con la medida de la ley de hierro a un porcentaje de solidez fijo.

La interfaz visual de usuario permite obtener la información de ley de hierro de forma clara y amena.

Discusión y conclusiones

En este apartado se muestra una recapitulación del desarrollo de los capítulos precedentes. Además, se muestran las consideraciones y limitaciones de este proyecto y los posibles trabajos futuros que se pueden desarrollar.

Chile es un país con una producción de mineral importante, el cual produce distintos tipos de minerales, en especial, el mineral del hierro. La empresa CAP Minería es la productora más grande del país, y la única exportadora de mineral del hierro, debido a que controla la mayor cantidad de yacimientos y plantas procesadoras de mineral, las que, en su mayoría, están presentes en la zona norte del país. Debido a la importancia de CAP Minería, se puede decir que los procesos de la obtención del producto del hierro en Chile son los procesos de esta empresa.

El proceso de extracción del hierro ocurre en las minas, para luego ser enviado a plantas procesadoras, incrementándose el porcentaje de hierro presente en el material y de esta forma obteniendo un producto final de calidad. La forma de conocer el grado de calidad del producto es obteniendo el porcentaje de hierro presente en el mismo, conocido como ley del hierro, el cual se busca superior al 66%. La obtención de la medida de este porcentaje, o ley de hierro, de forma precisa, oportuna y en línea, fue el objetivo de este proyecto.

Existen variadas formas para medir la ley de hierro minera, las cuales son: medida manual por laboratorio, uso de un magnetómetro y medida de la inductancia de una bobina cuando la pulpa ferrosa atraviesa el núcleo magnético de esta. La mejor forma de realizar la medida de la ley de hierro es a través de la medida de la inductancia de una bobina.

El sistema electrónico desarrollado implica mucho más que solo medir la inductancia de la bobina sensora de forma idónea, sino que también implica el almacenamiento de esos datos y la presentación de forma adecuada de los mismos. La medición de la inductancia se hizo mediante un circuito electrónico especial, debido a que los inductómetros comerciales podrían no adecuarse a las condiciones de operaciones de la planta minera. La adquisición e interpretación de los datos de medición de la inductancia se hizo mediante un microcomputador especializado, basándose en la capacidad de estos de conectarse con elementos periféricos fácilmente. La visualización de datos se hizo de forma presencial mediante una pantalla local en el dispositivo.

El circuito electrónico, o sistema electrónico, especial para medir la inductancia de la bobina sensora es el CI AD5933 debido a que cumple con todas las características adecuadas para entregar una salida de datos con bastante exactitud. El microprocesador elegido para llevar a cabo la adquisición e interpretación de datos, provenientes del CI AD5933, es la tarjeta electrónica de desarrollo Raspberry Pi 3, la cual es ideal debido a que posee comunicación directa con este CI y cuenta con capacidad suficiente para implementar un programa para visualizar datos. La visualización de datos se hizo mediante una pantalla táctil.

Los elementos electrónico elegidos fueron programados en su respectivo lenguaje. La programación del CI AD5933 y de la Raspberry Pi 3; la cual se puede dividir en la programación para la comunicación con el CI AD5933, y para la interfaz visual mostrada en la pantalla táctil.

La programación de CI AD5933 es a base a registros, la programación de la Raspberry Pi 3 es base del lenguaje de programación Python, el cual es ejecutado en el sistema operativo Raspbian que se ejecuta en el entorno de la Raspberry Pi.

Se desarrolló un sistema completo para el soporte mecánico de los elementos electrónicos, que son el CI AD5933, la Raspberry Pi 3 y la pantalla táctil. Este soporte mecánico no solo da soporte estructural, además entrega un acabado estético para el sistema mismo, y un confort de operación para un usuario final.

Las mediciones realizadas de inductancia, contrastadas entre el inductómetro comercial y el sistema fabricado, muestran que el error relativo tiene unos niveles máximos aceptables para ser ocupado con seguridad. El sistema de medición de la inductancia funciona de acuerdo a los requerimientos de la solución propuesta. La interfaz visual de usuario permite obtener la información de ley de hierro de forma clara y amena.

A pesar de que el sistema funcione de acuerdo a lo esperado y soluciones el problema que lo motiva, tiene limitaciones. Una limitación importante es la relación entre la variación de la inductancia de una bobina y la ley de hierro. Esta relación es particular y depende de cada bobina; así para una bobina diferente, se tendrá una relación diferente que debe encontrarse de forma empírica.

El sistema fabricado es un sistema completo basado en la adquisición de una señal, que particularmente es la inductancia de la bobina sensora, la programación o adecuación e interpretación de esos datos, y la visualización correcta e idónea de esos datos en una pantalla. Todo el sistema es soportado mecánicamente por un armazón de material de impresión 3D con buen acabado.

El alcance de este proyecto es ser usado para medir inductancias de bobinas de una manera aceptable. Solo se pueden medir inductancias de bobinas, debido a que cualquier otra impedancia diferente, no respondería como lo haría una inductancia pura. Este sistema también puede servir para medir parámetros relacionados con la inductancia de bobinas; tales como la ley de hierro minera, y modificarlos o interpretarlos para formar otras relaciones, las cuales pueden ser presentadas de forma llamativa mediante la pantalla táctil que posee.

Ideas de mejoras para el sistema

El sistema electrónico para la medición de la ley de hierro funciona de acuerdo a lo esperado, pero puede seguir aumentando sus grandes capacidades. En esta sección se explican 5 ideas para aumentar las prestaciones del sistema, si es que se implementan.

- **Calibración automática:** Se puede idear un sistema electrónico mediante hardware más software que calibre automáticamente el CI AD5933 cada vez que transcurra un cierto periodo de tiempo. De esta forma, se tendrá mayor seguridad en los datos adquiridos de inductancia por este CI.
- **Alimentación eléctrica independiente:** El sistema actual funciona con la alimentación que le entrega la red eléctrica a la Raspberry Pi 3 mediante un transformador reductor. En el caso de que la red falle, también fallará la lectura de la ley de hierro. Debido a que la medida de la ley de hierro es tan importante, ya que implica a una industria minera

multimillonaria, es que se puede diseñar, fabricar e implementar un sistema de resguardo eléctrico para que la ley de hierro se mida incluso en fallas de la red eléctrica.

- Comunicación con otras redes dentro de la industria: La información que entrega el sistema desarrollado sobre la ley de hierro se muestra en su pantalla táctil y su alcance es local; solo las personas que estén en las cercanías de ellas podrán verla y responder según los valores de la misma. Se puede implementar un sistema para que la información de la ley de hierro pueda ser vista por muchos operadores en la industria minera y poder reaccionar a ella. Una forma sugerida es la conexión del sistema a la red SCADA (u otra) local de alguna mina de CAP. Esto se puede hacer debido a que la Raspberry Pi 3 posee un conector ethernet disponible para conexiones de comunicación externas.
- Mejoras en la interfaz de usuario: La interfaz visual de usuario presenta el valor calculado de la ley de hierro de forma amena al usuario. En esta interfaz se podrían añadir múltiples funcionalidades aprovechando que la pantalla no es solamente para ser observada, ya que además es táctil y el usuario puede interactuar con ella. Una mejora puede ser la inclusión de información histórica de la ley de hierro y procesos asociados que se puedan observar en la pantalla, así como la capacidad de incluir controles que modifiquen ciertos parámetros de los procesos para que puedan modificar el nivel de ley de hierro de forma manual. Ya que esto último es un nivel de control importante sobre el sistema, podría realizarse un sistema de usuarios con identificación, claves y niveles de acceso, para que, en caso de modificación de parámetros importantes del proceso, el responsable pueda ser identificado con facilidad. Entre muchas otras ideas posibles de mejoras a la interfaz de usuario.
- Reforzamiento a la estructura de soporte mecánico: La estructura de soporte mecánico fue fabricada con material de impresión 3D llamado PLA. Este es un plástico con buenas propiedades mecánicas y de acabado, pero no está hecho para ambientes industriales intensos. La estructura mecánica del sistema fabricado puede reforzarse o modificarse para cumplir con la seguridad ante golpes, calor, vibración, aceleración, ruido electromagnético, protección contra el polvo, la humedad o los líquidos, etc., presentes en un ambiente industrializado como lo es la industria minera de CAP.

Bibliografía

- [1] CAP Minería, «Memoria 2016 CAP Minería,» 2016. [En línea]. Available: http://www.capmineria.cl/wp-content/uploads/2017/03/cap_mineria_memoria_2016.pdf. [Último acceso: Octubre 2017].
- [2] S. M. Martínez y J. Humberto, «Medición de ley en minería del hierro mediante propiedades magnéticas,» PUCV, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Valparaíso, 2017.
- [3] M. Sadiku y A. Charles, Fundamentos de Circuitos Eléctricos, Ciudad de México, México: McGraw-Hill Interamericana, 2006.
- [4] A. Helfrick y C. William, Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición, Ciudad de México. México: Prentice Hall Hispanoamericana , 1991.
- [5] Keysight Technologies, «Impedance Measurement Handbook,» Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2017].
- [6] Analog Devices, «AD5933 Datasheet,» [En línea]. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf>.
- [7] X. Solas, «Introducción práctica a la Síntesis Digital Directa,» Febrero 2001. [En línea]. Available: <http://www.qsl.net/ea3gcy/pdf/0201.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2017].
- [8] P. Alvarado Moya, Procesamiento Digital de Señales, Cartago, Costa Rica: Tecnológico de Costa Rica, 2011.
- [9] E. Upton, Raspberry Pi, Guía del Usuario, Segunda Edición.
- [10] Electrocomponentes S.A., «Multímetro UNI-T UT70A,» [En línea]. Available: goo.gl/BuadtN.