

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN IMPEDANCIOMETRO PARA
CARACTERIZACION NO DESTRUCTIVA DE SÓLIDOS POROSOS**

Autores:

**LUIS FERNANDO BUSTAMANTE HERNANDEZ
CLAUDIA MARCELA MARTINEZ DUARTE**

TRABAJO DE GRADO

CIMBIOS



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

2007

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN IMPEDANCIOMETRO PARA
CARACTERIZACION NO DESTRUCTIVA DE SÓLIDOS POROSOS**

Autores:

LUIS FERNANDO BUSTAMANTE HERNANDEZ

CLAUDIA MARCELA MARTINEZ DUARTE

TRABAJO DE GRADO

Director

ING. DAVID ALEJANDRO MIRANDA MERCADO, MSC

Codirectores:

ING. JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ, MPE.

FÍSICO. JAIRO HUMBERTO MARÍN CADAVID, MSC

CIMBIOS



**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

BUCARAMANGA

2007

A DIOS la guía de todos mis proyectos y compañía en los momentos más difíciles.

A mi madre MARINA la mujer que ha entregado su vida por verme crecer como una mejor persona, me ha dado todo su apoyo y sus cuidados, a mi padre JORGE quien ha sido mi mayor ejemplo de responsabilidad y entereza.

A mi hermano VICTOR del cual me siento muy orgullosa y se que va a ser grandes cosas en su vida.

A mi querido LUIFER el mejor de los compañeros de trabajo, quien ha estado conmigo en los buenos y malos momentos convirtiéndose en mi apoyo incondicional, con su comprensión, su ternura y todo su cariño.

A MIS COMPAÑEROS DE CARRERA quienes compartieron conmigo esta etapa de mi vida

CLAUDIA MARCELA

*Para triunfar no se requiere ser
Privilegiado con dones especiales.
Se requiere tan solo ser una persona normal,
Con la claridad de saber quien es
Y qué quiere hacer en el futuro,
Miguel Ángel Cornejo*

En la vida siempre hay etapas importantes que deben ser superadas, y es mas grato cuando a nuestro lado encontramos personas que con su cariño y ayuda desinteresada contribuyen a que alcancemos nuestras metas

Estoy agradecido con Mi Dios por permitirme culminar este ciclo y poner

A mi lado personas tan importantes como lo es

*Mi mama Rita que con su amor incondicional
y su entrega hicieron posible ser la persona que soy hoy*

A mi papa Luis Miguel que siempre con su apoyo y confianza

Ha sido un soporte en mi vida

A la gordita Karen mi hermana por aguantarme en todo

Momento y ser especial conmigo

A la mujer que ha compartido una parte importante de mi vida,

Mi compañera y amada Claudia Quien me hace

Ser cada día una mejor persona, con su comprensión, consejos y cariño.

LUIS FERNANDO

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos:

A Dios por permitir llevar a cabo y con éxito el proyecto. Bendito seas por siempre Señor.

A nuestro amigo y director de esta investigación David Alejandro Miranda Mercado, por su confianza y respaldo, por compartir desinteresadamente sus conocimientos y su experiencia, por las incansables horas en la búsqueda de nuestra meta.

Al Mpe Jaime Guillermo Barrero Pérez, por depositar en nosotros su confianza, sus comentarios y sus palabras de motivación.

A la Corporación para la investigación de la Corrosión por permitirnos trabajar en sus instalaciones, por su hospitalidad, nos sentimos parte de su equipo de trabajo.

A nuestros padres y amigos quienes con sus valiosos consejos y apoyo incondicional no nos dejaron desfallecer en ningún momento.

A todas las personas que de una u otra manera hicieron posible llevar a cabo la culminación exitosa del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	14
1. FUNDAMENTACION TEORICA	1
1.1 MATERIALES CERAMICOS	1
1.1.1 Clasificación de materiales cerámicos.	1
1.1.2 conformado de materiales cerámicos	11
1.1.3 Materias primas.	12
1.1.4 Procesos de post-conformado.	13
1.2 POROSIDAD Y MATERIALES POROSOS	14
1.2.1 Porosidad	15
1.2.2 Influencia de la porosidad	16
1.2.3 CARACTERIZACION DE MATERIALES POROSOS	17
1.3 METODOS DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELECTRICA.	23
1.3.1 Método de dos puntos	23
1.3.2 Método de cuatro puntos	24
1.3.3 Método de Van der Pauw	26
1.3.4 Contactos con la muestra	27
1.4 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN MEDIOS POROSOS	29
1.5 NUESTRO PROYECTO	30
2. DISEÑO DEL IMPEDANCIOMETRO PARA ESTUDIO DE SÓLIDOS POROSOS	32
2.1 ESPECIFICACIONES DEL IMPEDANCIOMETRO	32
2.1.1 Amplitud de la señal de excitación para mediciones de espectro de impedancia eléctrica en sólidos porosos.	32

2.1.2 Análisis del impedanciometro de Andrea Robles _____	33
2.1.3 Mejoras y cambios al impedanciometro de Andrea Robles _____	35
2.1.4 Impedanciometro integrado AD5933 de analog devices, ventajas y aplicación _____	41
2.1.5 Diseño del hardware _____	50
2.1.6 Software _____	65
3. PROTOCOLO PARA LA MEDICION DE ESPECTRO DE IMPEDANCIA ELECTRICA EN SÓLIDOS POROSOS _____	71
3.1 CUIDADO CON LOS SÓLIDOS POROSOS _____	71
3.2 JAULA DE FARADAY _____	72
3.3 PROTOCOLO DE MEDICION _____	74
3.3.2 Método de medición. _____	79
3.3.3 Toma de datos. _____	80
3.3.4 Condiciones del laboratorio _____	85
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS _____	90
4.1 MEDIDAS EN SÓLIDOS POROSOS _____	90
4.2 ERROR DE IMPEDANCIA _____	98
4.2.1 Calibración del sistema y pruebas del AD5933. 100	
4.2.2 Simulaciones AD5933. _____	107
4.3 PROTOCOLO DE COMUNICACIONES MIMP07-PC _____	112
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____	118
6. BIBLIOGRAFIA _____	122

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Porosímetro de mercurio _____	18
Figura 2. Microscopio óptico de polarización. _____	19
Figura 3. Partes del microscopio electrónico de barrido _____	20
Figura 4. Microscopio electrónico de barrido _____	21
Figura 5. Picnómetro _____	23
Figura 7. Método de los cuatro puntos _____	25
Figura 8. Método de Van der Pauw _____	26
Figura 9. Diagrama de bloques del Medidor de impedancia eléctrica en tejido cervicouterino in-Vitro _____	34
Figura 10. Fuente de corriente Howland _____	36
Figura 11. Fuente de corriente Howland Mejorada _____	37
Figura 12. Fuente de corriente controlada por voltaje _____	37
Figura 13. Amplificador operacional no inversor _____	38
Figura 14. Primer diseño del Impedanciometro. Diagrama de bloques _____	39
Figura 15. Segundo diseño del Impedanciometro. Diagrama de bloques. _____	40
Figura 16. Diagrama de bloques funcional _____	43
Figura 17. Diagrama de pines _____	43
Figura 18. Pasos del barrido de frecuencia _____	47
Figura 19. Diagrama de bloques _____	51
Figura 20. Regulador LDO MCP1700 _____	53
Figura 21. Esquema de conexión del MCP1700 para obtener 3.3V a la salida _____	53
Figura 22. Esquema de control del DSP _____	55
Figura 23. Compuerta Nand _____	57
Figura 24. Integrado FT232BM _____	58
Figura 25. Diagrama esquemático FT232BM _____	59
Figura 26. Esquema de conexión AD5933 _____	60
Figura 27. Capa inferior circuito impreso _____	64

Figura 28. Capa superior circuito impreso _____	64
Figura 30. Propiedades del bean SW_I2C _____	66
Figura 31. Diagrama de tiempo. _____	67
Figura 32. Ejemplo de conexión entre dos dispositivos _____	70
Figura 34. Relación frecuencia vs. Profundidad en conductores _____	73
Figura 35. Jaula de Faraday utilizada en las mediciones _____	74
Figura 36. Analizador de Impedancia Solartron 1280B _____	76
Figura 37. Método del arco por descarga de condensadores _____	78
Figura 38. Diseño de los electrodos _____	79
Figura 39. Sonda de medición _____	79
Figura 40. Medidor de Temperatura y Humedad. Termo Higrometer _____	82
Figura 41. Cerámicos Porosos _____	83
Figura 42. Conservación de las piezas _____	83
Figura 43. Ficha de información _____	84
Figura 44. Zona de trabajo _____	86
Figura 45. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BF4 _____	90
Figura 46. Resultados de la medición por la cara lateral izquierda, Cerámico BF4__	91
Figura 47. Resultados de la medición por la cara frontal, Cerámico BF4 _____	91
Figura 48. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BG2 _____	92
Figura 49. Resultados de la medición por la cara Lateral Izquierda, Cerámico BG2_	92
Figura 50. Resultados de la medición por la cara Frontal, Cerámico BG2 _____	93
Figura 51. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BD10 _____	93
Figura 52. Resultados de la medición por la cara Lateral Izquierda, Cerámico BD10	94
Figura 53. Resultados de la medición por la cara Frontal, Cerámico BD10 _____	94
Figura 54. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BE9 _____	95
Figura 55. Resultados de la medición por la cara Lateral Izquierda, Cerámico BE9_	95
Figura 56. Resultados de la medición por la cara Frontal, Cerámico BE9 _____	96
Figura 57. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BF3 _____	96
Figura 58. Resultados de la medición por la cara Lateral Izquierda, Cerámico BF4_	97

Figura 59. Resultados de la medición por la cara Frontal, Cerámico BF3 _____	97
Figura 60 Tensión de excitación de salida a una frecuencia de 10 KHz. _____	106
Figura 61. Tensión de excitación de salida a una frecuencia de 50 KHz. _____	106
Figura 62. Tensión de excitación de salida a una frecuencia de 100k _____	107
Figura 63. Conexión del circuito de carga al AD5933_____	107
Figura 64. Magnitud vs. Frecuencia. Variación de Impedancia realimentación ____	108
Figura 65. Magnitud vs. Frecuencia. Variación de Impedancia realimentación ____	109
Figura 66. Magnitud vs. Frecuencia. Variación de la amplitud de la señal de excitación. _____	110
Figura 67. Magnitud vs. Frecuencia. Sistema mal calibrado _____	111
Figura 68. Tensiones de entrada y salida para un sistema mal calibrado _____	112
Figura 69. Caracteres del nombre de un comando _____	113
Figura 70. Protocolo de comunicación PC- MIMP07 _____	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Amplitud de la señal de salida con su respectivo nivel de offset. _____	42
Tabla 2. Descripción de la función de los pines _____	43
Tabla 3. Nombre y dirección de los registros _____	48
Tabla 4. Registro de control _____	49
Tabla 5. Pines del conector JTAG _____	56
Tabla 6. Rangos de medición y errores _____	98
Tabla 7. Datos del barrido en frecuencia _____	102
Tabla 8. Magnitud de impedancia para una resistencia de 7.5K Ω y porcentajes de error. _____	104
Tabla 9. Medición de la fase de un capacitor y porcentajes de error _____	104
Tabla 10. Descripción y nombre de los comandos del protocolo de comunicaciones.	113

RESUMEN

TITULO: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN IMPEDANCIOMETRO PARA CARACTERIZACION DE SÓLIDOS POROSOS*

AUTORES: MARTINEZ DUARTE Claudia Marcela, BUSTAMANTE HERNANDEZ Luís Fernando **

Palabras claves: Espectro de impedancia eléctrica, Sólidos Porosos, Método de los dos puntos, Puerto USB, protocolos de comunicación, AD5933.

Este documento describe el diseño y la implementación de un medidor de impedancia eléctrica. Las mediciones se realizan en sólidos porosos, principalmente en cerámicos compuestos a base de arcilla.

El medidor de impedancia cuenta como elemento principal el C.I. AD5933 de *Analog devices*, este dispositivo genera señales de excitación a frecuencias variables, siendo el barrido en frecuencia configurable principalmente con tres parámetros: inicio de frecuencia, numero de incrementos e incrementos. Posteriormente realiza la transformada discreta de fourier (DTF), y entrega los valores necesarios para llevar a cabo el cálculo de la impedancia. El rango de frecuencia con que cuenta el equipo va desde 1khz hasta 100khz.

El control del AD5933 y la transmisión de datos al FT232BM quien permite la comunicación con el PC a través el puerto USB, se realizo mediante el DSP56F801 de la empresa *freescale*, a través del protocolo de comunicación I²C. Para el manejo del DSP se empleó un software llamado Code Warrior de fácil acceso. Se diseño un protocolo de comunicación para la comunicación del PC-MIMP07, con el fin de manejar los parámetros más significativos del barrido en frecuencia mediante una interfaz. Se muestran los resultados obtenidos de algunas medidas realizadas en los materiales objeto de estudio, con el fin de tener un parámetro de comparación al momento de realizar mediciones con el equipo diseñado (MIMP07), al cual se le realizaron pruebas con elementos pasivos para comprobar su correcto funcionamiento.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Director: David Alejandro Miranda Codirector Jaime Guillermo Barrero Pérez, Jairo Humberto Marín C.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN IMPEDANCIOMETER FOR CHARACTERIZATION OF POROUS SOLIDS*

AUTHORS: MARTÍNEZ DUARTE, Claudia Marcela, BUSTAMANTE HERNÁNDEZ, Luis Fernando**

KEY WORDS: electric impedance Spectrum, porous solids, method of the two points, port USB, communication protocols, AD5933

DESCRIPTION:

This document describes to the design and the implementation of a meter of electrical impedance. The mensurations are carried out in porous solids, mainly in ceramic compound clay base.

The meter of impedance counts as main element the C.I. AD5933 of Analog devices, this device generates excitement signals to variable frequencies, being mainly the sweep in frequency configurable with three parameters: start of frequency, number of increments and increments. Later on, its carries out the one discrete Fourier transform (DFT), and its gives the necessary values to carry out the calculation of the impedance. The range of frequency with which it counts the team its goes from 1 khz to 100 khz.

The control of the AD5933 and the transmission of data to the FT232BM who allows the communication with the PC, through the port USB, were carried out by means of the DSP56F801 of the company Freescale, through the communication protocol I²C. For the handling of the DSP software called Code Warrior of easy access was used. A communication protocol was designed for the communication of the PC-MIMP07 with the purpose of managing the most significant parameters in the sweep in frequency by means of an interface. The obtained results of some measures are shown carried out in the materials study object, with the purpose of having a comparison parameter to the moment to carry out mensurations with the team designed (MIMP07), to which were carried out tests with passive elements to confirm their correct operation.

* Degree Project.

**School of electrical, electronic and telecommunications engineering. Director Ing & Fisico David Alejandro Miranda, Msc

INTRODUCCION

Los materiales cerámicos tradicionales con el paso de los años se han ido perfeccionando convirtiéndose en una gran revolución tecnológica; pese a su gran variedad de composiciones y estructuras, el enfoque unificador permite hoy en día racionalizar su estudio e incluirlos en la categoría de los materiales inorgánicos, no metálicos, abarcando un amplio campo de aplicaciones en la industria.

En la actualidad, la industria cerámica cubre necesidades de la vida doméstica, artística y cultural hasta las más sofisticadas realizaciones en la microelectrónica, la navegación espacial y otros aspectos que constituyen la base de nuestra moderna civilización, teniendo como objetivo lograr la mayor eficiencia con el menor costo posible, utilizando materias primas rigurosamente controladas, lo que finalmente permite tener una pieza con mayor valor agregado, y ser un producto más competitivo.

No obstante, en lo que respecta al estudio, medición y evaluación de sus propiedades, es necesario desarrollar nuevas técnicas que permitan hacer mediciones, durante el proceso productivo y después de finalizado éste.

En este proyecto se explora una solución que permita resolver la carencia de la industria cerámica regional y nacional, de una técnica que permita caracterizar las propiedades de los materiales, necesaria tanto para el control de calidad como para el estudio de mejoras introducidas en la composición y procesos de dichos materiales. Es por esto que se realizaron estudios para desarrollar una nueva técnica con la cual el proceso productivo cerámico sea más competitivo, permitiendo la detección temprana de la aparición de posibles deficiencias en las resistencias de sus materiales.

En el presente documento se encuentra dividido en cuatro capítulos. En el primer capítulo se presenta la fundamentación teórica en relación con los sólidos porosos estructura, propiedades, porosidad, métodos ya existentes para caracterizar materiales porosos. En el segundo capítulo se expone el diseño del hardware, la descripción del equipo base de nuestra investigación³ y el diseño finalmente implementado con la respectiva explicación de cada una de las etapas que lo conforman, posteriormente se presenta el software, los respectivos protocolos de comunicación entre dispositivos, En el tercer capítulo se presenta los cuidados a tener con los materiales cerámicos objeto de nuestro estudio, el protocolo de medición. En el cuarto capítulo se presentan los resultados de las mediciones de impedancia eléctrica realizadas en los sólidos porosos y su respectivo análisis, las pruebas para evaluar el funcionamiento del equipo, el procedimiento de calibración del mismo, simulaciones realizadas al AD5933 y por último se presenta el protocolo de comunicación entre el PC y MIMP07 el equipo diseñado.

³ ROBLES, Leonor y CHÁVEZ, Felipe. Medición de Impedancia Eléctrica en Tejido Cervico Uterino In-Vitro. Bucaramanga, 2005. Trabajo de Grado (Ingeniería electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Bioingeniería.

1. FUNDAMENTACION TEORICA

1.1 MATERIALES CERAMICOS⁴

Los materiales cerámicos pertenecen al grupo de sólidos porosos, en su proceso de fabricación se forman a base de polvos, por lo tanto las piezas desarrolladas presentan niveles de porosidad que se ven reflejados en sus propiedades mecánicas.

De manera muy general los materiales cerámicos son materiales inorgánicos no metálicos, constituidos por elementos metálicos y no metálicos enlazados principalmente mediante enlaces iónicos y/o covalentes. Son materiales típicamente duros y frágiles con baja tenacidad y ductilidad. Se comportan usualmente, como buenos aislantes eléctricos y térmicos debido a la ausencia de electrones conductores. Normalmente, poseen temperaturas de fusión y estabilidad química relativamente alta en medios agresivos, debido a la estabilidad de sus fuertes enlaces.

Actualmente existen grandes desarrollos en diferentes campos debido a los materiales cerámicos, por lo que un estudio de sus propiedades resulta de gran importancia para un mejoramiento de sus características.

1.1.1 Clasificación de materiales cerámicos⁵. Debido a la gran diversidad de materiales cerámicos; estos se dividen dependiendo de su aplicación, en uno de los

⁴ <http://www.madrimasd.org/materiales/Asesorias/default.aspx+usos+materiales+ceramicos&hl=es>

⁵ GONZALEZ, Liliana y PONCE, Nilson. Materiales Cerámicos en Ingeniería. Bucaramanga, 2000, Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Mecánicas

siguientes grupos: vidrios, productos de arcillas, refractarios, abrasivos, cementos y cerámicos avanzados⁶.

Vidrios. Los vidrios forman un grupo familiar de cerámicas los cuales están formados por silicatos no cristalinos que contienen otros óxidos que influyen en sus propiedades, principalmente CaO , Na_2O , K_2O y Al_2O_3 . Las aplicaciones típicas son recipientes, ventanas, lentes y fibra de vidrio.

Productos de Arcillas. Son los más ampliamente utilizados y la mayoría se puede clasificar en dos clases:

- × **Productos estructurales de arcilla.** Son aquellos que en aplicaciones con integridad estructural muy importante incluyen a los ladrillos de construcción, baldosas y tuberías de aguas residuales.
- × **Porcelana.** En este grupo se incluye la porcelana, producto de alfarerías, vajillas, la porcelana fina y los artículos sanitarios.

Refractarios. La capacidad de soportar altas temperaturas sin fundir o descomponerse, asimismo, la capacidad de permanecer inertes sin reaccionar cuando son expuestos a medios agresivos y la capacidad de producir aislamiento térmico, son sus propiedades más revelantes.

Abrasivos. Son utilizados para desgastar, desbastar o cortar otros materiales, los cuales son necesariamente blandos. Entre los abrasivos más comunes tenemos el carburo de silicio, el carburo de tungsteno, el óxido de aluminio y la arena de sílice.

⁶ Hay que tener en cuenta que existen diferentes clasificaciones acerca de los materiales cerámicos dependiendo del autor.

Cementos. Son aquellos materiales cerámicos inorgánicos, a este grupo pertenece el cemento, el yeso y la caliza. Su principal característica es que cuando son mezclados con agua forman una pasta que después fragua y se endurece.

Cerámicos avanzados. Aunque las cerámicas tradicionales representan la mayor parte de la producción de materiales cerámicos, se han desarrollado algunos materiales cerámicos denominados “cerámicas avanzadas” los cuales han encontrado un lugar prominente en nuestra tecnología avanzada. Están constituidos⁷ típicamente por compuestos puros o casi puros tales como óxidos, carburos o nitruros, como el nitruro de silicio (Si_3N_4), la zirconita (ZrO_2), y combinaciones con algunos óxidos refractarios.

1.1.2 conformado de materiales cerámicos⁸ Las etapas de conformado y post-conformado de materiales cerámicos tienen la finalidad de reducir al máximo los niveles de porosidad en las piezas fabricadas, por tal razón es de gran importancia tener cuidado en cada parte del proceso y, además seleccionar cuidadosamente las materias primas con el fin de obtener las características deseadas.

Los materiales cerámicos, a excepción de los vidrios son manufacturados a partir de polvos de partículas de tamaños controlados; esta materia prima en forma de polvos es mezclada con aditivos y formada por varios medios en cuerpos verdes (cuerpo que ha sido conformado y secado pero no-cocido), los cuales son cocidos para que desarrollen la micro estructura y las propiedades requeridas.

La variedad de cerámicos es extremadamente grande y las vías o rutas de procesamiento son altamente variadas. Los materiales inicialmente son minerales naturales o productos manufacturados muy sofisticados, que después sufren un proceso de reducción en partículas, las cuales son conformadas por secuencias de procesamiento que divergen para los diferentes tipos de cerámicos.

⁷ <http://www.madrimasd.org/materiales/Asesorias/default.aspx>

⁸ GONZALEZ, Op Cit.

1.1.3 Materias primas. Las materias primas necesarias para el procesamiento de productos cerámicos tienen su principal origen en la naturaleza, aunque hay una tendencia general hacia la fabricación de estas, debido a que los depósitos naturales están siendo agotados y hay requerimientos más severos en cuanto a las propiedades de los materiales.

Materias primas naturales. Muchas arcillas, piedras calizas, cuarzo y minerales relacionados, son usados directamente en los procesos de conformado; los primeros tres son ampliamente distribuidos en la naturaleza y su selección es hecha bajo los parámetros de economía del transporte y explotación de las minas y la ausencia de impurezas.

Materias primas procesadas. Los procesos geológicos, con sus largos tiempos de formación nos han suministrado muchas materias primas, sin embargo, los requerimientos tecnológicos como la cantidad y composición han inducido al ingeniero a un mejor aprovechamiento de estas materias primas, realizándose un proceso adicional. Muchos de los procesos son similares, ya sea que estén ocurriendo en procesos geológicos lentos en la naturaleza o procesos artificiales más rápidos, debido a que los mismos principios químicos y físicos se aplican; la única diferencia significativa son los tiempos más cortos que se obtienen para los procesos disponibles.

Materias primas para cerámicos de ingeniería. Estos materiales son fabricados a partir de materias primas producidas artificialmente en forma de polvos de alta dureza derivados químicamente tales como alumina, zirconio, nitruro de silicio, nitruro de aluminio y carburo de silicio. Los cerámicos de ingeniería usan materias primas de ambas, derivadas químicamente y de formulación tradicional.

Como los requerimientos de funcionamiento son más críticos en el caso de estos materiales, la pureza química, tamaño controlado de las partículas, reactividad y uso de aglomerantes llegan a ser muy importantes. Partículas extremadamente finas y de

tamaño uniforme pueden producir un empaquetamiento ordenado libre de defectos de poros, provisto de altas ratas y menores tiempos de sinterizado, de esta manera se previene un exagerado crecimiento de los granos, lo cual es nocivo para las propiedades del material.

1.1.4 Procesos de post-conformado⁹ Los materiales cerámicos que se forman mediante moldeado por deslizamiento, conformación hidropultrástico y en algunos casos por compresión de polvos, deben secarse antes del tratamiento final a temperatura alta. Tras darle forma al artículo, las partículas del material cerámico no se encuentran en contacto íntimo ya que están separadas por una capa delgada y continua de agua. Durante el proceso de secado el agua se evapora. Inicialmente la velocidad de secado es rápida y se produce un considerable encogimiento. Esta etapa rápida de secado se controla con cuidado en medios de humedad y temperatura constantes para evitar que el producto se retuerza y agriete.

Proceso de cocción. Es la etapa final en la producción del material cerámico. En la cocción el componente seco se hace más denso por calentamiento a una temperatura alta. Esto se debe a los procesos de sinterización y vitrificación.

Sinterización. Es la consolidación de un polvo mediante temperaturas elevadas por tiempos prolongados que, sin embargo, son inferiores al punto de fusión de cualquiera de las fases principales del material. En el sinterizado se reemplazan las interfases de alta energía sólido-gas por interfases de energía más baja sólido-sólido (límites de grano). Esta reducción de energía total de las interfases es la fuerza que impulsa al proceso de sinterizado.

⁹ JC, Anderson, Jm, Alexander, Ciencia de los materiales, Procesos de post-conformado, 2 edición, México DF, 1998, Noriega Editoriales, 1998, 359-362p.

A medida que se efectúa la sinterización, la densidad de la cerámica aumenta, pero el producto final siempre tiene algo de porosidad. Desafortunadamente el crecimiento de granos, que tienen efecto nocivo en las propiedades mecánicas, también se verifica en el sinterizado. Por tanto se debe buscar un punto intermedio entre maximizar la densidad y minimizar el crecimiento del grano. Un proceso modificado que se emplea en ciertos casos es la compresión en caliente, que es la conformación y cocción simultáneamente. Tienen ventajas con respecto a la sinterización normal porque pueden lograrse mayores densidades y tamaños de grano más finos a temperaturas inferiores.

Vitrificación. Es la densificación en presencia de un líquido viscoso; es el proceso que se efectúa en la mayoría de la cerámica que se produce a gran escala. Difiere de la sinterización de fases reactivas de muchas maneras, pero particularmente por la cantidad de líquido presente en la cocción. En la vitrificación hay líquido presente, aunque la proporción debe ser menos del 40% para evitar distorsiones (hundimientos y torceduras) del componente por las fuerzas de gravedad. Inicialmente hay un incremento rápido de densidad a medida que las partículas sólidas individuales son atraídas por la fase líquida, pero la velocidad de densificación desciende el tamaño de las partículas, bajando la viscosidad e incrementando la tensión superficial. En la mayoría de casos la tensión superficial no cambia significativamente debido a la composición o la temperatura, y en consecuencia las variables importantes son el tamaño de partícula y la viscosidad del líquido. Es evidente que se puede controlar el tamaño de partícula en cierto grado, pero la viscosidad de fase líquida es la variable que mejor se controla.

1.2 POROSIDAD Y MATERIALES POROSOS

En la actualidad existen muchos tipos de materiales porosos, de los cuales una gran cantidad utilizan aditivos formadores de poro (para obtener una porosidad específica),

debido a que la aplicación para la cual han sido diseñados necesita de esta característica, mientras que la otra parte de estos materiales en su proceso de fabricación se trata de minimizar al máximo el nivel de porosidad ya que este va en detrimento de sus propiedades físicas.

1.2.1 Porosidad¹⁰. Son sistemas de vacíos presentes en la estructura interna del material. También se puede definir como el volumen de huecos presente en un material. Se expresa por el porcentaje de volumen de poros respecto al volumen total del material (porosidad total o bruta). Además de esta porosidad total, se define como porosidad útil la correspondiente a huecos interconectados. Este concepto de porosidad útil está directamente relacionado con el de permeabilidad o capacidad de flujo a través de él.

La porosidad es una característica micro estructural de las piezas sinterizadas obtenidas por la técnica de la metalurgia de polvos. La magnitud de la porosidad varia dependiendo del tipo de pieza a fabricar, entre menor sea el tamaño del grano utilizado mas baja será la porosidad útil respecto a la total.

La porosidad se encuentra bajo dos formas:

- × Porosidad cerrada, en el caso en que los poros no se comuniquen entre ellos, ni con el exterior.
- × Porosidad abierta, en el caso en que los poros se comuniquen entre si y con el medio exterior al material.

También se clasifica: absoluta, efectiva y no efectiva.

- × La porosidad absoluta considera como volumen poroso, el total de poros que estén o no interconectados.

¹⁰ <http://www.monografias.com>

- × La porosidad efectiva se refiere al porcentaje de poros interconectados. Se considera como el volumen poroso solamente conectados entre si.
- × La porosidad no efectiva representa la diferencia entre las porosidades anteriores, es decir, la porosidad absoluta y la efectiva.

1.2.2 Influencia de la porosidad.¹¹ En las técnicas de fabricación de cerámicos, el material se forma a base de polvos, al compactar o conformar estas partículas en una sola estructura y obtener la forma deseada, se pueden formar poros (espacios vacíos) entre dichas partículas, muchos pueden ser eliminados durante el tratamiento térmico posterior. Sin embargo, a menudo ocurre que este proceso de eliminación de poros es incompleto, debido a que permanece algún tipo de porosidad. Dicha porosidad tendrá un efecto negativo en las propiedades mecánicas del material, reduciendo el área efectiva de la región transversal de las piezas, ocasionado así un incremento del valor medio del esfuerzo transferido a través de los puentes del material entre los poros. Para optimizar las propiedades mecánicas del material es preferible la presencia de poros aislados que interconectados porque la reducción del área efectiva es menor.

Como se mencionó en el párrafo anterior las propiedades y el comportamiento de las piezas dependen de la porosidad existente entre ellas, siendo considerados diferentes ensayos para la evaluación de las propiedades mecánicas: resistencia a la tracción, ductibilidad, resistencia dinámica (impacto y fatiga), dureza y resistencia a la ruptura transversal. Donde el ensayo de resistencia a la ruptura transversal es el más adecuado debido al carácter frágil de los materiales porosos.

La porosidad es desfavorable para la resistencia a la ruptura por dos razones¹²: primero, los poros reducen el área de la sección a través de la cual se aplica la carga, y

¹¹ ESTUPIÑAN DURAN, Hugo, Preparación y evaluación de materiales porosos a base de titanio para aplicaciones de ingeniería biomédica, Bucaramanga, 2005, 133 h. Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Química, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

¹² <http://www.madrimasd.org/materiales/Asesorias/default.aspx>

segundo, también actúa como concentrador de tensión, ya que en caso de un poro esférico esta es amplificada en un factor de dos. La influencia de la porosidad en la resistencia es mucho más dramática debido a que un 10% de porosidad puede disminuir la resistencia a la ruptura en un 50% del valor medido para el material no poroso.

1.2.3 CARACTERIZACION DE MATERIALES POROSOS¹³

Porosimetría de mercurio. La porosimetría de mercurio es una técnica muy sencilla y rápida, se basa en el hecho de que el mercurio es un metal líquido que no se moja, y por lo tanto, necesita que se someta bajo presión para que penetre en el sistema poroso. A medida que la presión aumenta, el mercurio va introduciéndose en poros cada vez más pequeños. La relación de presión ejercida sobre el mercurio, P , y el tamaño de los poros (radio, r) esta regulada por la ecuación de Washburn (1921)

$$P \approx \frac{2 * \sigma * \cos \theta}{r} \quad (1)$$

Donde σ (480 erg*cm²) es la tensión superficial del mercurio y θ , es el ángulo de contacto entre el mercurio y la superficie del poro. Esta ecuación supone que el poro tiene una geometría cilíndrica.

La caracterización del sistema poroso con esta técnica se basa en aumentar la presión de inyección y medir el volumen del mercurio que entra en la roca, de aquí se obtiene la curva de intrusión (entrada de mercurio). Por otro lado, llegado al punto máximo de presión y volumen de mercurio intruido se decrece gradualmente la presión para forzar la salida de mercurio y se registra la curva de extrusión (salida de mercurio).

¹³ BENAVENTE GARCIA, David, Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos, 2002, 291 h, Tesis de doctorado, Universidad de Alicante, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias de la tierra y Medio Ambiente.

De esta técnica se puede obtener información del volumen de mercurio intruido, y por lo tanto, la porosidad conectada, además se puede calcular la distribución de tamaños de poros, pero también tiene grandes limitaciones, la mayor de ellas se debe a la propia complejidad del sistema poroso de la gran mayoría de los sólidos naturales. En primer lugar la técnica está basada en el modelo de tubos capilares, y en segundo lugar la geometría de las conexiones entre poros de diferente dimensión provoca que algunos tipos de poros se caractericen incompletamente mientras otros se subestiman. Otra limitación es debida a las presiones empleadas en el desarrollo de un ensayo son tan elevadas que puede ocasionar que la estructura porosa pueda ser dañada y modificada durante el mismo.

Figura 1. Porosímetro de mercurio



Fuente: <http://www.acilweber.com.br/quantachrome.htm>

Microscopio óptico de polarización. El microscopio óptico de polarización, permite a partir de una lámina delgada, obtener información mineralógica, textural y del sistema poroso de la roca de forma sencilla y rápida.

La función del microscopio es suministrar la imagen aumentada y si se desea identificar distintos componentes con propiedades ópticas similares se utilizan distintas tinciones. La textura de la roca define el aspecto físico general de la misma, incluyendo los aspectos geométricos y las relaciones mutuas de sus componentes.

La caracterización de la textura (tamaño de los granos) es fundamental en el entendimiento de la durabilidad de la muestra porque va a incidir directamente en el tipo de porosidad, el tamaño, y morfología de los poros, su grado de conexión, etc.; y por otro lado, en el grado de cementación que esta estrechamente relacionado con las propiedades mecánicas.

El límite de detección para el estudio del sistema poroso depende del tipo de microscopio utilizado (y cámara digital). A partir de las imágenes obtenidas con el microscopio óptico se pueden cuantificar, con un software de tratamiento de imágenes, el sistema poroso.

Figura 2. Microscopio óptico de polarización.



Fuente:http://www.uned.es/cristamine/_vit_bin/shtml.exe/crist_opt/cropt_micro.htm/map

Microscopio electrónico de barrido. La microscopia electrónica de barrido, SEM (scanning electron microscope) es una técnica ampliamente utilizada, fácil de utilizar e interpretar, de gran utilidad y casi indispensable para el estudio de un sistema poroso. La gran profundidad de foco de este microscopio hace que se puedan observar rasgos muy pequeños e irregulares, los cuales no se pueden analizar bajo en microscopio óptico.

Figura 3. Partes del microscopio electrónico de barrido



Fuente: <http://www.anatomohistologia.uns.edu.ar/plantilla.asp?zona=modnicero>

El microscopio electrónico consta de un dispositivo que emite un haz de electrones a los que se aplica un voltaje en un rango determinado. Cuando el haz choca con la superficie de la muestra algunos electrones son reflejados como retrodispersados, BSE (backscattered electrons) y otros se liberan como electrones secundarios de baja energía, SE (secondary electrons).

El estudio de microscopia con electrones secundarios (SE) permite caracterizar tridimensionalmente la textura, el tamaño de grano, la ordenación de los cristales, la forma de los distintos granos, el aspecto externo e interno que presentan, el tipo de porosidad, la morfología de los poros, etc. Las muestras analizadas o estudiadas con este modo de trabajo se deben cubrir con un elemento conductor bien sea oro o carbono.

Para obtener imágenes de electrones retrodispersados (BSE) de buena calidad y resolución, las superficies deben ser pulidas y recubiertas de carbono. Esto permite diferenciar la presencia de distintos elementos en función de su número atómico y por lo tanto, permiten el reconocimiento de varios minerales y los poros.

Figura 4. Microscopio electrónico de barrido



Fuente: <http://www.anatomohistologia.uns.edu.ar/plantilla.asp?zona=modnicero>

Tratamiento de imágenes BSE. Las imágenes recogidas por el detector de BSE vienen dadas en escala de grises. El histograma de escala de grises está comprometido desde el cero, que corresponde al negro, hasta el 255, que corresponde al blanco. Cada fase de la muestra tiene asociado un valor de escala de grises en función de su peso atómico.

De la caracterización del sistema poroso con esta técnica se puede obtener información de la porosidad (de imagen), calculada como la sumatoria del área de todos los poros dividido por el área de la imagen; la distribución de tamaños de poros y la forma del poro.

El sistema poroso se determina binarizando la imagen en espacio poroso (resina y aire) y en matriz de la muestra. Para realizar esta conversión es necesario un umbral, en el histograma, que pueda definir tanto el poro como los granos; la selección de todos los poros, incluidos los del borde de la imagen, proporciona un resultado realista para el cálculo de la porosidad y la distribución de tamaños de poro. Sin embargo, en el estudio del factor de forma solo se deben elegir los poros que no tocan el borde la imagen.

La exactitud en la caracterización del sistema poroso con esta técnica puede estar influenciada por diferentes errores. Se pueden destacar los errores producidos por la muestra, a causa de la impregnación, pulido o presencia de burbujas de aire en la resina. La imagen y el software también pueden producir errores, tales como el error de escala, brillo, poros en el borde de la imagen o la elección de límites para resolver los poros de los granos. Por último la desventaja más importante que presenta esta técnica es su dependencia con el usuario, este debe elegir la amplificación óptima para caracterizar el sistema poroso, siendo la mejor amplificación la que produce resultados muy cercanos a los obtenidos con otras técnicas.

Absorción de Nitrógeno. La absorción de nitrógeno es una técnica muy extendida para caracterizar materiales porosos, principalmente para obtener el área superficial del material (roca) y la distribución de tamaños (diámetros) de poros.

En términos generales la absorción ocurre porque el gas y la superficie del sólido no está en equilibrio. El equilibrio se alcanza por la acumulación de moléculas del gas en la superficie del sólido. Como resultado de la absorción, se forma una capa de gas adsorbido sobre el sólido. Este proceso continúa hasta que la capa está en equilibrio termodinámico con el gas en contacto con dicha capa.

En el análisis del sistema poroso a través de este método cabe destacar que se desarrollan diferentes procesos físicos y los poros más pequeños son los que se miden primero en la etapa de absorción. Sin embargo los parámetros de volumen total, distribución de tamaño de poro y el área específica son comparables (dependiendo del sistema poroso del material) y se utilizan para complementar el rango de tamaño de los poros.

Picnometría de helio. Densidad real. El helio es un gas que tiene un tamaño muy pequeño y una gran capacidad de penetración en la gran mayoría de los poros de la

roca. Por ello, este gas permite evaluar de forma precisa el volumen total del sólido (excluyendo la porosidad) y, por lo tanto, la densidad real de la muestra.

Para realizar un ensayo se utilizan tres probetas de 0.5x0.5x3 cm.; estas se lavan y se secan en la estufa a 60 grados centígrados hasta que su masa sea constante (48 horas). Transcurrido este tiempo, se pesan, en una balanza analítica, para conocer su peso y, posteriormente, obtener la densidad real.

Figura 5. Picnómetro



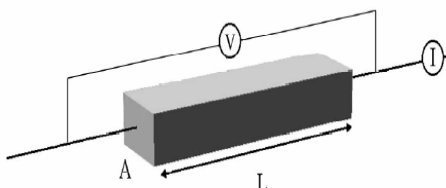
Fuente: <http://www.quantachrome.com/Density/Automatic.Pycnometro.htm>

1.3 METODOS DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELECTRICA.

En esta sección se describen los distintos métodos que se pueden utilizar para determinar la resistividad eléctrica de los materiales, cada uno de los métodos presenta características específicas para cierto tipo de aplicación. La medición de resistividad en materiales porosos conlleva a un análisis de los diferentes métodos con el fin de obtener el de características deseadas.

1.3.1 Método de dos puntos Este es el sistema más sencillo de montar, pero no es aconsejable para medidas en materiales con baja resistividad, metales o semiconductores, puesto que la resistividad de los contactos esta contenida en la medida y puede llegar a ser del mismo orden de magnitud que esta.

Figura 6. Método de dos puntos



Fuente: SANCHEZ, Marcos Jorge. Sistema de medida de la resistividad eléctrica a altas temperaturas y su aplicación a los compuestos $U_{1-x}La_xPt.$, Santander, 2001. Trabajo de grado titulo licenciado en Ciencias Físicas. Universidad de Cantabria. Departamento de ciencias de la tierra y física de la materia.

Si se desea medir materiales de alta impedancia la conexión con dos¹⁴ terminales es la técnica usualmente usada. La impedancia de la muestra es generalmente mucho mayor que la impedancia de los cables de medición, por lo tanto algunos errores introducidos por los cables no afectan significativamente los resultados de medición de la muestra. Esto se valido en particular a bajas frecuencias, a altas frecuencias se necesita de técnicas especializadas para minimizar errores de los cables.

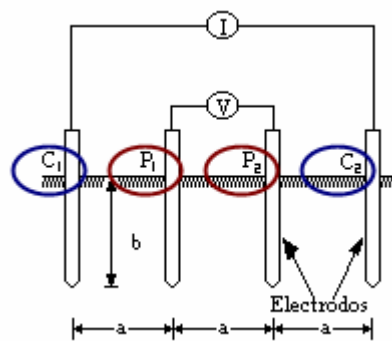
1.3.2 Método de cuatro puntos. Con objeto de medir la resistividad de diversos materiales se hace necesario utilizar 4 electrodos en el lugar a medir. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del material, pero no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos. Hay una dependencia de la clase de contacto que se haga con el material.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de corriente alterna a través del material entre dos electrodos como podemos apreciar en la figura C1 y C2, mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos

¹⁴ WILLEY, Jhon y SONS. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment and Application. Second Edition. Hoboken, New Jersey Wiley-Interscience, 1995, 606 p.

P1 y P2 evitando así el error debido a la caída de tensión en los contactos (la impedancia de entrada del voltímetro ha de ser mucho mayor que la resistencia entre los contactos de tensión). Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del material es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

Figura 7. Método de los cuatro puntos



Fuente: RUELAS, Roberto, Resistividad Teoría y diseño de sistemas a tierra, Mediciones de resistividad para diseño. Guanajuato, México.

Como se puede observar la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{\left[1 + \frac{2a}{(a^2 + 4b^2)^{\frac{1}{2}}} \right] - \left[\frac{2a}{(4a^2 + 4b^2)^{\frac{1}{2}}} \right]} \quad (2)$$

Donde:

ρ =Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m

a =Distancia entre electrodos en metros.

b =Profundidad de enterrado de los electrodos en metros

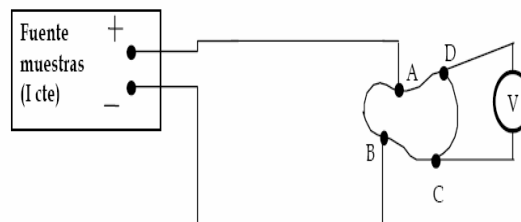
R=Relación entre la tensión y la corriente.

Si la distancia enterrada (b) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (a), es decir, del orden $a > 20B$, se puede simplificar (2) así:

$$\rho \approx 2\pi aR \quad (3)$$

1.3.3 Método de Van der Pauw.¹⁵ En este método se usan cuatro contactos, como se muestra en la figura 1.2; es empleado para medir la resistividad de muestras irregulares con una superficie pulida y libre de huecos.

Figura 8. Método de Van der Pauw



Fuente: http://www.uv.es/martined/tecweb/efecto_hall.pdf

En primer lugar se mide la tensión entre los puntos C y D, V_{cd} , haciendo pasar la corriente entre los puntos A y B, de esta manera se calcula R_1 donde:

$$R_1 = \frac{V_{cd}}{I_{ab}} \quad (4)$$

Después se procede a medir la tensión entre los puntos A y D, V_{ad} , haciendo pasar la corriente entre los puntos B y C, de igual manera se calcula R_2 donde:

¹⁵ MIRANDA, David. Detección Precoz de Cáncer de Cuello Uterino Basada en Espectro de Impedancia Eléctrica. Bucaramanga, 2005. Trabajo de Maestría (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Bioingeniería.

$$R_2 = \frac{V_{ad}}{I_{bc}} \quad (5)$$

De acuerdo con el método de Van der Pauw, la resistividad ρ vendrá dada por la expresión:

$$e^{-\frac{\pi^* d^* R_1}{\rho}} + e^{-\frac{\pi^* d^* R_2}{\rho}} = 1, \quad (6)$$

Que aproximadamente es:

$$\rho \approx \frac{\pi^* d}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (7)$$

Cuando $R_1 \cong R_2$. Siendo d el grosor de la muestra.

Este método es ampliamente usado por su flexibilidad en cuanto al tamaño y forma de las muestras a caracterizar y la exactitud de la medida; respecto a los dos métodos precedentes tiene la ventaja que las muestras no necesitan ser cortadas de una forma especial (barras) para realizar las mediciones, pero deben tener un espesor constante, es decir, en forma de wafer y además estar pulida, o sea, su superficie debe estar libre de porosidades. Por esta última razón este no representa un buen método para las mediciones que se desean realizar ya que los materiales a medir presentan porosidades.

1.3.4 Contactos con la muestra.¹⁶ Este es un aspecto muy importante al momento de obtener unos buenos resultados experimentales. Una mala colocación producirá resultados falseados o con mucho ruido.

Al colocar los contactos se debe tener en cuenta el tipo de experimento que se va a realizar. De esta manera se escogerá el contacto mas adecuado para la temperatura, Intensidad de corriente o cualquier otra circunstancia que pueda aparecer durante el experimento.

¹⁶ SANCHEZ, Marcos Jorge. Sistema de medida de la resistividad eléctrica a altas temperaturas y su aplicación a los compuestos $U_{1-x}La_xPt$, Universidad de Cantabria, Departamento de ciencias de la tierra y física de la materia.

Hay varios tipos de contactos, lo más importantes son: por soldadura, por presión, por pintura o por fusión puntual.

Por soldadura. Este es quizás el más sencillo puesto que con un soldador y un compuesto de bajo punto de fusión (estaño, indio, etc.) se puede realizar las soldaduras sin excesivas complicaciones. Se pueden presentar malos resultados debido a que la soldadura no es puntual y esto implica la posibilidad de obtener ruido en los datos experimentales, y cierta incertidumbre en la medida de la distancia de los contactos del potencial.

Por presión. De este tipo de contacto existen varias variantes, la más utilizada es la de las puntas elásticas. Esta consiste en la utilización de agujas que llevan un muelle en su interior, tal que al apoyar la punta sobre la muestra y empujar, el muelle se encoge presionando la punta contra la muestra. Otra forma de hacer contactos por presión es colocar los hilos sobre la muestra y presionar estos de la forma más conveniente. El mejor método es el primero, pues la presión de cada contacto es independiente.

Por pintura conductora. Este método también es muy sencillo, aunque no siempre quedan bien los contactos y hay un tiempo de espera hasta que la pintura seque. Generalmente estas pinturas están compuestas por algún disolvente y algún tipo de polvo metalizado, siendo la más común la pintura de plata. La forma de colocación es igual que si fuera pegamento, se sitúa el hilo sobre la muestra, se pone encima de una gota de pintura y se deja secar.

Por fusión Puntual. Este es el sistema con que se consiguen contactos más puntuales. Requiere cierta destreza, pero una vez adquirida los contactos se colocan fácilmente y las soldaduras son casi puntuales y aunque sean las muestras muy pequeñas pueden ser colocados.

La técnica consiste en atrapar un hilo entre la muestra y los electrodos y hacer un pulso de gran intensidad. Esta descarga provoca la fusión del hilo y la parte de la muestra, realizándose la unión.

1.4 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN MEDIOS POROSOS

Existe una relación de carácter empírico que relaciona la conductividad eléctrica de un medio poroso saturado mediante un fluido conductor con la porosidad de dicho material, la relación ha sido llamada “Ley de Archie”, y presenta la siguiente forma:

$$\sigma_{app} = \sigma_f a \varphi^m \quad (8)$$

Donde σ_{app} es la conductividad aparente del medio, σ_f es la conductividad del líquido que ocupa los poros, φ es la porosidad, m se conoce como exponente de cementación, y a es un parámetro geométrico. Es común encontrar en la literatura el término factor de formación, el cual está definido como la razón entre la conductividad aparente del medio y la conductividad del líquido que ocupa los poros, y generalmente se denota por la letra F :

$$F = \frac{\sigma_{app}}{\sigma_f} \quad (9)$$

El factor de formación de un medio poroso es un concepto valioso en el área de la evaluación de la formación del material.

Se ha encontrado que m es un parámetro que permite determinar qué porción del volumen total de poros participa activamente en el flujo de la corriente eléctrica y qué porción corresponde a regiones de estancamiento. El parámetro a está relacionado con la geometría interna de los poros. Su máximo valor para un sistema tridimensional, isotrópico y homogéneo es de 1.50, el cual corresponde al valor teórico para un sistema

de esferas dispersas. Este es el tipo de sistema más simple que se puede tener. A medida que la geometría de un sistema llega a ser más compleja, el valor de a decrece.

1.5 NUESTRO PROYECTO

El propósito inmerso de nuestro proyecto es explorar una solución que permita resolver la carencia de la industria cerámica regional y nacional, de una técnica que permita caracterizar las propiedades de los materiales, necesaria tanto para el control de calidad como para el estudio de mejoras introducidas en la composición y procesos de dichos materiales.

En la actualidad existen técnicas para caracterizar materiales que son muy costosas como la microscopía óptica, microscopía electrónica, que además no disponen la mayoría de industrias cerámicas mientras que otras técnicas son peligrosas para la salud como la porosimetría de mercurio. Para ambos métodos se requiere de cierto tiempo para la determinación de la porosidad, en el caso de la porosimetría de mercurio puede ser de un día o más y en la microscopía electrónica esta condicionada a la disponibilidad del equipo y solo permite hacer un estudio de la porosidad superficial.

Con el propósito de dotar a la industria cerámica de equipos que faciliten la detección temprana de deficiencias en sus materiales, se realizó una investigación cuyo objetivo principal es utilizar una técnica no destructiva llamada espectroscopía de impedancia eléctrica, que como su nombre lo indica, consiste en la medición de impedancia eléctrica, mediante señales de excitación de frecuencia variable, sabiendo de antemano que la impedancia es una propiedad inherente a los materiales y que puede ser usada para caracterizarlos.

En resumen se propone la implementación de un equipo de bajo costo que realice mediciones en cualquier etapa del proceso productivo de un material poroso en un tiempo corto y sin ocasionar ningún riesgo para la salud.

2. DISEÑO DEL IMPEDANCIOMETRO PARA ESTUDIO DE SÓLIDOS POROSOS

2.1 ESPECIFICACIONES DEL IMPEDANCIOMETRO

2.1.1 Amplitud de la señal de excitación para mediciones de espectro de impedancia eléctrica en sólidos porosos. La espectroscopia de impedancia es un poderoso método para caracterizar muchas de las propiedades eléctricas de los materiales.

Existen diferentes formas para calcular el espectro de impedancia eléctrica excitando el material con tensión o con corriente. Cuando se realiza un estímulo con una tensión senoidal

$$V(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (10)$$

Se espera tener como respuesta una corriente

$$I(t) = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (11)$$

Donde θ es la diferencia de fase entre la tensión y la corriente.

La relación entre las propiedades y la respuesta del sistema a señales de excitación de tensión o corriente es compleja en el dominio del tiempo, en general es requerida la solución de ecuaciones diferenciales. Afortunadamente el uso de la transformada de Fourier permite simplificar significativamente los cálculos matemáticos. De esta forma la relación entre la tensión y la corriente esta dada por la siguiente expresión:

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)} \quad (12)$$

Donde $w = 2\pi f$. $Z(jw)$ es una cantidad compleja llamada función de impedancia en espectroscopia de impedancia eléctrica.

Con la transformada de Fourier se reduce la utilización de ecuaciones diferenciales a la simple ley de Ohm bajo condiciones de linealidad, para cumplir con estas condiciones es necesario aplicar señales de excitación pequeñas.

Por lo general muchos de los sistemas presentan una relación tensión corriente no lineal, como lo es el caso de los sólidos porosos. Se puede realizar una aproximación al comportamiento lineal excitando los materiales con señales de amplitudes pequeñas (del orden de los mV). Además, las señales de excitación altas producen electrolisis rompiendo enlaces en el material acabando con el electrolito, y por ende variando las propiedades del material llevando a diferencias entre mediciones. En el caso de los sólidos porosos que tienen un contenido de agua, el valor de la tensión de excitación debe ser mucho menor que el voltaje de hidrólisis para la configuración de electrodos dada.

2.1.2 Análisis del impedanciometro¹⁷ realizado para Medición de Impedancia Eléctrica en Tejido Cervico Uterino In-Vitro. El presente proyecto partió de los resultados del trabajo de grado Medición de impedancia eléctrica en tejido cervicouterino in-Vitro presentada por Robles Leonor Andrea y Chávez Felipe en el cual se realizó la medición del espectro de impedancia eléctrica (EIE) en tejido cervicouterino in-Vitro.

En dicho trabajo de grado fue diseñado un dispositivo que realiza la medición de la impedancia eléctrica a diferentes frecuencias, por medio de la inyección de una corriente eléctrica senoidal de amplitud constante, $40 \mu A$, en un rango de frecuencias

¹⁷ ROBLES, Leonor y CHÁVEZ, Felipe. Medición de Impedancia Eléctrica en Tejido Cervico Uterino In-Vitro. Bucaramanga, 2005. Trabajo de Grado (Ingeniería electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Bioingeniería.

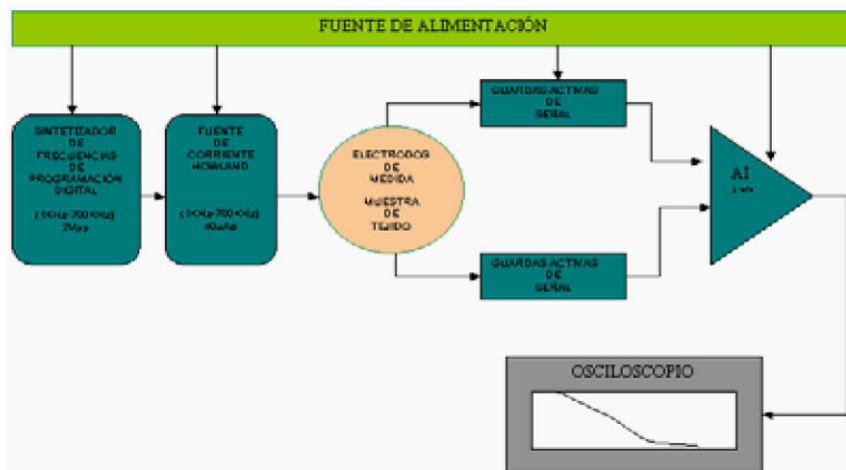
comprendido entre 1kHz y 1MHz. El EIE se obtiene al medir la caída tensión cuando la corriente pasa a través de la muestra (dado que la corriente es constante para tales frecuencias) utilizando una constante de calibración llamado factor de forma.

Las secciones funcionales que componen el medidor de impedancia eléctrica en tejido cervicouterino son las siguientes:

1. Generador de señales.
2. Fuente de corriente Howland.
3. Electrodo de medida.
4. Guardas de señal.
5. Amplificación de la señal.
6. Fuente de alimentación.

La figura 9 presenta el diagrama de bloques correspondiente al bioimpedanciometro diseñado mostrando en forma general cada una de las etapas antes mencionadas.

Figura 9. Diagrama de bloques del Medidor de impedancia eléctrica en tejido cervicouterino in-Vitro



Fuente: ROBLES, Leonor y CHAVEZ, Felipe. Medición de impedancia eléctrica en tejido cervicouterino in-Vitro. Bucaramanga, 2005, 200 p, Trabajo de Pregrado para título de Ingenieros Electrónicos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Entre los aspectos más importantes del diseño del bioimpedanciometro cabe destacar el generador de señales, para lo cual basaron su diseño en el integrado MAX038 el cual es un oscilador controlado por voltaje (VCO), este integrado genera ondas senoidales, triangulares, cuadradas y diente de sierra.

La etapa de generación de señales está compuesta por el MAX038, un conversor D/A MX7541, una referencia de tensión externa MAX6350, una fuente de corriente Howland variable y una red de interruptores digitales. Teniendo en cuenta que este trabajo tiene es para una aplicación médica, las bases en referentes al equipo diseñado son de gran utilidad, para tomarlas como punto de partida en el diseño del impedanciometro desarrollado en esta tesis de grado para caracterizar materiales porosos.

2.1.3 Mejoras y cambios al impedanciometro¹⁸ para Medición de Impedancia Eléctrica en Tejido Cervico Uterino In-Vitro. Como se ha venido tratando, unos de los métodos usualmente adoptados para la medición del espectro de impedancia eléctrica consisten en la inyección de una corriente eléctrica, puesto que estos sistemas son menos sensitivos a los errores debidos a las impedancias de contacto desconocidas de los electrodos, mientras estas impedancias sean relativamente bajas en comparación con la impedancia de salida del generador y la impedancia de entrada del medidor.

En la actualidad, existen diversas topologías con las cuales es posible construir fuentes de corriente; sin embargo, cada una de ellas cuenta con características diferentes, lo cual las hace adecuadas para una aplicación específica.

El diseño de una fuente de corriente para la medición de impedancia eléctrica en sólidos porosos, demanda un análisis de dichas topologías con el fin de establecer el circuito que con mayor precisión se ajusta a las características requeridas.

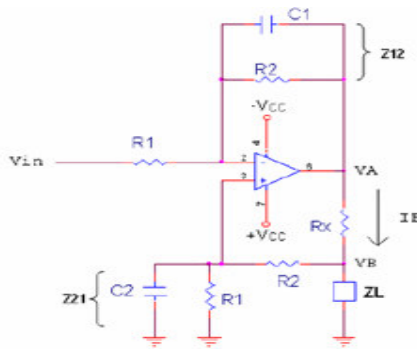
Entre las topologías que se le realizaron pruebas se encuentran:

¹⁸ ROBLES, Ibid

× configuración fuente de corriente howland

Esta configuración pertenece al grupo de las topologías tradicionales para el diseño de fuentes de corriente. Se caracteriza por la utilización de la realimentación positiva y negativa del amplificador operacional y la obtención de una corriente independiente de la carga. En la Figura 10 se muestra el esquema circuital de este tipo de fuente.

Figura 10. Fuente de corriente Howland



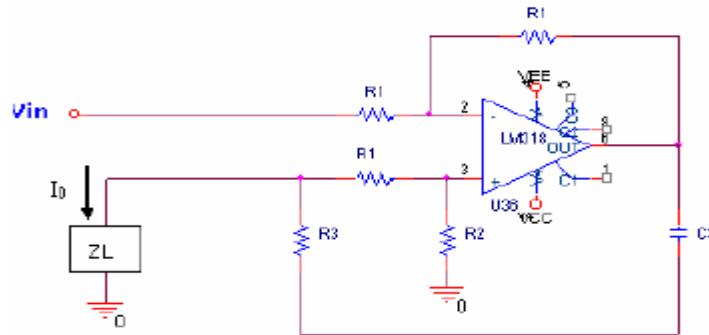
Fuente: CUBIDES, Yorlen Astrid y MIELES, Fidel Enrique. Diseño de una fuente de corriente senoidal y de pulsos bifásicos para medición de espectro de impedancia eléctrica en tejido humano. Bucaramanga, 2006, 123 p. Trabajo de Pregrado para título de Ingenieros Electrónicos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

× conversor voltaje-corriente basado en Fuente Howland Mejorado

Dicha topología cuenta con importantes características, como son: alta impedancia de entrada, gran estabilidad por contar con realimentación negativa, y corriente independiente de la carga.

En la figura 11 se presenta el diseño de la fuente.

Figura 11. Fuente de corriente Howland Mejorada



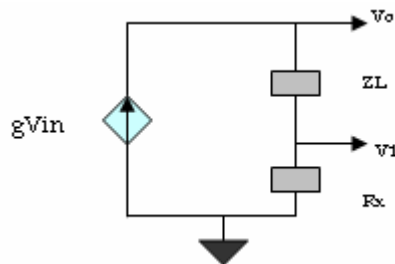
Fuente: CUBIDES, Yorlen Astrid y MIELES, Fidel Enrique. Diseño de una fuente de corriente senoidal y de pulsos bifásicos para medición de espectro de impedancia eléctrica en tejido humano. Bucaramanga, 2006, 123 p. Trabajo de Pregrado para título de Ingenieros Electrónicos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Esta topología es la misma Fuente de Corriente Howland, con $C1 = C2 = C3 \rightarrow \infty$ y $R1 = R2$. Con estas aproximaciones el circuito ofrece mejores características.

× Fuente controlada de corriente basada en amplificador de voltaje no inversor con realimentación negativa

Los sistemas con realimentación negativa presentan una gran estabilidad e inmunidad a la variación de los parámetros relacionados con los elementos de circuito utilizados para su implementación, además se les adiciona que si la realimentación negativa es aplicada a un amplificador lineal e invariante en el tiempo (LTI), ésta mejora sus características en frecuencia y mantiene la linealidad del mismo.

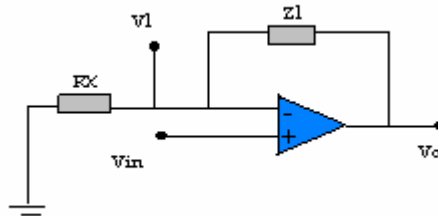
Figura 12. Fuente de corriente controlada por voltaje



Fuente: CUBIDES, Yorlen Astrid y MIELES, Fidel Enrique. Diseño de una fuente de corriente senoidal y de pulsos bifásicos para medición de espectro de impedancia eléctrica en tejido humano. Bucaramanga, 2006, 123 p. Trabajo de Pregrado para título de Ingenieros Electrónicos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Pero para la implementación del circuito se necesita de un amplificador operacional en la configuración que se muestra en la siguiente figura.

Figura 13. Amplificador operacional no inversor



Fuente: CUBIDES, Yorlen Astrid y MIELES, Fidel Enrique. Diseño de una fuente de corriente senoidal y de pulsos bifásicos para medición de espectro de impedancia eléctrica en tejido humano. Bucaramanga, 2006, 123 p. Trabajo de Pregrado para título de Ingenieros Electrónicos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Las pruebas realizadas con las topologías acabadas de mencionar arrojaron una serie de resultados que no cumplían con los resultados esperados, debido a que la impedancia en las piezas de análisis es considerablemente alta (del orden de los $M\Omega$), y la resistencia de salida de las diferentes fuentes de corriente utilizadas eran relativamente baja, con respecto al valor a medir.

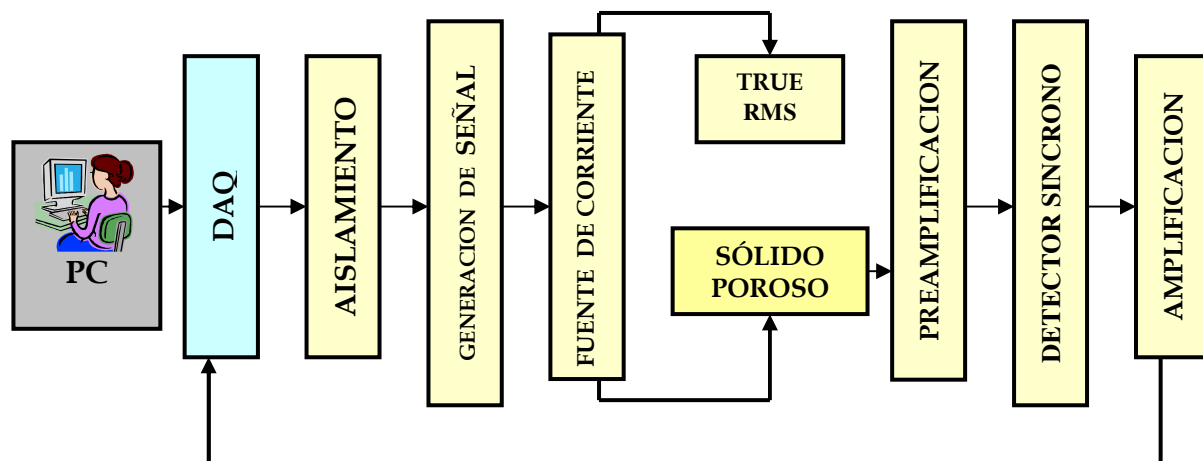
Dado que los amplificadores operacionales de las fuentes de corriente necesitan resistencias de realimentación muy grandes con el fin de hacer las corrientes pequeñas y evitar saturar los dispositivos, el comportamiento de los amplificadores no fue el esperado (el ancho de banda se reduce).

Otro inconveniente que se presentó fue que el generador de señales, el dispositivo MAX038 de la empresa *Maxin*, fue retirado del mercado. En reemplazo se optó por usar el integrado AD9833 de la empresa *analog devices*, que es un sintetizador digital directo (DDS) que produce ondas senoidal, triangular y cuadrada; cuya frecuencia y amplitud son programables, permitiendo así facilidad de selección. Este dispositivo fue utilizado en el trabajo de grado Diseño de una fuente de corriente senoidal y de pulsos bifásicos para medición de espectro de impedancia eléctrica en tejido humano¹⁹.

A partir de los trabajos de grado mencionados, se realizaron algunos diseños para nuestro impedanciometro, como se muestra a continuación:

Inicialmente se pensó en el esquema que se muestra en la figura 14, en este esquema se utiliza una tarjeta de adquisición de datos (DAQ), el AD9833 para la generación de señal, una fuente de corriente como las citadas en el ítem 2.1.3, una etapa de preamplificación, la implementación de un detector síncrono. El detector consta de un selector y un filtro pasa bajas, para calcular la parte real de la impedancia y finalmente una etapa de amplificación.

Figura 14. Primer diseño del Impedanciometro. Diagrama de bloques

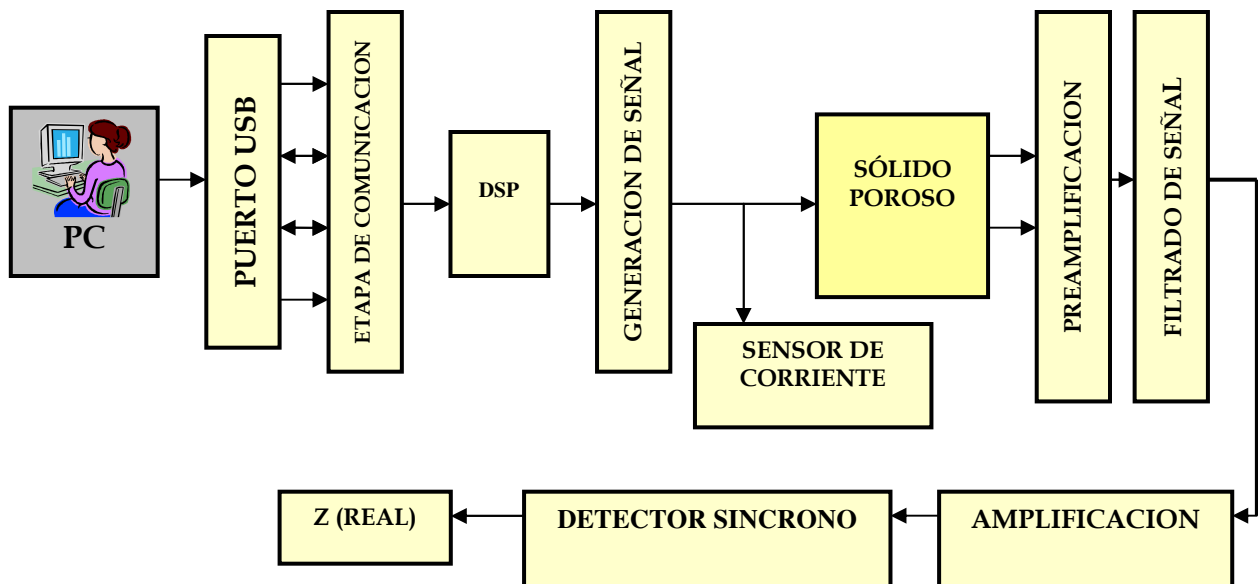


Fuente: Autores del Proyecto

¹⁹ CUBIDES, Op Cit.

Debido al alto costo del DAQ y los resultados con las fuentes de corriente mencionados anteriormente se decidió realizar un nuevo diseño. Se optó por utilizar un DSP (ya se tenía conocimiento de su funcionamiento, a través de proyectos de grados anteriores), y su respectiva comunicación con el PC a través del Puerto USB, la generación de señales continuó a cargo del AD9833, se cambió la inyección de corriente por tensión implementando un sensor de corriente para realizar la relación tensión y corriente. El esquema de esta configuración se muestra en la figura 15.

Figura 15. Segundo diseño del Impedanciometro. Diagrama de bloques.



Fuente: Autores del Proyecto

Este segundo diseño se acondicionó mejor a nuestra aplicación. Finalmente se determinó utilizar el integrado AD5933 de la empresa Analog Devices. Este integrado presenta un avance tecnológico con respecto a los dispositivos utilizados en los diseños anteriores, reduce en gran proporción el número de etapas a utilizar. En una sola pastilla realiza la generación de señal con frecuencia variable, tiene una etapa de

ampliación configurada por software, realiza un filtrado de señal y la transformada discreta de fourier que entrega los datos necesarios para calcular la magnitud y la fase de la impedancia que se desea medir.

2.1.4 Impedanciometro integrado AD5933 de analog devices, ventajas y aplicación. Uno de los principales objetivos de nuestro trabajo de grado consistió en hallar el espectro de impedancia eléctrica para materiales cerámicos porosos. El trabajo inicio con la revisión de las fuentes de corrientes desarrolladas en proyectos anteriores del grupo de investigación (trabajos de grado de Fidel Mieles y Andrea Robles), los cuales basaron su diseño en fuentes de corriente howland con sus respectivas adecuaciones para una aplicación específica, medición de impedancia eléctrica en tejido humano como anteriormente ya mencionamos.

Dado que se requería hacer mediciones a frecuencias bajas se selecciono el AD5933 de *analog devices* para el desarrollo de nuestro equipo, el **AD5933**, es un conversor de impedancia que se ajusta a la aplicación requerida, ofreciendo menor costo y una mayor facilidad de implementación, además de ser un dispositivo robusto y confiable.

DESCRIPCIÓN GENERAL.

El AD5933 es un sistema conversor de impedancia de alta precisión el cual combina en una pastilla, un generador de frecuencia de 12 bits, a 1 MSPS, y un conversor análogo digital. El generador de frecuencia permite excitar una impedancia externa a una frecuencia conocida. La señal de respuesta de la impedancia es muestreada por el conversor y luego toma lugar la transformada discreta de fourier, esta transformada retorna dos valores R e I (R e I son palabras de datos en cada salida frecuencia).

La magnitud de la impedancia y fase relativa en cada uno punto de frecuencia es fácilmente calculada usando las expresiones:

$$M = \sqrt{R^2 + I^2} \quad (8)$$

$$F = \tan^{-1}\left(\frac{I}{R}\right) \quad (9)$$

Para determinar el valor verdadero de la magnitud de la impedancia, se debe multiplicar el valor de la magnitud, por el factor de calibración que es obtenido después del proceso de calibración.

CARACTERÍSTICAS GENERALES

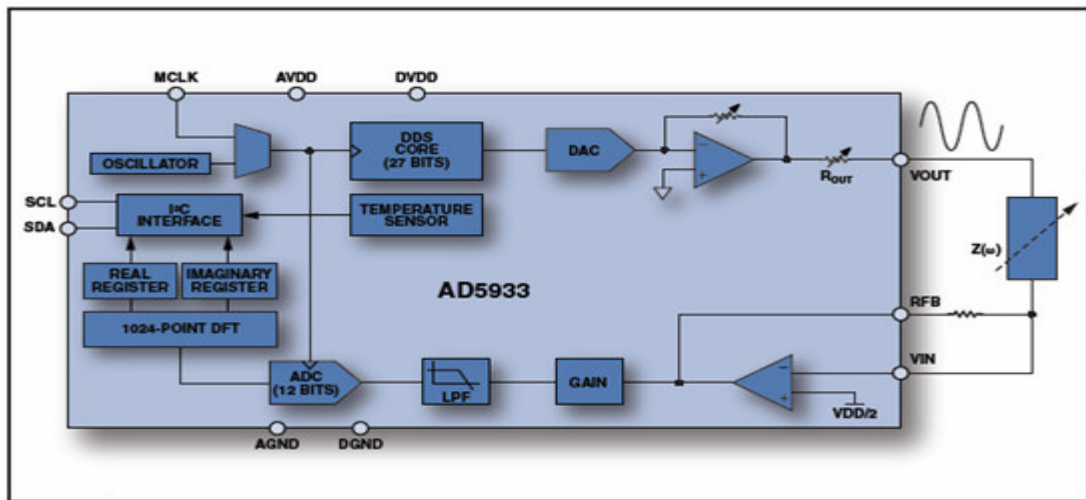
- × Tensión de alimentación de 2.7 V a 5.5 V.
- × Rango de medida de impedancia de 100Ω a $10M\Omega$.
- × Rango de frecuencia de salida de 1 Hz a 100 KHz.
- × Frecuencia del reloj externo máximo 16.776 MHz.
- × Frecuencia del oscilador interno 16.776MHz.
- × Interfaz serial I²C
- × Amplitud de la señal de salida programable a cuatro posibles valores. Ver tabla 1.

Tabla 1. Amplitud de la señal de salida con su respectivo nivel de offset.

	Tensión de salida AC	Offset de salida
Rango 1	1.98 Vpp	1.48 V
Rango 2	0.97 Vpp	0.76 V
Rango 3	383 mVpp	0.31 V
Rango 4	198 mVpp	0.173 V

En la Figura 16 se muestra el conjunto de módulos que conforman la estructura interna del AD5933

Figura 16. Diagrama de bloques funcional

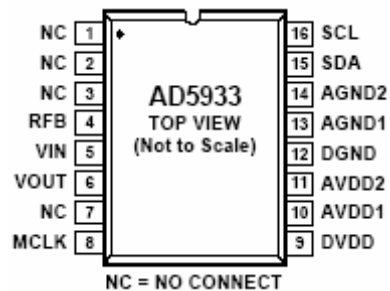


Fuente: Hoja de datos del fabricante *analog devices*

CONFIGURACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE PINES.

El AD5933 esta compuesto por 16 pines. A continuación se describe cada uno de ellos.

Figura 17. Diagrama de pines



Fuente: Hoja de datos del fabricante *analog devices*.

Tabla 2. Descripción de la función de los pines

Pin No.	Nombre del Pin.	Descripción.
1,2,3,7	NC	No se conecta.
4	RFB	Resistencia externa de realimentación. Conectada entre el pin 4 y 5. Usada para fijar la ganancia del amplificador corriente tensión.
5	VIN	Entrada del amplificador de transimpedancia.
6	VOUT	Salida de excitación (tensión).
8	MCLK	Entrada digital de reloj. Suministrada por el usuario.
9	DVDD	Alimentación de tensión digital.
10	AVDD1	Alimentación de tensión análoga 1.
11	AVDD2	Alimentación de tensión análoga 2.
12	DGND	Tierra digital.
13	AGND1	Tierra analógica 1.
14	AGND2	Tierra analógica 2.
15	SDA	Datos de entrada I ² C.
16	SCL	Entrada de reloj I ² C (sincronismo).

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

El barrido de frecuencia esta determinado por tres parámetros: Inicio de frecuencia, Incremento de frecuencia y Numero de incrementos.

- × **Inicio de frecuencia.** Define el inicio del barrido de frecuencia y consta de una palabra de 24 bits que necesita ser cargada en el registro de “start frequency”. El valor a cargar esta dado por la siguiente ecuación:

$$Start_Frequency_Code = \left(\frac{Required_Output_Start_Frequency}{\left(\frac{MCLK}{4} \right)} \right) * 2^{27} \quad (13)$$

Y se carga en los registros 82 h, 83 h, y 84 h.

Required_Output_Start_Frequency → Frecuencia de inicio de barrido.

MCLK → Frecuencia del reloj utilizada.

× **Incremento de frecuencia.** Define el incremento de frecuencia, es decir, el espaciado frecuencial con el cual se tomarán los datos. Este parámetro corresponde a una palabra de 24 bits que necesita ser cargada en el registro de “*frequency increment*” como resultado de la siguiente ecuación:

$$Frequency_Increment_code = \left(\frac{Required_Frequency_Increment}{\left(\frac{MCLK}{4} \right)} \right) * 2^{27} \quad (14)$$

Y se cargan en los registros 85 h, 86 h y 87 h.

Required_Frequency_Increment → Incremento de frecuencia

MCLK → Frecuencia del reloj utilizada.

× **Número de incrementos.** Define el número de puntos en cada barrido y consiste en una palabra de 9 bits que se carga en los registros 88 h y 89 h. El máximo número de incrementos que puede ser programado es de 511.

CALCULO DE LA MAGNITUD Y FASE DE LA IMPEDANCIA.

La magnitud de la impedancia y fase relativa en cada punto de frecuencia es fácilmente calculada usando las expresiones:

$$M(f) = \sqrt{R^2 + I^2} \quad (15)$$

$$F(f) = \tan^{-1}\left(\frac{I}{R}\right) \quad (16)$$

$$\text{Magnitud}(f) = FC(f) * Y(f) \quad (17)$$

$$\text{Fase}(f) = F(f) - \text{fase}(\text{resistencia}) \quad (18)$$

Donde:

R e I → Son los valores que retorna la transformada discreta de Fourier en cada punto de frecuencia, debidos a la impedancia conectada a la salida del dispositivo.

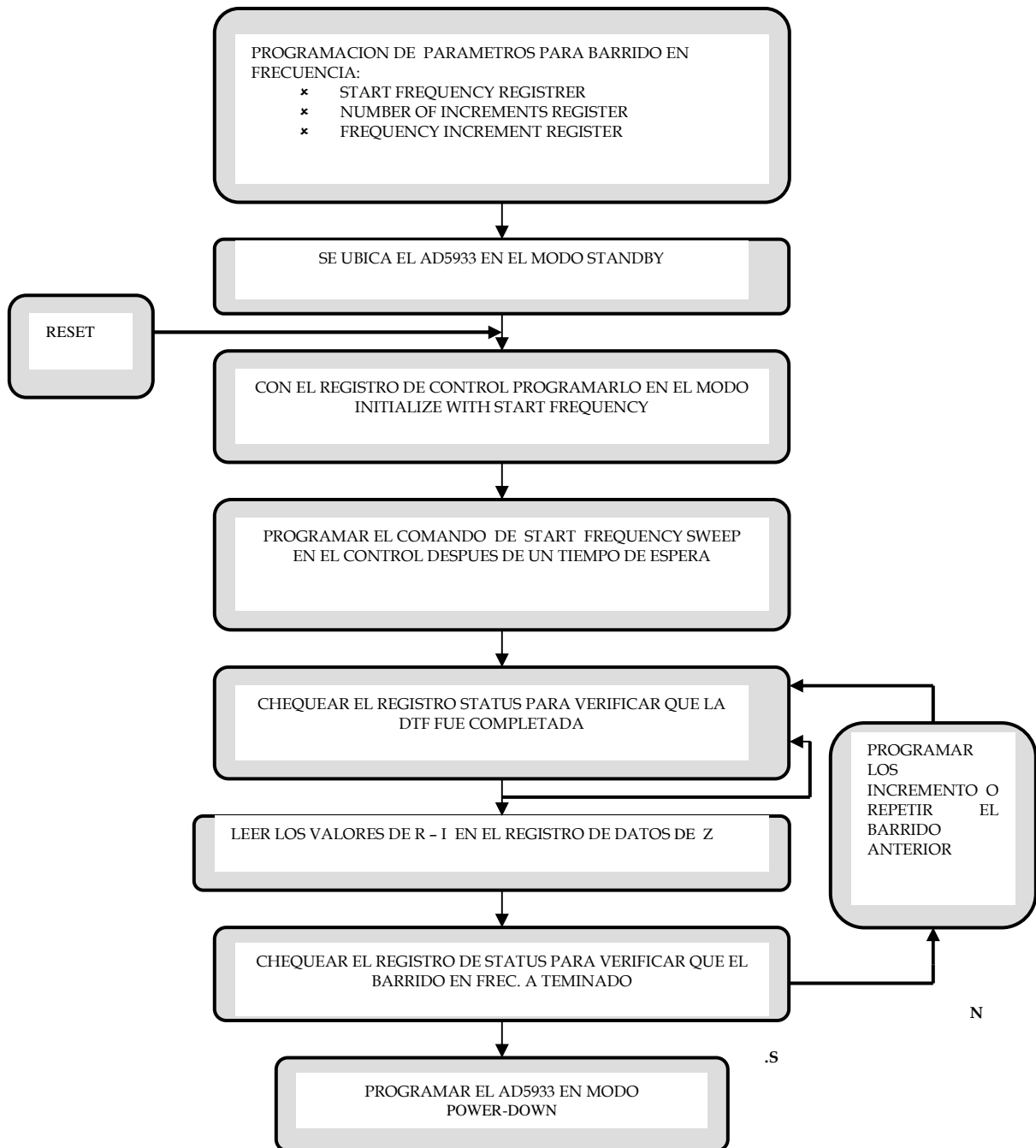
Fase (resistencia) → Es la fase debida a los polos internos del sistema. Calculada con un resistor puro.

FC → Es el factor de calibración en cada valor de frecuencia.

BARRIDO DE FRECUENCIA.

En la figura 18 se muestra los pasos que describen el barrido en frecuencia del AD5933 y en la tabla 3 las direcciones de los registros donde se envía la información de inicio de frecuencia, incremento de frecuencia, numero de pasos y numero de ciclos de la onda de excitación, además de los registros de lectura de status, temperatura, y datos de la parte real e imaginaria de la impedancia.

Figura 18. Pasos del barrido de frecuencia



Fuente: hoja de datos del fabricante del AD5933 *analog devices*

Tabla 3. Nombre y dirección de los registros

NOMBRE DE LOS REGISTROS	DIRECCION	REGISTRO DE DATOS	LECTURA/ESCRITURA
<i>CONTROL</i>	80 h	D15 a D8	Lectura / Escritura
	81 h	D7 a D0	Lectura / Escritura
<i>START FREQUENCY</i>	82 h	D23 a D26	Lectura / Escritura
	83 h	D15 a D8	Lectura / Escritura
	84 h	D7 a D0	Lectura / Escritura
<i>FREQUENCY INCREMENT</i>	85h	D23 a D16	Lectura / Escritura
	86 h	D15 a D 8	Lectura / Escritura
	87 h	D7 a D0	Lectura / Escritura
<i>NUMBER OF INCREMENTS</i>	88 h	D15 a D8	Lectura / Escritura
	89 h	D7 a D0	Lectura / Escritura
<i>NUMBER OF SETTLING TIME CYCLES</i>	8Ah	D15 a D8	Lectura / Escritura
	8B h	D7 a D0	Lectura / Escritura
<i>STATUS</i>	8F h	D7 a D0	Lectura / Escritura
<i>TEMPERATURA DATA</i>	92 h	D15 a D8	Lectura / Escritura
	93 h	D7 a D0	Lectura / Escritura
<i>REAL DATA</i>	94 h	D15 a D8	Lectura / Escritura
	95 h	D7 a D0	Lectura / Escritura
<i>IMAGINARY DATA</i>	96 h	D15 a D8	Lectura / Escritura
	97 h	D7 a D0	Lectura / Escritura

Fuente: hoja de datos del fabricante *analog devices*

REGISTRO DE CONTROL.

El registro de control se encuentra almacenado en las direcciones 80 h y 81 h, cada una de 8 bits, y determina los modos de control del AD5933. Además, permite programar el valor de tensión de excitación y fijar el sistema de reloj. El comando reset de este registro no inicializa ningún valor programado asociado con el barrido.

A continuación se muestra la tabla del registro de control.

Tabla 4. Registro de control

.BIT	D15	D14	D13	D12	
	0	0	0	0	No opera
	0	0	0	1	Iniciar con <i>Start Frequency</i>
	0	0	1	0	Inicio de Barrido
	0	0	1	1	Incremento de frecuencia
	0	1	0	0	Repetir Frecuencia
	1	0	0	0	No opera
	1	0	0	1	Medida de temperatura
	1	0	1	0	Modo de baja potencia
	1	0	1	1	Modo Standby
	1	1	0	0	No opera
	1	1	0	1	No opera
D11					No opera
		D10	D9		Rango de Tensión de Salida
		0	0		Rango 1 (2.0 Vp-p)
		0	1		Rango 4 (200mVp-p)

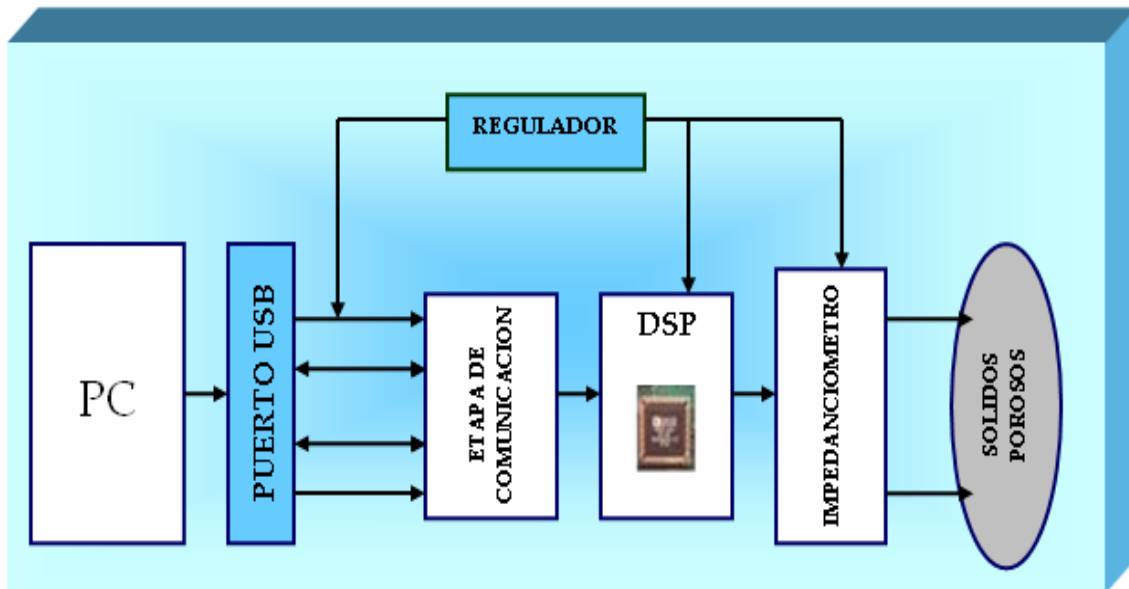
		D10	D9		Rango de Tensión de Salida
		1	0		Rango 3 (400mVp-p)
		1	1		Rango 1 (1.0Vp-p)
D8					Ganancia PGA 0=x5, 1=x1
D7					Reservado; fijar en 0
D6					Reservado; fijar en 0
D5					Reservado; fijaren 0
D4					Reset
D3		1			Reloj externo=1
		0			Oscilador interno = 0; no se requiere reloj externo
D2		0			Fijar en 0
D1					Reservado; se pone en 0
D0					Reservado; se pone en 0

Fuente: hoja de datos del fabricante

2.1.5 Diseño del hardware. En esta sección se presentan las consideraciones y parámetros de diseño que soportan la implementación del impedanciometro para caracterización de sólidos porosos. A continuación se describe cada una de las etapas que lo componen:

- × Fuente de Alimentación, puerto USB
- × Etapa de Comunicación
- × Etapa de Control y Comunicación
- × Impedanciometro
- × Electrodo de medida

Figura 19. Diagrama de bloques



Fuente: Autores del proyecto

Para la selección de dispositivos electrónicos a usar se examinaron las características de diferentes elementos y se estudiaron las hojas de datos suministradas por fabricantes de circuitos integrados, tales como *analog Devices*, *texas instrument*, *maxim*, *freescale*. Para la selección de elementos pasivos se tuvo en cuenta las recomendaciones de los fabricantes sobre la optimización del desempeño de los integrados.

Para un diseño adecuado de las etapas involucradas en el proceso se analizaron las características específicas de cada uno de los componentes. Dicho análisis se presenta a continuación de forma detallada y se explica cada una de las etapas del dispositivo diseñado.

Una vez realizada la descripción general del diseño se procede a detallar cada uno de los bloques y los circuitos utilizados en cada uno de ellos.

ETAPA DE ALIMENTACIÓN.

El manejo de potencia del sistema esta formado por la etapa de alimentación del puerto USB. El puerto USB proporciona una tensión de alimentación de 5V. La corriente consumida por un dispositivo no puede sobrepasar los 500mA, es por esto que el diseño de la tarjeta esta orientado a un bajo consumo de potencia.

El manejo de potencia en USB necesita una fase de regulación donde se ajusten los niveles de tensión de 5V y el consumo de corriente. Los niveles de tensión se debe estabilizar mediante la implementación de un regulador de tensión que permita suministrar los 3.3 V necesarios para los dispositivos seleccionados.

× REGULADOR MCP1700

Entre las recomendaciones de diseño para circuitos alimentados con el puerto USB están las siguientes:

El regulador necesita ser capaz de sostener la tensión de salida con una entrada de tensión de 4.35 V. por lo tanto necesita ser seleccionado un LDO (Low Drop Out).

La corriente inactiva del regulador necesita ser baja, el orden debe coincidir con la corriente en el puerto el USB cuando esté suspendido. La corriente total requerida es de 500uA cuando el puerto USB esta suspendido.

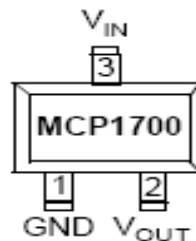
Teniendo en cuenta lo anterior se hizo la selección del MCP1700 de la empresa *microchip* el cual tiene las siguientes características:

- × 1.6 μ A de corriente inactiva típicamente
- × Rango de tensión de entrada: 2.3V a 6.0V
- × Tensión de salida: 3.3 V

- × 250 mA de corriente de salida
- × Low Dropout (LDO) voltaje

Las características mencionadas se ajustan adecuadamente a los requerimientos de diseño. En la siguiente figura se muestra el diagrama de pines del MCP1700

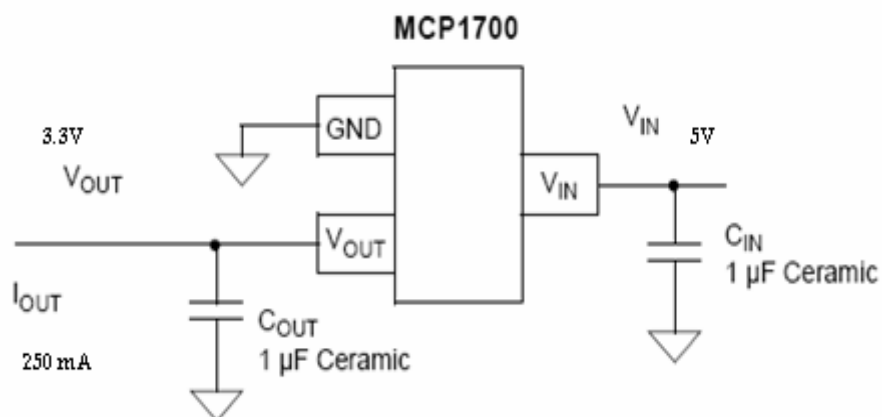
Figura 20. Regulador LDO MCP1700



Fuente: hoja de datos del fabricante

Para estabilizar la salida de tensión del integrado se utilizan capacitores de 1 μ F, pueden ser cerámicos de tantalio o electrolíticos. En la figura 18 se observa el esquema de conexión para el funcionamiento óptimo del regulador MCP1700.

Figura 21. Esquema de conexión del MCP1700 para obtener 3.3V a la salida



Fuente: Hoja de datos del fabricante

DSP 56F801

Para el control de los elementos principales de cada una de las etapas se necesitaba un dispositivo que controlara el envío y la recepción de datos, por lo que se creó la necesidad de encontrar un dispositivo programable que contara con una arquitectura completa, versatilidad, de fácil manejo y bajo costo. De acuerdo a las anteriores características y la amplia experiencia con el DSP 56F801 de Motorola se seleccionó dicho dispositivo.

Para el manejo del DSP se emplea un software llamado Code Warrior de fácil acceso debido a que su licencia (para el DSP 56F801) es gratuita, el cual se desarrolla en el lenguaje C++ que es un lenguaje de alto nivel.

En cuanto a su estructura, consta de tres unidades de ejecución en paralelo, una memoria de programa flash, una memoria RAM de acceso dual y dentro de las características más sobresalientes que nos llevaron a escogerlo, cuenta con un puerto de comunicación serial (I²C) y la posibilidad de configurar pines de propósito general (GPIO_11pines).

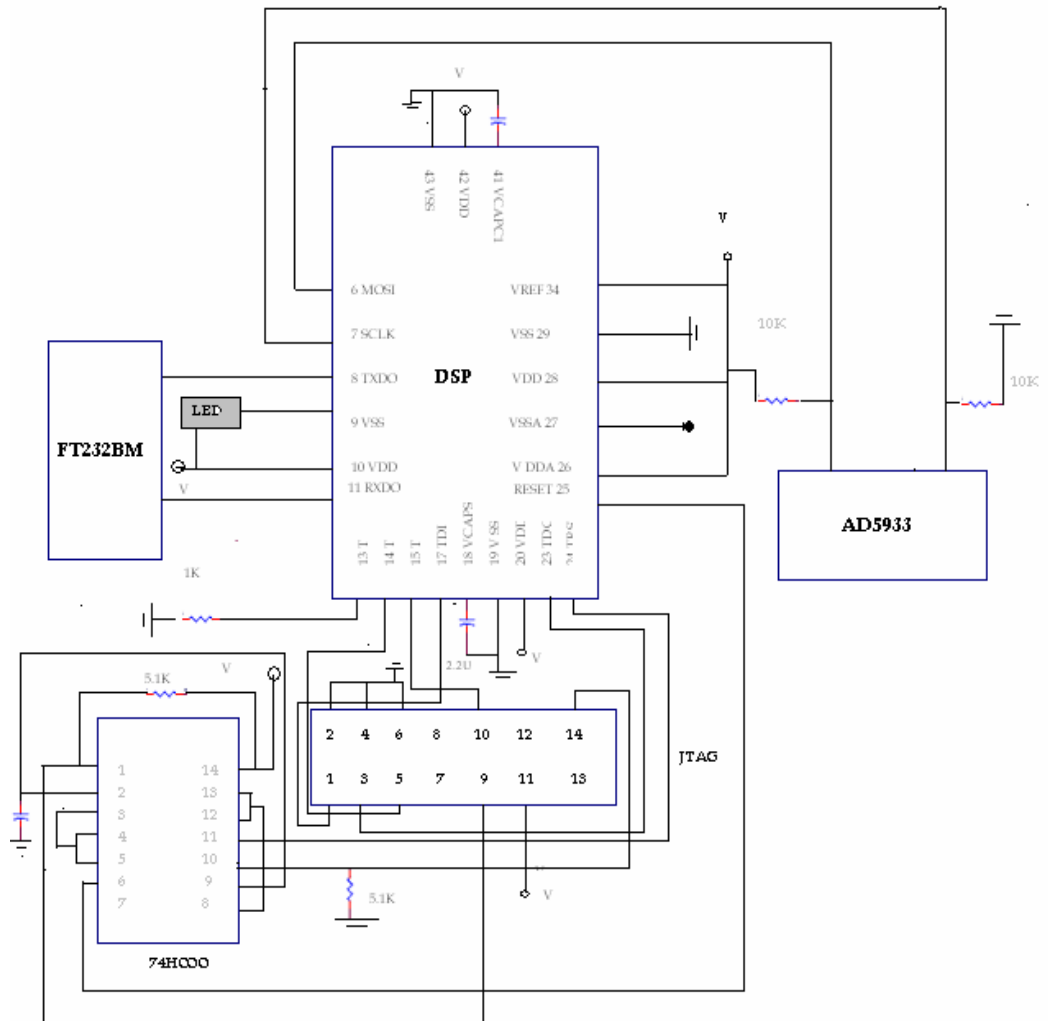
A continuación se presentan las funciones que cumple* el DSP:

- × Control del AD5933
- × Comunicación con FT232BM

En la figura presentada a continuación se presenta el esquema utilizado para realizar el control de todos los dispositivos de la tarjeta.

* El DSP56F801 es de arquitectura abierta, es decir, se le pueden agregar nuevas funciones.

Figura 22. Esquema de control del DSP



Fuente: Autores de Proyecto

× CONECTOR JTAG

El conector JTAG permite la conexión de un host externo para descargar programas y trabajar con los registros del 56F801.

Este conector es para comunicación, pasando información en ambas direcciones con un host como procesador y correr paso a paso el programa.

Tabla 5. Pines del conector JTAG

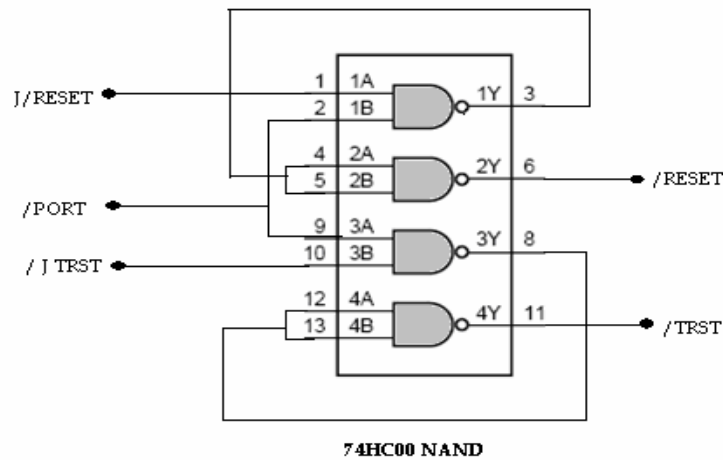
PIN #	SEÑAL	PIN #	SIGNAL
1	TDI	2	GND
3	TDO	4	GND
5	TCK	6	GND
7	NC	8	KEY
9	RESET	10	TMS
11	+3.3V	12	NC
13	NC	14	TRST

× COMPUERTA NAND

Para la configuración del conector JTAG se hace necesario la utilización de una compuerta, para mantener los niveles lógicos adecuados, con este fin se escogió el integrado 74HC00.

En la figura 20 se presentan los pines de conexión de la compuerta

Figura 23. Compuerta Nand



Fuente: Autores del proyecto

ETAPA DE COMUNICACIÓN

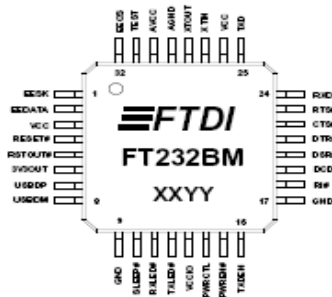
Este bloque se encarga de recibir los datos que son enviados por el DSP 56F801 y transmitirlos al PC, para esto se utiliza el controlador USB 2.0 referencia FT232BM de *Future Technology Devices*.

El puerto USB es una interfaz para transmisión de datos y distribución de energía que ha sido introducida en el mercado de PC's y periféricos para mejorar las lentas interfaces serie (RS-232) y paralelo. Esta interfaz de 4 hilos, 12 Mbps y "plug and play", distribuye 5V para alimentación, transmite datos y está siendo adoptada rápidamente por la industria informática.

Gracias a las ventajas que presenta el uso del puerto USB se seleccionó el FT232BM para establecer una comunicación entre nuestro dispositivo y el PC.

FT232BM

Figura 24. Integrado FT232BM



Fuente: hoja de datos del fabricante *FTDI chip*

El integrado FT232BM posee las siguientes características:

- × Transferencia de datos seriales asíncronos mediante el estándar USB 2.0 en un solo circuito integrado.
- × Soporta protocolo de comunicación serial, esto es transferencia de 7 u 8 *bits*, además de permitir la adición del *Bit* de paridad, *bit* de inicio y *bit* de parada.
- × Descarga datos a 3Mbps mediante interfaz USB – TTL.
- × Posee un Driver software de fabricante, llamado VirtualCOM, compatible con variedad de sistemas operativos, entre ellos Windows XP.
- × Tensión de alimentación 4,35V a 5,25V.
- × Encapsulado pequeño 32-LD LQFP o QFN-32.
- × USB VID, PID, número de serie y descripción del producto almacenado en una memoria EEPROM externa, la cual no hubo necesidad de utilizar.
- × Soporte para USB suspend/resume a través de los pines SLEEP# y RI#.
- × Soporte para alimentar dispositivos directamente del bus USB a través del pin PWREN#.
- × Circuito Power-On-Reset incluido.

en este trabajo se seleccionó el integrado AD5933 que es un conversor de impedancia de la empresa *analog devices*.

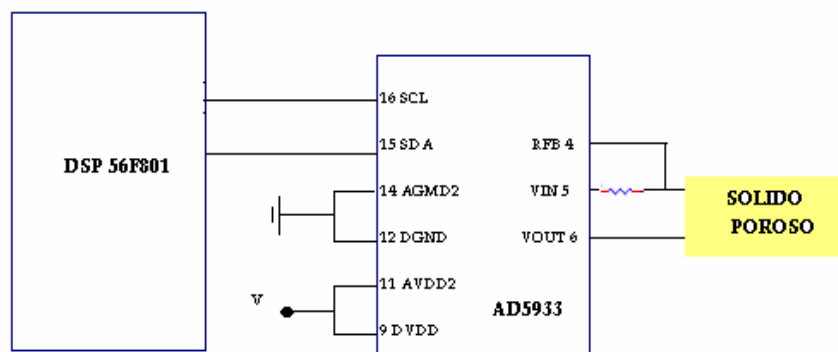
× **AD5933**

El integrado AD5933 es un conversor de impedancia de la empresa *analog devices*, que realiza un análisis completo de la señal, suministrando los datos de la parte real e imaginaria de la impedancia medida. La descripción detallada de este dispositivo se encuentra en secciones anteriores (ver apartado 2.1.4).

Entre las aplicaciones del AD5933 esta:

- × Espectroscopia de impedancia eléctrica.
- × Análisis Electroquímico.
- × Sensores y biosensores en procesamiento de señales.
- × Protección de equipos y análisis de corrosión.
- × Análisis en propiedades de materiales.
- × Pruebas no destructivas.

Figura 26. Esquema de conexión AD5933



Fuente: Autores del proyecto

DISEÑO DE LA TARJETA IMPRESA

En el diseño de una tarjeta de circuito impreso se desea que posea una compatibilidad electromagnética para esto se debe tener en cuenta los siguientes tipos de interferencias:

EMI (Electromagnetic Interference) conducidas: Este tipo de interferencia electromagnética se propaga a través de los cables o pistas de circuito impreso sin importar si son de alimentación, tierra o de señal.

EMI por diafonía: Este tipo de interferencia se produce cuando existe un acoplamiento capacitivo o inductivo entre dos pistas.

EMI Radiadas. Acoplamiento por Radiación: Estas interferencias se deben a la generación de ondas electromagnéticas por parte de las señales que circulan en las pistas del circuito impreso.

Para llevar a cabo el diseño de la tarjeta y minimizar los efectos ocasionados por las diferentes interferencias se realizó una revisión de las principales normas²⁰ para la elaboración de PCB's. Entre ellas, las que se nombran a continuación:

- × Al diseñar la tarjeta se debe procurar que sea lo más densa posible, es decir que sus componentes estén lo más agrupados posible. Esto garantiza una menor longitud de las pistas de circuito impreso, consiguiéndose así reducir efectos inductivos que pueden producir interferencia de RF.

²⁰ MONTROSE, Mark I. *Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance*. Second Edition. IEEE 2000, Inc., New York.

ÁLVAREZ SANTOS, Ramiro. *Tecnología de Circuitos Impresos: Compatibilidad Electromagnética (CEM) en el Diseño de las PCB Y PCA*. 2002.

- × Se debe trabajar con plano de tierra ya que proporciona ventajas muy significativas como evitar que se formen lazos de corriente. Cuando se trabaja con una PCB doble cara, una óptima ruta de retorno RF reduce las interferencias electromagnéticas, ya que el plano de tierra ofrece un camino de mayor área.

- × Las ubicaciones de los elementos que componen una misma etapa debe hacerse lo más cerca posible; con esto se logra reducir la inductancia parásita de la pista del circuito impreso. Una pista que transporta una señal cambiante en el tiempo, genera un flujo cambiante en el tiempo, por lo tanto también se tiene una inductancia asociada y un acople capacitivo, de manera que se recomienda separar las áreas analógicas y digitales que puedan estar presentes dentro de un mismo circuito impreso.

- × Se debe garantizar un plano de tierra sin interrupción, con el fin de asegurar un correcto retorno de las señales manejadas.

- × Para reducir la autoinducción de una pista conductora es aconsejable emplear ángulos de 45° en el enrutado, con el propósito de disminuir la energía almacenada cuando ésta es recorrida por una corriente. Con el fin de conservar la impedancia característica de pista lo ideal es realizar quiebres curvos para mantener el ancho.

- × En las recomendaciones de diseños de PCB con USB, al igual que en la mayoría de circuitos impresos, también se plantea la necesidad de proteger los pines de alimentación con capacitores de *Bypass* para reducir el rizado en la tensión. También se recomienda el uso de capacitores de carga en los pines de salida de alimentación de los puertos y en los reguladores de tensión.

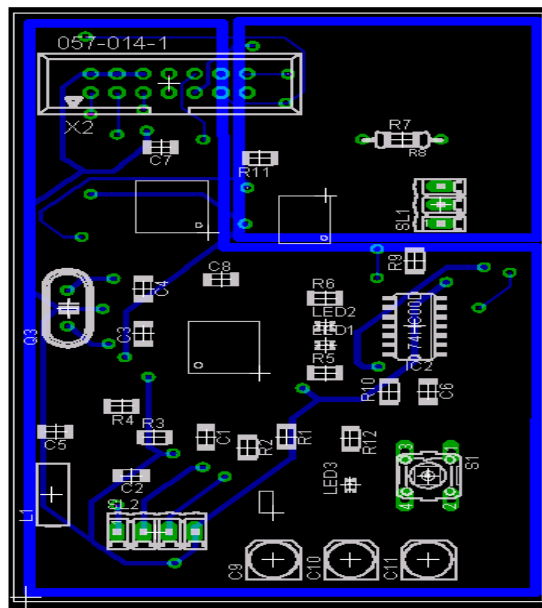
- × La disposición de los dispositivos se diseñó para mantener todos los circuitos integrados lo mas cercanos posible, reduciendo distancias y la complejidad de los caminos enrutados.
- × En el diseño de las rutas del PCB se estableció el ancho del camino 0.4 mm entre dispositivos y 0.2 mm para las conexiones propias del DSP56F801.
- × Para reducir el incremento de la impedancia en las pistas se redujo al máximo posible las longitudes de las mismas. Para esto se ensayo la ubicación de las resistencias, capacitores e integrados hasta encontrar la mas adecuada, de esta manera el valor máximo en nuestro diseño de PCB en la longitud de una pista es de 5 cm.

Algunos aspectos que se tuvieron en cuenta para reducir la diafonía en el diseño del PCB son los siguientes:

- × Se agruparon las familias lógicas de acuerdo a su funcionalidad.
- × Se tuvo en cuenta las recomendaciones de los fabricantes de los diferentes Circuitos Integrados dados en las hojas de datos en cuanto a la colocación de los mismos en el PCB.
- × Se minimizó las longitudes de pistas enrutadas paralelamente.
- × Se localizó los componentes lejos de interconexiones de entrada-salida y otras áreas susceptibles a la corrupción de datos y acoplamientos.
- × Se procuro no realizar el enrutado de pistas paralelas.

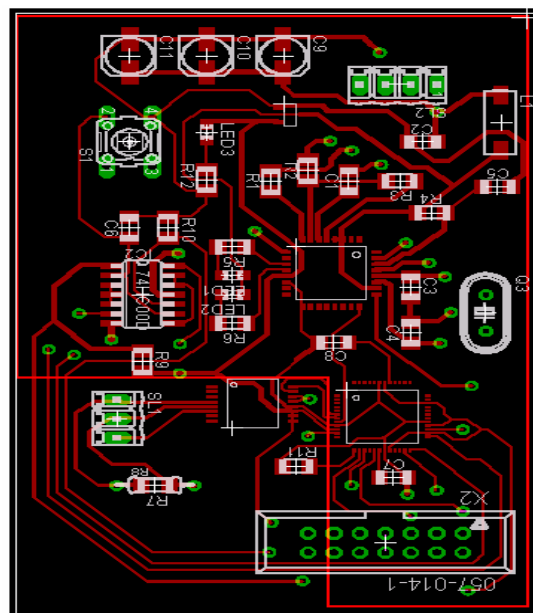
En las figuras 27 y 28, que se muestran a continuación se pueden apreciar las tarjetas diseñadas empleando tecnología doble capa.

Figura 27. Capa inferior circuito impreso



Fuente: Autores del proyecto

Figura 28. Capa superior circuito impreso



Fuente: Autores del proyecto

Figura 29. Equipo diseñado MIMP07



Fuente: Autores del Proyecto

2.1.6 Software

Para la puesta en marcha del AD5933 se desarrollaron algunos algoritmos. Los códigos se realizaron bajo la plataforma *CodeWarrior™ Development Studio for Motorola™ DSP56800/E Hybrid Controllers, versión 8.0* y el *Processor Expert*; este último diseñado para facilitar el desarrollo de aplicaciones, por intermedio de componentes denominados *Embedded Beans™*.

CONFIGURACIÓN DEL DSP.

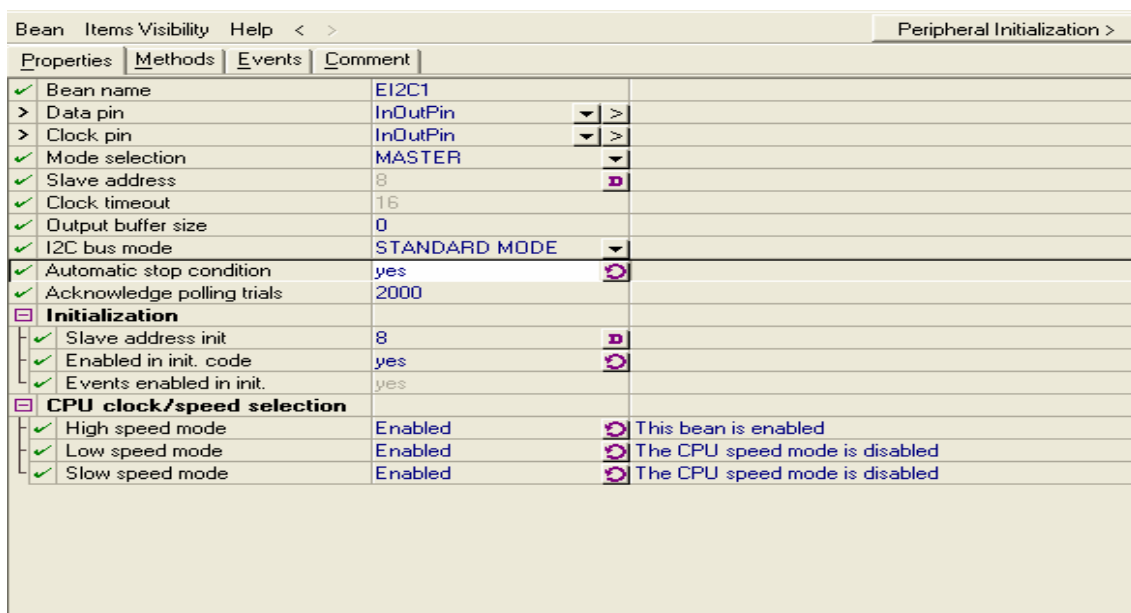
El DSP se configuró como un dispositivo maestro que tiene como dispositivo esclavo al AD5933, para su control se utilizaron pines de propósito general (GPIO), y, para la comunicación con el puerto USB del PC, mediante el FT232BM, los pines de transmisión y recepción de comunicación serial, que también pueden ser configurados como pines de propósito general.

Control del AD5933.

Como ya se menciono anteriormente, el AD5933 maneja el protocolo de comunicaron I²C. Para realizar el proceso de comunicación entre el AD5933 y el DSP se debe habilitar el Bean SW_I2C, el cual emula una interfaz de comunicación I²C. Esta interfaz usa dos pines de propósito general, el primero para la transmisión serial de datos (SDA) y el segundo para el reloj serial (SCL). Los pulsos de SCL son generados por software, por lo tanto no es necesaria una referencia de reloj externo.

Los pines utilizados para la comunicación fueron el pin N^o 6 (GPIOB5_MOSI) como SDA y el pin N^o 7 (GPIOB4_SCLK) como SCL.

Figura 30. Propiedades del bean SW_I2C



Fuente: Autores del proyecto

Protocolo de comunicación I²C.

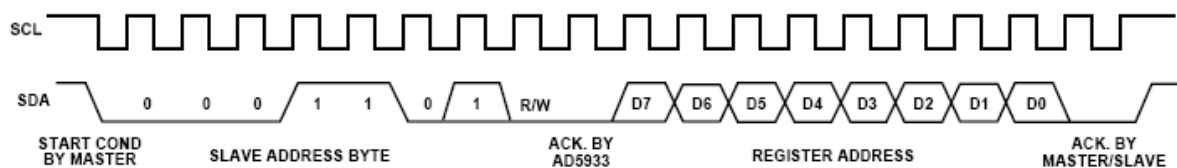
Para iniciar una comunicación entre dispositivos conectados al bus I²C se debe respetar un protocolo el cual es enunciado a continuación. Tan pronto como el bus esté libre, un

dispositivo maestro puede ocuparlo generando una condición de inicio. El primer byte transmitido después de la condición de inicio contiene los siete bits que componen la dirección del dispositivo de destino seleccionado y un octavo bit correspondiente a la operación deseada (lectura o escritura). Si el dispositivo cuya dirección se apuntó en los siete bits está presente en el bus éste responde enviando el pulso de reconocimiento ó ACK. Seguidamente puede comenzar el intercambio de información entre los dispositivos.

Cuando la señal lectura o escritura (R/\bar{W}) está previamente a nivel lógico bajo, el dispositivo maestro envía datos al dispositivo esclavo hasta que deja de recibir los pulsos de reconocimiento, o hasta que se hayan transmitido todos los datos.

En el caso contrario, es decir cuando la señal R/\bar{W} (lectura o escritura) esta en nivel lógico alto, el dispositivo maestro genera pulsos de reloj durante los cuales el dispositivo esclavo puede enviar datos. Luego de cada byte recibido el dispositivo maestro (que en este momento está recibiendo datos) genera un pulso de reconocimiento. A continuación se muestra el diagrama de tiempo para transmisión de datos.

Figura 31. Diagrama de tiempo.



Fuente: hoja de datos del fabricante AD5933 *analog devices*

Las definiciones o términos utilizados en relación con las funciones del bus I²C son las siguientes:

- × **Maestro (Master):** Dispositivo que controla la temporización y la dirección del tráfico de datos en el bus. Es el único que aplica los pulsos de reloj en la línea

SCL. Cuando se conectan varios dispositivos maestros a un mismo bus la configuración obtenida se denomina "multi-maestro".

- × **Esclavo (Slave):** Cualquier dispositivo conectado al bus incapaz de generar pulsos de reloj. Reciben señales de comando y de reloj proveniente del dispositivo maestro.
- × **Bus Desocupado (Bus Free):** Estado en el cual ambas líneas (SDA y SCL) están inactivas, presentando un estado lógico alto. Únicamente en este momento es cuando un dispositivo maestro puede comenzar a hacer uso del bus.
- × **Comienzo (Start):** Sucede cuando un dispositivo maestro hace ocupación del bus, generando esta condición. La línea de datos (SDA) toma un estado bajo mientras que la línea de reloj (SCL) permanece alta.
- × **Parada (Stop):** Un dispositivo maestro puede generar esta condición dejando libre el bus. La línea de datos y reloj toman un estado lógico alto.
- × **Dato Válido (Valid Data):** Es un byte de datos que puede ser leído correctamente en la línea SDA, mientras la línea SCL esta a nivel lógico alto..
- × **Formato de Datos (Data Format):** La transmisión de datos a través de este bus consta de 8 bits de datos (ó 1 byte). A cada byte le sigue un noveno pulso de reloj durante el cual el dispositivo receptor del byte debe generar un pulso de reconocimiento, conocido como ACK (del inglés Acknowledge). Esto se logra situando la línea de datos a un nivel lógico bajo mientras transcurre el noveno pulso de reloj.
- × **Dirección (Address):** Cada dispositivo diseñado para funcionar en este bus dispone de su propia y única dirección de acceso, que viene pre-establecida por el fabricante. Hay dispositivos que permiten establecer externamente parte de la dirección de acceso. Esto permite que una serie del mismo tipo de dispositivo se puedan conectar en un mismo bus sin que se presenten problemas de identificación.
- × **Lectura/Escritura (Bit R/W):** Cada dispositivo dispone de una dirección de 7 bits. El octavo bit (el menos significativo ó LSB), enviado durante la operación de

direccionamiento corresponde al bit que indica el tipo de operación a realizar. Si este bit es alto el dispositivo maestro lee información proveniente de un dispositivo esclavo. En cambio, si este bit fuese bajo el dispositivo maestro escribe información en un dispositivo esclavo.

Las principales funciones utilizadas en el protocolo I²C de acuerdo al nombre dado por el desarrollador Code Warrior son:

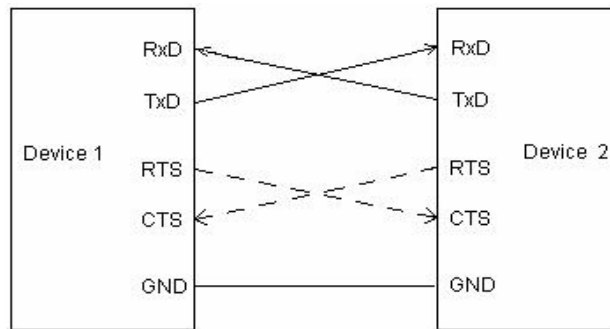
- × **SendChar:** Permite enviar un byte de datos. Cuando trabaja como maestro escribe 7 bits de la dirección del esclavo más un bit de escritura (bit=0) y entonces escribe un byte en el bus.
- × **RecvChar:** Permite recibir un byte de datos. Cuando trabaja como maestro escribe 7 bits de la dirección del esclavo más un bit de lectura (bit=1) y entonces lee un byte de el bus.
- × **SelectSlave:** Esta función selecciona un nuevo esclavo para la comunicación, mediante un valor de dirección de esclavo.

Comunicación con el FT232BM

Para la comunicación con el FT232BM se utilizo Bean AsynchroSerial. Este bean provee las características Standard de comunicación serial asíncrono y también funciones especiales suministradas por hardware como:

- × Numero de bits de datos.
- × Numero de bits de parada.
- × Tasa de bauds.
- × Paridad entre otros.

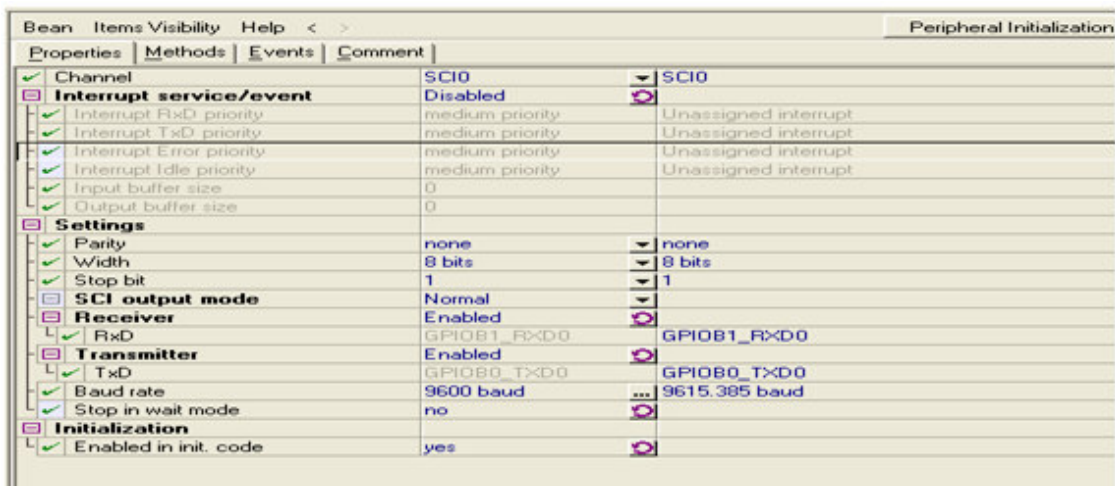
Figura 32. Ejemplo de conexión entre dos dispositivos



Fuente: Hoja de datos del fabricante

Los pines utilizados para este tipo de comunicación fueron el pin N° 8 (GPIOB0_TXD0) como salida de transmisión de datos y el pin N° 11 (GPIOB1_RXD0) como entrada de recepción de datos, ambos pueden ser configurados como pines de propósito general.

Figura 33. Propiedades del bean AsynchroSerial



3. PROTOCOLO PARA LA MEDICION DE ESPECTRO DE IMPEDANCIA ELECTRICA EN SÓLIDOS POROSOS

3.1 CUIDADO CON LOS SÓLIDOS POROSOS

Los materiales cerámicos (sólidos porosos) motivo de nuestro trabajo fueron fabricados siguiendo una serie de procesos, primero, se clasifica la materia prima. Estos son manufacturados a partir de polvos de partículas con diferentes tamaños, siendo la arcilla el principal componente. Segundo, esta materia prima en forma de polvos es mezclada con agua, tercero se amasa, cuarto, se somete al proceso de prensado y secado par compactar y distribuir los polvos y, por ultimo se someten a la cocción. Dependiendo de la aplicación deseada puede ser sometida a otra serie de procesos con un mayor rango de importancia en el desarrollo de la estructura y propiedades requeridas. (Ver proceso de conformado 1.1.3).

Los cerámicos utilizados tan solo llegan hasta el proceso de secado (100° C-120° C), debido a que los materiales sufren un proceso llamado revenido en el cual absorben humedad del medio, por lo tanto secarlas a una temperatura mas alta seria inconveniente porque nuevamente absorberían humedad para establecer un equilibrio entre la humedad ambiental y la humedad propia, debido a que el material es higroscópico, es decir, tiene una afinidad muy grande con el agua.

Es conveniente evitar almacenar dichos cerámicos en lugares donde exista un alto grado de humedad. La mejor solución es mantenerlos en el mismo ambiente en donde fueron manufacturados para conseguir el equilibrio mencionado y evitar cambios indeseables en las propiedades de los mismos, de lo contrario deben ser guardados herméticamente para evitar continuos contactos con el medio y fracturas en las piezas

debido a que al no ser sometidas aun a altas temperaturas (500°C proceso de cocción) presentan una elevada fragilidad.

Los cerámicos en la etapa en que se someten al proceso de secado se encuentran en el punto óptimo para realizar las pruebas de porosidad, resistencia a la tracción y a la flexión. En el caso de la existencia de algún problema o deficiencia se puede retroceder el proceso iniciándose nuevamente, mientras que si se sigue con el proceso de transformación, los métodos para realizar las pruebas implicarían destruir las piezas y los costos aumentarían. Todos los resultados dependen en mayor porcentaje al cuidado que se tengan con los cerámicos.

3.2 JAULA DE FARADAY

La jaula de Faraday también llamada reticular se basa en un fenómeno descubierto por el físico inglés Michael Faraday (1791-1867), que consiste en rodear un ambiente o espacio hueco con una lámina conductora, el campo eléctrico externo redistribuye los electrones libres en el conductor. Esta nueva distribución de carga ocasiona un campo eléctrico adicional tal que el campo total en todo punto interior sea aproximadamente cero.

Detrás del fenómeno Físico de la Jaula de Faraday se debe a las propiedades de las ondas electromagnéticas cuando se propagan a través del conductor. En dicho conductor los átomos que lo forman se enlazan de forma que comparten sus electrones de los orbitales más externos, y son libres de moverse por todo el material. Esta alta densidad de electrones libres hace que cuando una onda electromagnética intenta desplazarse por un medio así, se atenúe.

Cada material posee una profundidad característica de atenuación que determina la distancia que recorre una onda hasta que su campo eléctrico se reduce en un factor $1/e=0.367$, es decir, cuando el campo eléctrico se reduce en un 36.7%. Cuando se

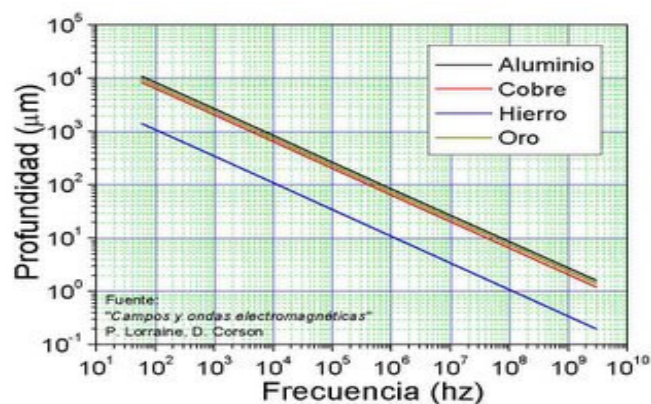
habla en términos de la densidad de potencia (o cantidad de energía que atraviesa un área determinada por segundo) de una onda electromagnética, que viene dada por el cuadrado del campo eléctrico, para una misma distancia, la potencia de la onda disminuye en un factor $1/e^2=0.135$, un 13.5%.

Un 13.5% puede ser una cantidad muy pequeña, prácticamente nula, por esto la jaula de Faraday juega con el espesor de las paredes para que la atenuación sea la necesaria como para que la potencia que consigue atravesarla sea despreciable. Cuanto mayor sea el espesor, menos energía traspasará la jaula e interferirá con el circuito.

La profundidad característica depende además de la frecuencia de la onda incidente, de forma que una jaula puede ser efectiva para unas frecuencias, pero mala para otras. En general, cuanto mayor es la frecuencia, menor es la profundidad característica, es decir, se atenúa más rápido.

A continuación presentamos una grafica para varios conductores utilizados en la fabricación de una Jaula de Faraday:

Figura 34. Relación frecuencia vs. Profundidad en conductores



Fuente: <http://photos1.blogger.com>

Podemos concluir de los materiales presentados que el hierro sería el mejor de todos para hacer una jaula de Faraday, porque para el mismo espesor, atenúa más la señal que los otros materiales.

Siguiendo las consideraciones anteriores, el conductor de nuestra jaula es de hierro, y tiene dimensiones de 35cmx20cmx20cm.

Figura 35. Jaula de Faraday utilizada en las mediciones



Fuente: Autores del Proyecto

3.3 PROTOCOLO DE MEDICION

El presente trabajo se realizo con el fin de diseñar un método para la obtención del espectro de impedancia eléctrica en sólidos porosos para posteriores estudios ser correlacionados los valores obtenidos con la porosidad, resistencia a tracción y a la flexión de dicho material.

En la toma de datos se tuvieron en cuenta factores que podrían hacer variar las medidas como la temperatura y humedad ambiental a la hora de tomar los datos en las

muestras. Además se procuró que el tiempo entre medida y medida a través de las diversas caras de la pieza, fuera el mínimo. Esto con el fin de que las variaciones ambientales mencionadas anteriormente no afectaran significativamente los datos recolectados.

Las muestras fueron suministradas por la Universidad Nacional Sede Medellín. Las mediciones se realizaron en las instalaciones de la Corporación para la investigación de la corrosión (Sede Guatiguara), allí permanecieron durante todo el proceso de medición con el fin evitar estar transportando continuamente las muestras debido a que los continuos cambios pueden fracturar las piezas cerámicas y ocasionar cambios en las propiedades de las mismas.

Para la toma de medidas se utilizó el Analizador de impedancia Solartron 1280B. Este equipo cuenta con un software de adquisición de datos (Zplot) y visualización de los mismos (Zview). Además ofrece la posibilidad de escoger dos modos de trabajo Galvanómetro si se desea inyectar una corriente y medir tensión ó Potenciostato si se excita con una tensión fija y se sensa corriente. Este ultimo modo de trabajo fue el utilizado en nuestras mediciones, una característica²¹ importante de él , es que mantiene las condiciones de offset en el material a medir, mientras el analizador de respuesta en frecuencia esta haciendo el análisis de AC (las condiciones de offset dependen de la aplicación).

Para obtener el espectro de impedancia eléctrica fue necesario realizar mediciones a diferentes frecuencias, por lo tanto se trabajo en un rango comprendido de 0.2Hz a 20kHz.

²¹ WILLEY, Op Cit., 169 p.

Figura 36. Analizador de Impedancia Solartron 1280B



Fuente: Autores del Proyecto

3.3.1 Electrodo de medición. En un principio se realizaron contactos²² con la muestra utilizando tintura conductora, la cual tiene un método de implementación muy sencillo, la forma de colocación es como el pegamento, se coloca una gota de la tintura en donde se desea realizar el contacto y se espera a que seque. La tintura utilizada fue tintura de Cobre. Este método no proporcionó buenos resultados, el contacto requerido era puntual y el material cerámico utilizado absorbió la tintura a través de sus poros ocasionando una expansión de la misma.

Debido a que dicho contacto es un criterio de gran importancia a la hora de obtener resultados experimentales se decidió implementar una sonda de medición que se acomodara mejor a nuestras necesidades, contactos puntuales, electrodos igualmente espaciados y a una distancia fija, presión contacto-muestra siempre igual, etc. Las características con que se diseñó la sonda de medición fue para aplicar el método de los dos puntos, técnica²³ de medición usada principalmente para medidas en materiales con alta impedancia donde la impedancia de los cables no es significativa.

²² SANCHEZ, Op cit.

²³ WILLEY, Op Cit., 184 p

Se utilizó teflón (material aislante con características óptimas para el diseño), para la base, se realizaron 4 orificios igualmente espaciados, en donde se incrustaron 4 pequeños cilindros de cerámica Mullite. Para que los orificios quedaran de la medida adecuada se utilizó una broca de 1.6 pulgadas, esta medida fue un poco más pequeña que el diámetro real del cilindro, para lograr un buen ajuste entre el teflón y la cerámica (los arreglos se realizaron manualmente con un lima especial).

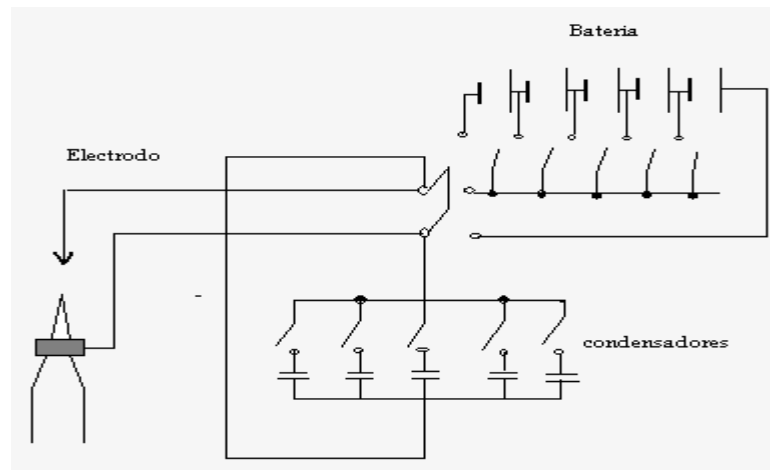
Los orificios igualmente espaciados se realizaron para poder aplicar el método de los dos y cuatro puntos mencionado en el ítem 1.3.1 y 1.3.2

La cerámica Mullite se cortó con un cortador de precisión de marca Buehler que tiene un disco especial de polvo de diamante para un efecto de corte perfecto; en él también se cortó la barra de oro cilíndrica, material conductor que realiza el contacto en la toma de mediciones.

El oro está cilíndrico y tiene sus puntas redondeadas, este efecto se realizó a través del método del arco.²⁴ Este método consiste en conectar una fuente de alto voltaje a un gran condensador o un banco de condensadores con aire como dieléctrico. El condensador se va cargando, hasta que llega a la tensión de ruptura del aire que hace de dieléctrico. En ese momento los electrones que forman la corriente salen de la fuente de voltaje y se producirá una chispa que saltará de un extremo al otro, donde se encuentra la barra cilíndrica de oro.

²⁴ BAKER, H. Dean y RYDER, E. A. Temperature measurement in engineering. Junctions and Sílices. Stamford, CT Omega Press, a division of Omega engineering, INC. 1975, 180 p, Volumen 1.

Figura 37. Método del arco por descarga de condensadores

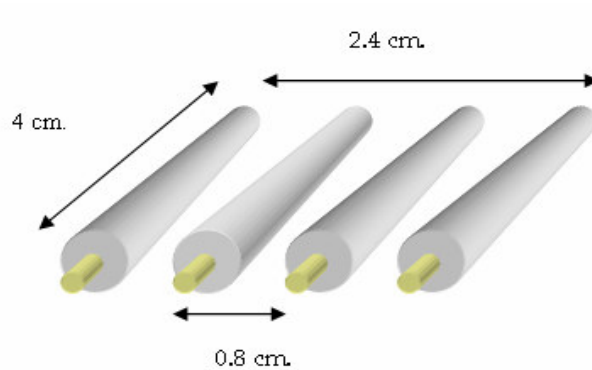


Fuente: Autores del proyecto

Línea de diseño

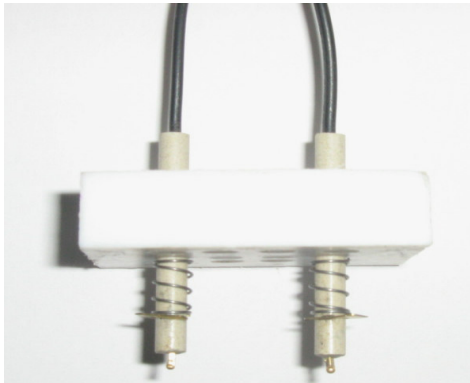
- × Separación entre electrodos 0.8cm para electrodos consecutivos y 2.4 cm. para dos electrodos periféricos, dependiendo de la cara analizada de la pieza.
- × El contacto realizado con el material debe ser puntual, por lo tanto se utilizó un material con gran conductividad como lo es el oro. El oro está cilindrado y posee sus puntas redondeadas.
- × Las puntas de oro presentan las siguientes características: 1 mm de diámetro, 1 cm. largo de los cuales 4 mm quedan expuestos para hacer contactos con la muestra.
- × La cerámica Mullite es de forma cilíndrica y tiene como características 4 mm de diámetro, 4 cm. de largo. Su centro es hueco, por lo que se ubica dentro de ella la barra de oro que realiza el contacto.
- × El soporte de la sonda está hecho a base de teflón, material aislante con forma rectangular de 5 cm x 3.5 cm.

Figura 38. Diseño de los electrodos



Fuente: Autores del proyecto

Figura 39. Sonda de medición



Fuente: Autores del proyecto

3.3.2 Método de medición.

Personas que actúan en la toma de datos

En el proceso de toma de datos, la manipulación de las piezas para la obtención del espectro, el manejo del equipo y la recolección de los mismos, fueron realizados por los

estudiante de ingeniería Electrónica que tienen a su cargo este experimento, como parte principal de su trabajo de pregrado, estos son Claudia Marcela Martínez Duarte y Luís Fernando Bustamante Hernández, además en algunas ocasiones estuvieron acompañados por el físico Ferney Vesga encargado del funcionamiento del laboratorio de Electroquímica de la corporación para la investigación de la corrosión sede Guatiguara y el ingeniero David Miranda encargados de supervisar y asesorar todo los procedimientos.

3.3.3 Toma de datos. La toma de datos se llevó a cabo como ya se mencionó, en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander y en la Corporación para la investigación de la corrosión, en compañía del grupo de trabajo del laboratorio de Electroquímica quienes nos facilitaron el equipo y todos los componentes necesarios para el experimento.

En la Corporación las mediciones se realizaron durante los últimos meses del año 2006, desde el 6 de Octubre hasta el 20 de Noviembre. En la primera semana se realizó una jornada de capacitación que era imprescindible para obtener el permiso de entrar a las instalaciones, se hizo un reconocimiento del lugar, zonas de peligro y acceso limitado a personal capacitado, salidas de emergencia, se conoció el personal de trabajo de todas las dependencias, nos hablaron del manejo y cuidado de los equipos, de las reglas que se deben cumplir dentro de un laboratorio y lo mas importante se expuso el objetivo de nuestro trabajo.

Las jornadas de trabajo se realizaron de cuatro horas aproximadamente para alcanzar a medir entre 6 y 8 piezas diarias por cada una de sus caras. Esto con el fin que no se aplazara alguna medida para el siguiente día debido a que el cambio en la temperatura y humedad a la hora de la medición podría conducir a una variación en las medidas. Dicha jornada se realizaba en las horas de la mañana o de la tarde, dependiendo de la disponibilidad de los equipos y de las personas encargadas del Laboratorio.

Los electrodos son ubicados sobre la muestra haciendo una distribución uniforme sobre la misma. Los electrodos de medida poseen dos terminales necesarios para suministrar la tensión de excitación (50mV) en el Analizador de Impedancia Solartron. Una vez introducido el valor de tensión, el rango de frecuencia de trabajo y la cantidad de datos en el barrido de frecuencia, se procede a realizar las mediciones en las piezas cerámicas. Con ayuda de la interfaz Zview se pueden visualizar y exportar los datos para realizar los respectivos análisis.

PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE DATOS

La toma de datos se debe realizar por cada una de las caras de la pieza, es decir se realiza una medida en la cara superior, una en la posterior y otra en la frontal. El procedimiento inicial es ubicar la pieza bajo la sonda de medición y posteriormente conectar dichos electrodos al equipo con que se va a realizar la medición, las medidas se toman dentro de la jaula de Faraday. Esto tarda alrededor de un minuto, refiriéndonos a una sola de las caras. El tiempo es contabilizado para todo el barrido a través del rango de frecuencias establecido. Todo el proceso toma más o menos cuatro minutos entre cada toma de datos, luego existe un pequeño tiempo de un minuto en el cuál se prepara nuevamente el equipo para realizar una nueva toma, repitiéndose reiteradamente el procedimiento. De esta forma, en aproximadamente quince minutos es posible realizar tres tomas de datos completas que corresponderían a una sola pieza. Transcurridos estos quince minutos se repite el mismo proceso para las otras piezas.

Es importante que la toma de datos de una sola pieza, por sus respectivas caras, se realice consecutivamente. Entre menor sea el tiempo entre mediciones mejor serán los resultados, ya que la variación de temperatura y humedad ambiental ocasionan variaciones notorias en las propiedades de la pieza.

MANEJO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTAL

Mientras se realizó la toma de datos las piezas no se transportaron con el fin de que permanecieran en el mismo ambiente y evitar un cambio en sus propiedades. Se ubicaron en un lugar no muy húmedo debido a que su facilidad para absorber dicha humedad. La temperatura varía entre los 25 °C y los 30 °C y la humedad entre 70% y 90% en el lugar donde se tomaron los datos.

Para medir las variaciones de temperatura y humedad se utilizó el Termo Higrometro W/Dew Point que se presenta a continuación:

Figura 40. Medidor de Temperatura y Humedad. Termo Higrometro



Fuente: Autores del Proyecto

RANGO DE FRECUENCIAS

El espectro de impedancia eléctrica se realizó con un barrido de 35 datos en el rango de frecuencias comprendido entre 0.2Hz y 20kHz para el Analizador de impedancia Solartron de la Corporación para la investigación de la Corrosión.

CONSERVACION DE LAS PIEZAS

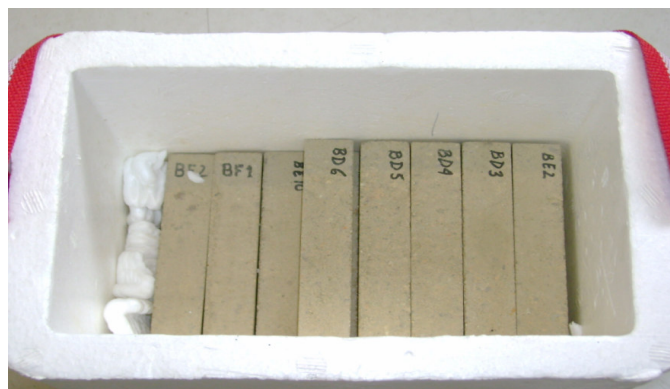
Figura 41. Cerámicos Porosos



Fuente: Autores del Proyecto

Es necesario que los sólidos porosos permanezcan en un medio que les permitan mantener sus características, tales como composición química, dimensión de la muestra, cantidad de agua, entre otras. Este medio debe evitar en la mayor forma posible, la humedad en exceso. Para asegurar una baja variación en la humedad (los niveles de humedad pueden disminuir o aumentar durante la toma de datos debido a los cambios en el clima frío-calor) de las piezas durante el almacenamiento se colocaron las piezas en un medio aislado, dentro de cavas de icopor, con este almacenamiento se reduce cualquier tipo de quiebre debido a que son demasiado frágiles.

Figura 42. Conservación de las piezas



Fuente: Autores del proyecto

CONSTRUCCION DE LA FICHA DE INFORMACIÓN

La siguiente ficha se realizó con el fin de organizar los datos de una manera sencilla y ordenada.

Figura 43. Ficha de información

A -> 15% DE HUMEDAD

B -> 25% DE HUMEDAD

C -> 1000 PSI

D -> 1200 PSI

E -> 1500 PSI

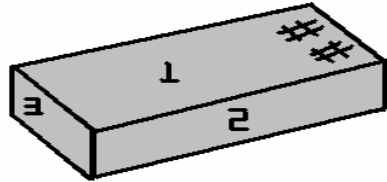
F -> 1000 PSI

G -> 1200 PSI

H -> 1500 PSI

} ST

} MW



EQUIPO		
NOMBRE DEL OPERARIO		
NOMBRE DEL CERÁMICO		
NOMBRE DEL ARCHIVO		HORA
TEMPERATURA AMBIENTAL		FECHA
HUMEDAD RELATIVA		
FRECUENCIAS DE TRABAJO		
CARA	DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS (a)	OBSERVACIONES
1 SUPERIOR		
2 LATERAL DERECHA		
3 FRONTAL INFEIOR		

♣ Las caras de la roca tienen como referencia el nombre

Fuente: Autores del proyecto

Como se observo en la ficha de información se tiene una tabla con una serie de letras con variables como presión y humedad a las que fueron sometidas en su proceso de conformado y el proceso de secado al que fueron expuestas: ST (secado tradicional), y MW (secado por microondas). La combinación de dichas letras indica el nombre que se le da a cada uno de los cerámicos. En total se analizaron 90 piezas.

3.3.4 Condiciones del laboratorio. Para trabajar con estos cerámicos porosos es necesario tener ciertos cuidados especiales para prevenir el daño de los mismos. Se pueden obtener resultados fallidos si no se tienen en cuenta algunos aspectos respecto la zona y condiciones de trabajo.

➤ **Características de la zona de trabajo:**

- × **Ergonomía.** Se deben tener al alcance todos los implementos para hacer el trabajo mas humano en función con las posibilidades y los recursos con que cuentan las personas encargadas de dicha labor.
- × **Seguridad.** Todo posible origen de peligro debe ser identificado, para percatarse del problema, registrar todos los medios indispensables para acondicionarlos y de esta manera contrarrestar situaciones de riesgo.
- × **Confort.** El lugar de trabajo debe cumplir con las condiciones necesarias que permitan una labor agradable y sin fatiga innecesaria.
- × **Compromiso.** Todo el personal que participa en el desarrollo del experimento debe ser responsable por su área de trabajo. Desde cumplimiento de sus responsabilidades hasta el mantenimiento del lugar, y por supuesto evitar a toda costa equipos encendidos inutilizados, conexiones peligrosas, muestras sin identificar, entre otros, para evitar incidentes desagradables de cualquier tipo.

En nuestra primera etapa de mediciones en la Corporación para la investigación de la corrosión, se trabajo en el Laboratorio de Electroquímica. El laboratorio cuenta con

todos los recursos necesarios para el desarrollo eficiente del trabajo, (computadores en mesas independientes, cables, pinzas, jaulas de Faraday, mesas, sillas, y todos los equipos necesarios para realizar pruebas de corrosión), buena iluminación y aire.

Todo el personal que trabaja en Laboratorio tiene su propio espacio de trabajo y es responsable por el mantenimiento y cuidado del mismo (si se tienen dudas en el manejo de algún dispositivo se debe recurrir al asistente designado para el Laboratorio). Todos los equipos dentro del Laboratorio están debidamente etiquetados, con el nombre y referencia, fechas de las últimas calibraciones, mantenimiento y el nombre de la Corporación, los elementos sencillos como pinzas, cables, etc., tienen cajones designados, al finalizar la jornada de trabajo deben regresarse a su sitio.

Las zonas de mediciones importantes, delicadas y de peligro se encuentran en lugares visibles pero a su vez aisladas de las demás zonas de trabajo. Por prevención y seguridad se cuenta con extintores la entrada del laboratorio.

Figura 44. Zona de trabajo



Fuente: Autores del Proyecto

× Seguridad del laboratorio

Trabajar en un laboratorio puede no implicar peligros por sí misma, sin embargo existe la posibilidad de que se produzcan algunos accidentes que son ocasionados muchas veces por las mismas personas que trabajan en él, es por esto importante la seguridad en el laboratorio por lo cual es necesario cumplir con una serie de normas y prácticas para lograr situaciones libres de riesgos.

Podemos hablar de seguridad como un conjunto de protocolos de trabajo que deben incluir no sólo el conocimiento del riesgo y las normas de prevención sino también la definición de las normas de actuación cuando la seguridad se quiebra y ocurre un accidente.

En la Corporación se siguen los siguientes procedimientos:

Si se tiene conocimiento de riesgo de accidente se debe informar por escrito al jefe del laboratorio; en caso de accidente ocasionado por fuego utilizar los extintores que se encuentran a la entrada del laboratorio, recurrir al personal más capacitado, y en el peor de los casos buscar la salida de emergencia, si hay personal herido llevarlo rápidamente a la enfermería de la institución, si es de gravedad no movilizarlo y llamar al centro de salud (todos los teléfonos cuentan con un sticker con números de emergencia). La Corporación cuenta con los datos personales de todas las personas que trabajan en ella o que ingresar por tiempo mayor a 15 días (Los datos se actualizan cada 6 meses).

En nuestras pruebas existieron diversos factores de peligro tales como sobrecalentamiento y cortocircuito de equipos, así como la exposición a voltajes y corrientes por parte del operador. Se podría producir un shock eléctrico cuando se operan dispositivos electrónicos, aunque esto último es poco probable que se presente debido a que los valores de tensión y corriente manejados en este caso no son lo suficientemente altos como para causar algún efecto en el organismo, pero si

causarían severos daños al equipo, por otra parte podrían realizarse conexiones erróneas o incluso contemplar la existencia de malos funcionamientos en los dispositivos.

Es por esto que es necesario considerar algunas medidas de seguridad para prevenir algún incidente que pueda exponer tanto a las personas que trabajan en el proyecto como al equipo utilizado. Es importante tener en cuenta algunas barreras para evitar ser incumplidas por errores humanos aunque en ocasiones se producen por errores mecánicos.

Tenemos las barreras localizadas en torno al origen del riesgo. Equipo e instrumental correcto, excelentes conexiones, protecciones, trabajo riguroso, ordenado y por último las barreras localizadas en el círculo del operador. Incluye la higiene personal, programas de salud laboral y la vestimenta.

Conexiones. Toda conexión debe ser debidamente revisada para evitar conexiones erróneas que puedan ocasionar algún tipo de corto.

Ropa. Debe llevarse siempre bata, en lo posible manga larga, no se debe utilizar sandalias en el caso de las mujeres, ya que al llevar los dedos al aire están expuestos a recibir un vertido o a dañarse con cristales rotos. La bata debe quitarse antes de abandonar el laboratorio.

Guantes. Los guantes deben ser desechados después de finalizada la tarea. En nuestro caso son de especial utilidad ya que evita traspasar la humedad de las manos a las piezas del análisis evitando así cambiar sus propiedades.

Por último se tuvo en cuenta como recomendación, que al trabajar en el laboratorio los mostradores deben estar limpios y ordenados; las superficies de trabajo libres de suciedad, por otro lado todos los materiales que presenten desaseo deben ser

limpiados antes de utilizarlos y reutilizarlos para evitar que cualquier partícula se adhiera al material sometido a prueba y altere los datos.

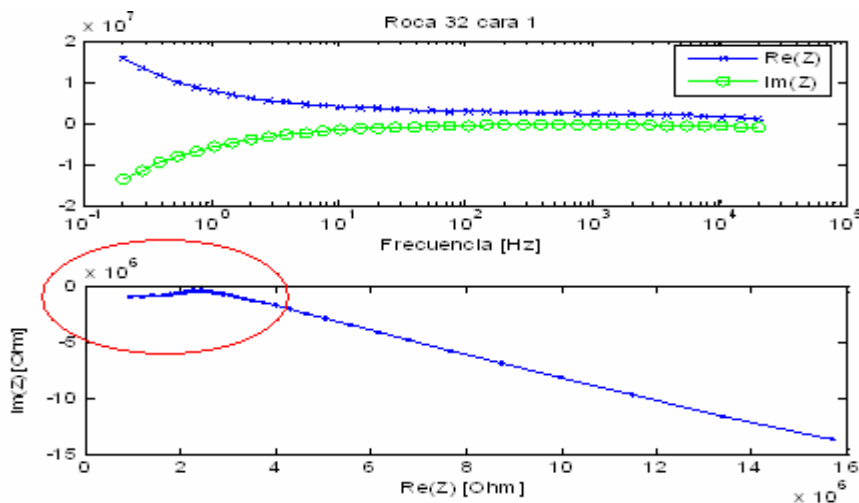
No se debe comer, beber, o fumar en el laboratorio, ni almacenar en el ningún tipo de alimento o bebida.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 MEDIDAS EN SÓLIDOS POROSOS

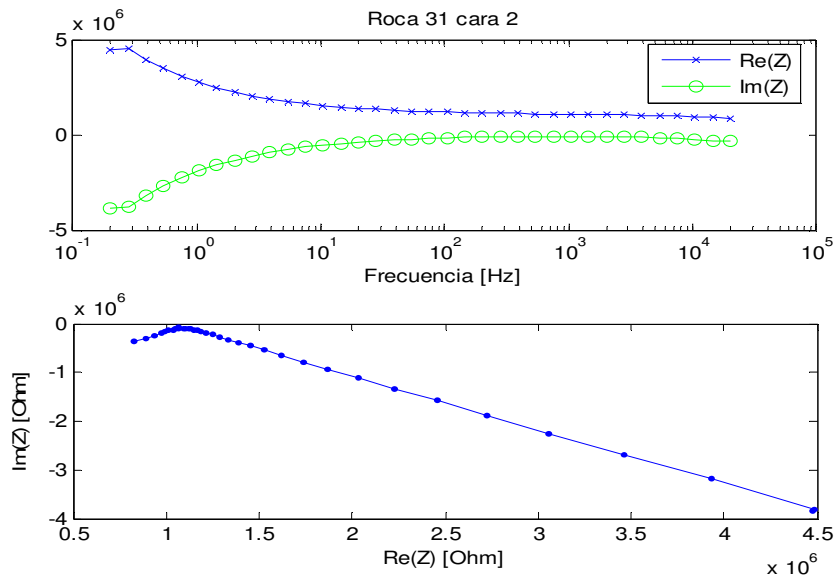
En esta sección se presentan 5 de 95 de los datos obtenidos en el analizador de impedancia Solartron 1280B (en la versión digital de este reporte se presentan todas las medidas experimentales), en el cual se realizó un barrido en frecuencia de 0.2hz a 20khz, las figuras muestran los resultados al efectuar diferentes mediciones en las 3 caras del material cerámico, por cada cara del material se presentan dos figuras, una muestra la parte real (curva azul) e imaginaria (curva verde) en función de la frecuencia. La segunda figura presenta la parte imaginaria contra la parte real de la impedancia, Diagrama de Nyquist donde se puede observar la semicurva de la región de más bajas frecuencias. Esta curva se puede aproximar a un semicírculo cuyo eje no está exactamente sobre el eje X, para calcular los parámetros de un circuito equivalente que represente los materiales porosos.

Figura 45. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BF4



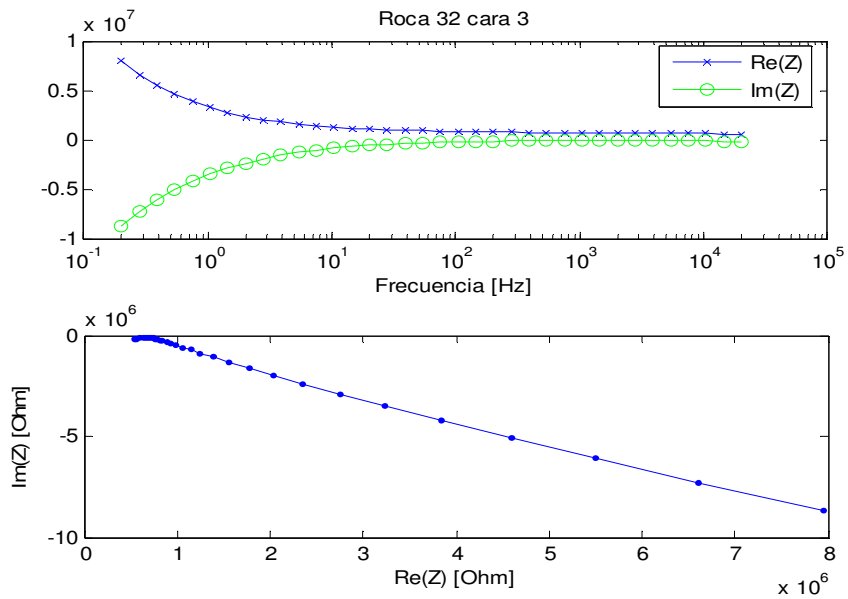
Fuente: Autores del Proyecto

Figura 46. Resultados de la medición por la cara lateral izquierda, Cerámico BF4



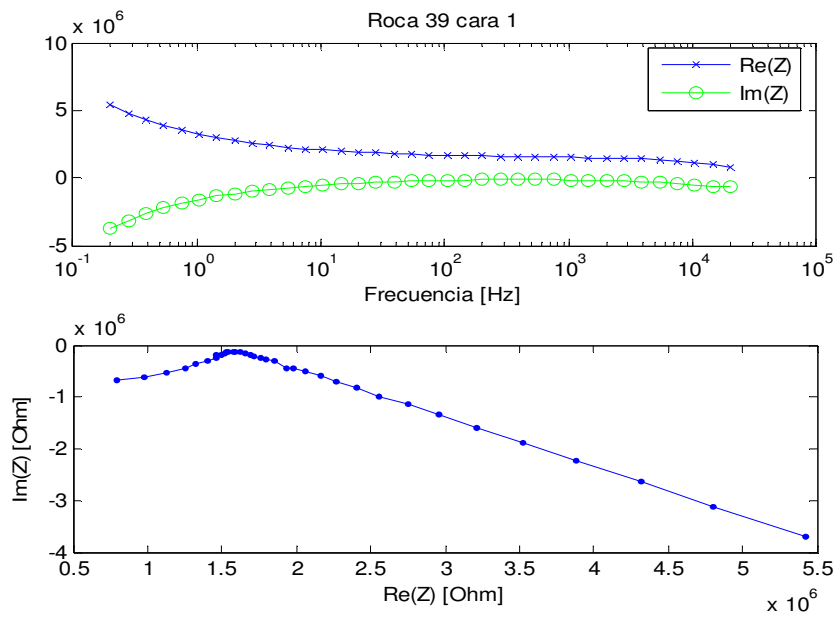
Fuente: Autores del proyecto

Figura 47. Resultados de la medición por la cara frontal, Cerámico BF4



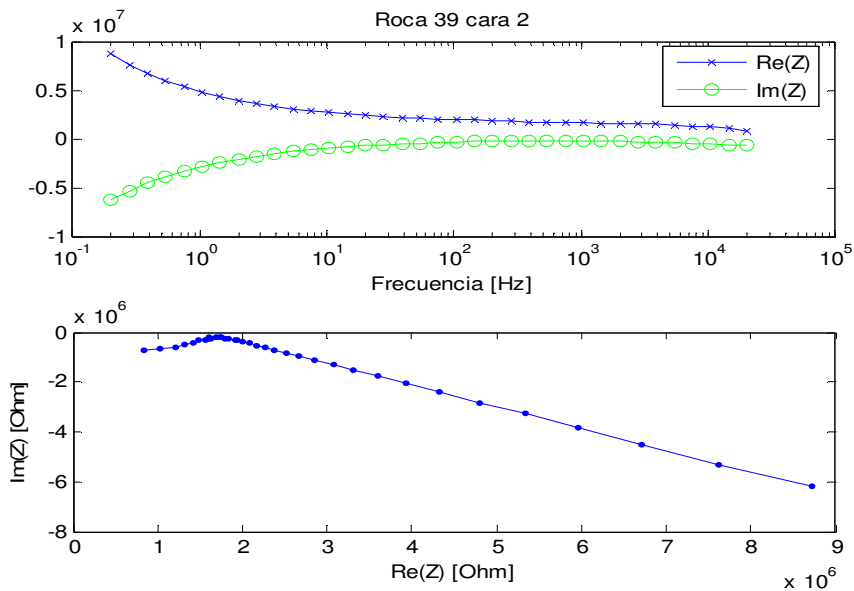
Fuente: Autores del proyecto

Figura 48. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BG2



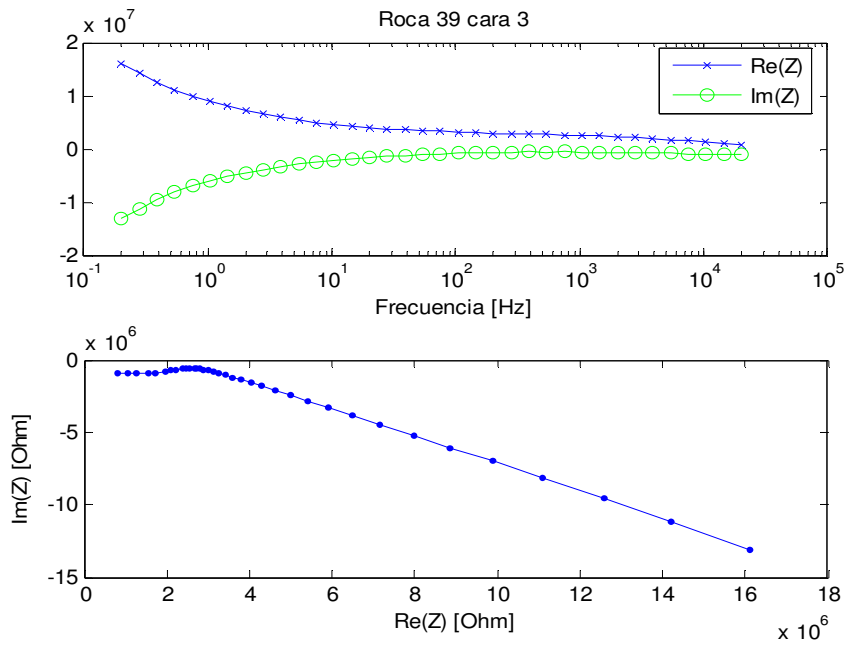
Fuente: Autores del proyecto

Figura 49. Resultados de la medición por la cara Lateral Izquierda, Cerámico BG2



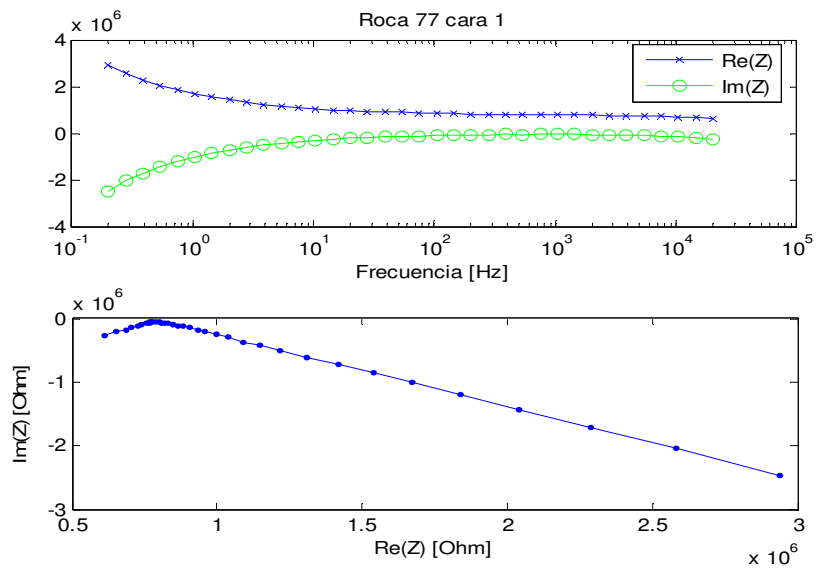
Fuente: Autores del proyecto

Figura 50. Resultados de la medición por la cara Frontal, Cerámico BG2



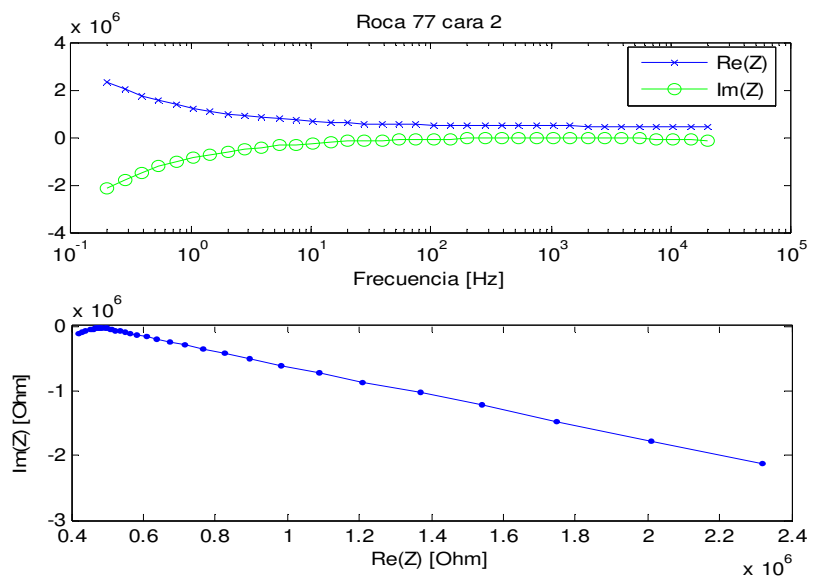
Fuente: Autores del proyecto

Figura 51. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BD10



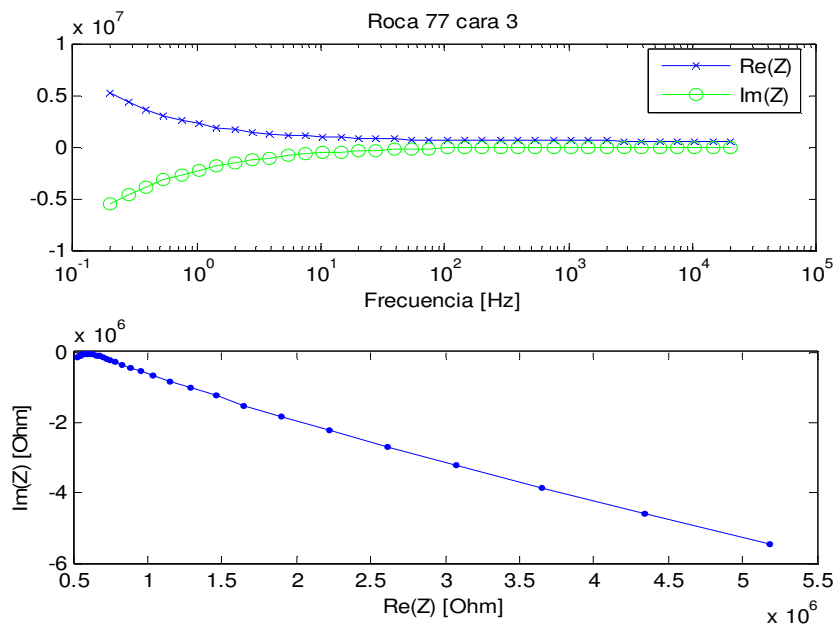
Fuente: Autores del proyecto

Figura 52. Resultados de la medición por la cara Lateral Izquierda, Cerámico BD10



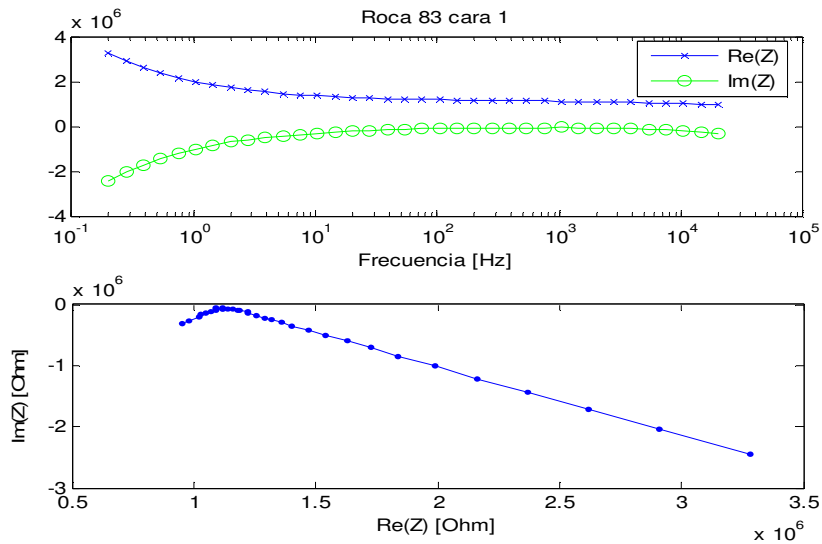
Fuente: Autores del proyecto

Figura 53. Resultados de la medición por la cara Frontal, Cerámico BD10



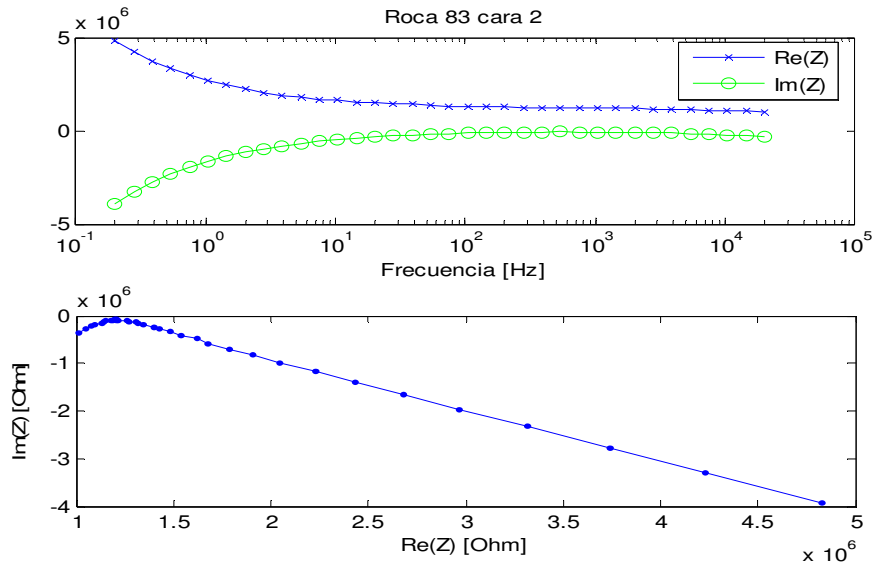
Fuente: Autores del proyecto

Figura 54. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BE9



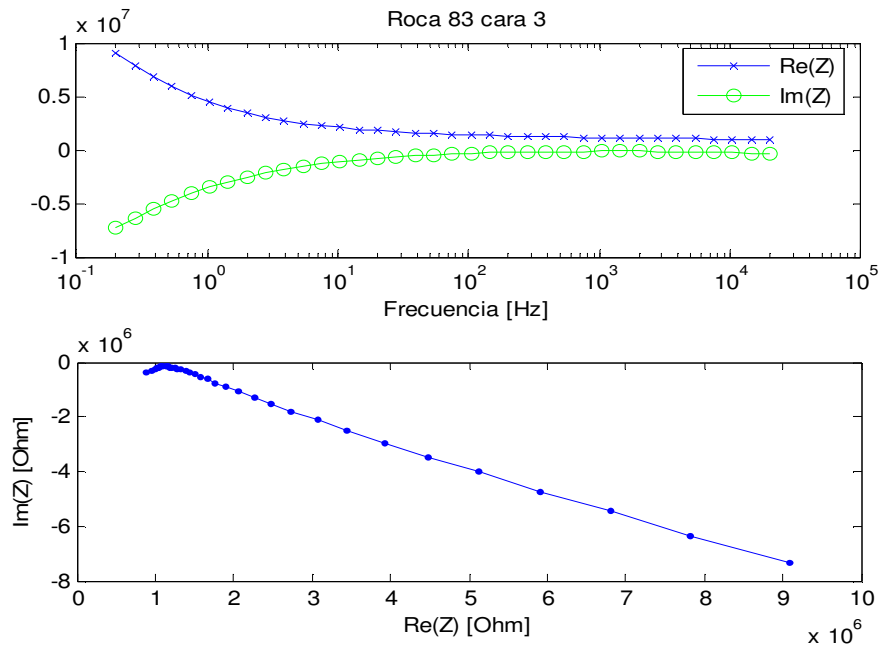
Fuente: Autores del proyecto

Figura 55. Resultados de la medición por la cara Lateral Izquierda, Cerámico BE9



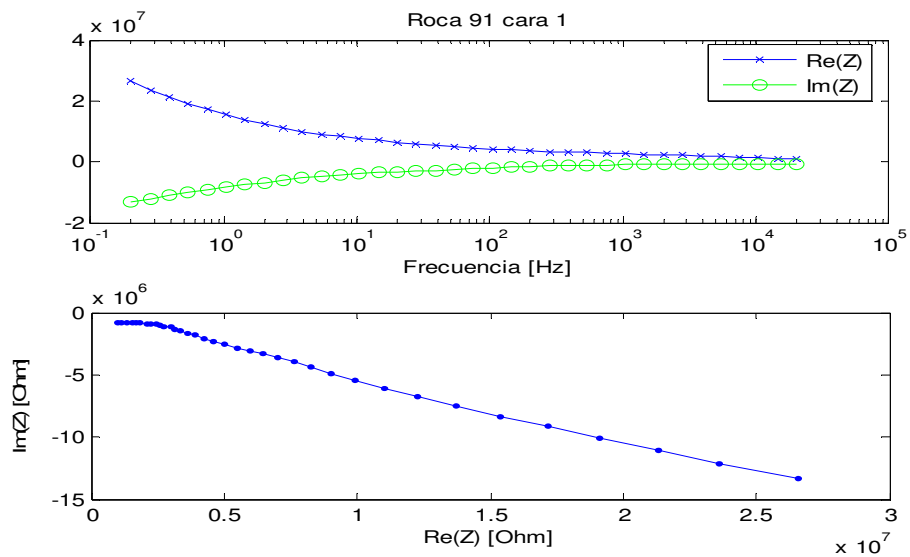
Fuente: Autores del proyecto

Figura 56. Resultados de la medición por la cara Frontal, Cerámico BE9



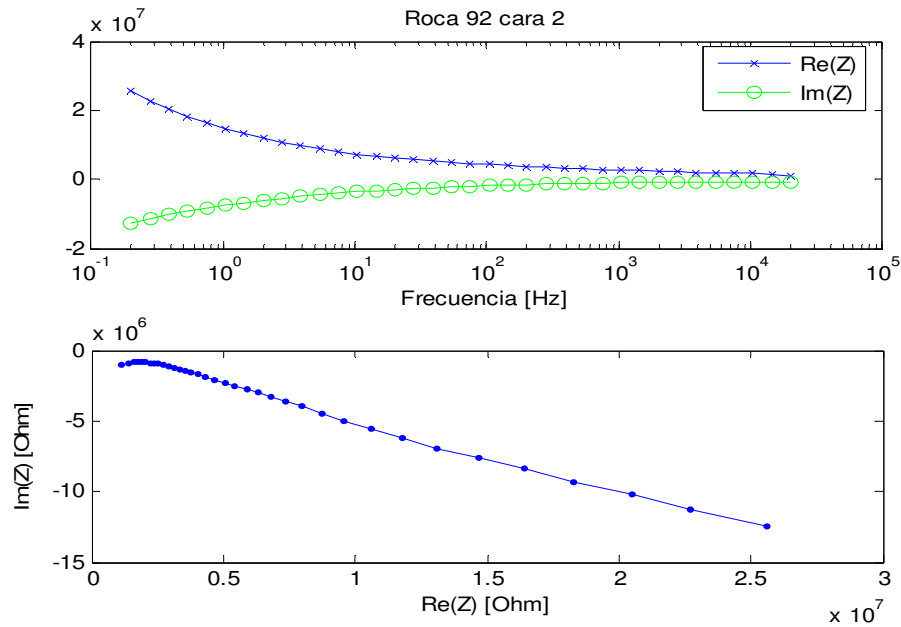
Fuente: Autores del proyecto

Figura 57. Resultados de la medición por la cara Superior, Cerámico BF3



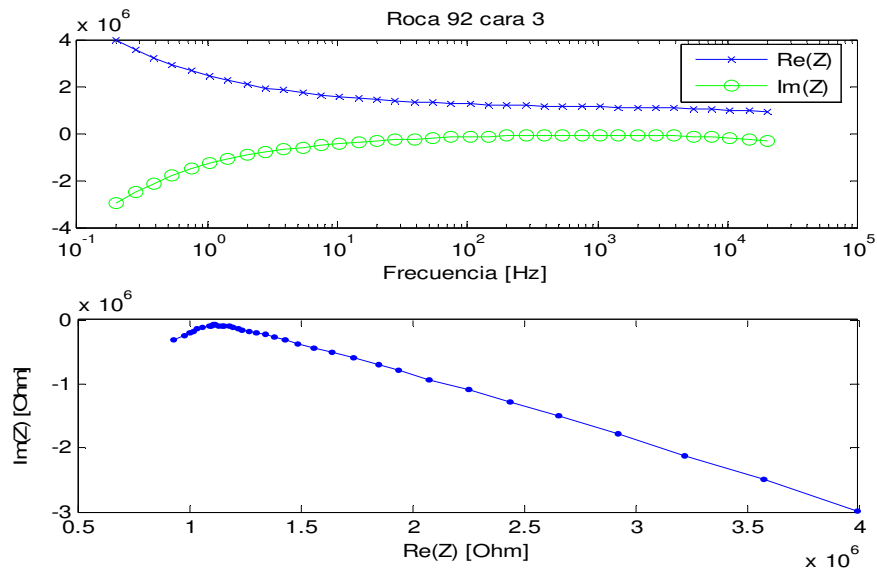
Fuente: Autores del proyecto

Figura 58. Resultados de la medición por la cara Lateral Izquierda, Cerámico BF4



Fuente: Autores del proyecto

Figura 59. Resultados de la medición por la cara Frontal, Cerámico BF3



Fuente: Autores del proyecto

4.2 ERROR DE IMPEDANCIA

El AD5933 presenta errores al realizar mediciones de impedancia eléctrica, en la siguiente tabla se muestra el comportamiento del AD5933 en algunos rangos de trabajo. Los porcentajes de error son proporcionados por el fabricante para algunos valores de impedancia.

Para cada rango mostrado se realiza la calibración del sistema con una impedancia específica de calibración, a los valores de frecuencia de 10, 35, 60, y 100 kHz con el fin de hacer los cálculos de error en la medición para otros valores de impedancia que estén dentro del rango.

Tabla 6. Rangos de medición y errores

RANGO 1	FRECUENCIA (Khz)	Z₁	ERROR Z₁%	Z₂	ERROR Z₂%
100Ω A 1kΩ Zcalib=100Ω RFB=100Ω	10	0.5kΩ	2.9	1kΩ	4.2
	35		2		3.5
	60		1.8		3.2
	100		1.7		2.8
RANGO 2	FRECUENCIA (Khz)	Z₁	ERROR Z₁%	Z₂	ERROR Z₂%
1k ΩA 10kΩ Zcalib=1kΩ RFB=1kΩ	10	5kΩ	0.9	10kΩ	1.15
	35		1.1		1.3
	60		1.3		1.2
	100		1.9		1.15

RANGO 3 10kΩ A 100kΩ Zcalib=10kΩ RFB=10kΩ	FRECUENCIA (Khz)	Z₁	ERROR Z₁%	Z₂	ERROR Z₂%
	10	50kΩ	0.12	100kΩ	0.8
	35		0.02		0.02
	60		-0.02		0.24
	100		0.08		-0.28
RANGO 4 100kΩ A 1MΩ Zcalib=100kΩ RFB=100kΩ	FRECUENCIA (Khz)	Z₁	ERROR Z₁%	Z₂	ERROR Z₂%
	10	500kΩ	0.1	1MΩ	-0.6
	35		-0.2		-0.4
	60		-0.4		-1.5
	100		-0.7		-3
RANGO 5 1MΩ A 2MΩ Zcalib=100kΩ RFB=100kΩ	FRECUENCIA (Khz)	Z₁	ERROR Z₁%	Z₂	ERROR Z₂%
	10	1.5MΩ	-0.1	2MΩ	0
	35		-0.2		-1.2
	60		-0.4		-3.2
	100		-1		-7.4
RANGO 6 9M Ω A 10MΩ Zcalib=9MΩ RFB=9MΩ	FRECUENCIA (Khz)	Z₁	ERROR Z₁%	Z₂	ERROR Z₂%
	10	9.5MΩ	-0.2	10MΩ	-0.5
	35		-2		-4.4
	60		-3		-7.2
	100		-3.8		-8.5

4.2.1 Calibración del sistema y pruebas del AD5933. Para realizar mediciones en el impedanciometro se debe calibrar el sistema, para esto es necesario calcular el factor de calibración y el valor de la fase interna del sistema, este se halla con los valores de fase que se obtienen con un resistor puro.

La calibración del sistema depende del rango de impedancia que se desea medir como de los valores de frecuencia que se utilicen en el barrido. Además la impedancia de realimentación (RFB), debe ser del mismo valor que la impedancia conectada entre los pines Vin y Vout, que es la impedancia de carga.

a. Calculo del factor de calibración.

El cálculo del factor de calibración representa un evento muy importante para obtener buenos resultados al momento de utilizar el dispositivo, para realizar el cálculo del factor de calibración se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- × Salida de excitación (V_{p-p}).
- × Impedancia de calibración. Impedancia de valor conocido conectada entre Vout y Vin para calibrar el sistema.
- × PGA. Ganancia programable del amplificador de corriente-tensión.
- × Resistor RFB. Resistencia de realimentación conectada entre el pin 4 (RFB) y pin 5 (Vin) del AD5933.
- × Frecuencia de calibración.
- × Rango de magnitud de la impedancia a medir.

Cualquier cambio que se haga en alguno de los anteriores parámetros, hace necesario recalcular el factor de calibración.

El factor de calibración se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$FC = \left(\frac{\text{Admi tan ce}}{M} \right) = \frac{\left(\frac{1}{\text{impedancia_de_calibracion}} \right)}{M} \quad (19)$$

Donde $M = \sqrt{R^2 + I^2}$

b. Cálculo de los polos internos del sistema.

Para realizar el cálculo de la fase de la impedancia, es necesario calcular los polos internos del sistema, esto se logra conectando entre V_{in} y V_{out} un resistor puro (debería presentar fase cero), los resultados que se obtengan corresponden a los polos internos del sistema.

Para calcular la fase real de la impedancia, se debe realizar la diferencia entre los polos del sistema y fase que se obtengan como resultado de la impedancia que se desea medir.

Una vez mencionados los pasos para calibrar el sistema, se presentan algunos de los resultados obtenidos al realizar pruebas de calibración en el AD5933.

El sistema se calibro con los siguientes parámetros:

- × Tensión de excitación = 2 Vp-p.
- × Impedancia de calibración = 1 K Ω .
- × PGA = x1.
- × Tensión de alimentación = 3.3V
- × RFB = 1 K Ω .

El barrido en frecuencia se configuro de la siguiente manera:

- × Inicio del barrido \rightarrow 1Khz.

- × Incrementos de \rightarrow 5Khz.
- × Numero de pasos \rightarrow 20.

Los datos de frecuencia y $M (M = \sqrt{R^2 + I^2})$ que se obtuvieron al realizar el barrido en frecuencia se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Datos del barrido en frecuencia

FRECUENCIA	M
1 Khz.	21168,7
6 Khz.	9009,73
11 Khz.	9053,67
16 Khz.	9126,38
21 Khz.	9227,2
26 Khz.	9108,38
31 Khz.	9024,67
36 Khz.	9115,72
41 Khz.	9083,11
46 Khz.	9086,8
51 Khz.	9126,75
56 Khz.	9054,12
61 Khz.	8951,47
66 Khz.	8921,93
71 Khz.	9087,03
76 Khz.	8922,02
81 Khz.	8951,61

FRECUENCIA	M
86 Khz.	8884,4
91 Khz.	8910,99
96 Khz.	8862,71
101 Khz.	8851,56

Con la ecuación (19) y los datos obtenidos se calculo el factor de calibración.

Se recomienda hallar el factor de calibración a una frecuencia cercana a las frecuencias de interés, en nuestro caso las frecuencias de interés van de 1Khz hasta 20Khz. Por lo tanto el factor de calibración se calculo a la frecuencia de 11 Khz.

$$\begin{aligned} \text{Factor de calibración (11Khz)} &= \frac{1}{\text{impedancia_de_calibracion}} = \frac{1}{M(11Khz)} = \frac{1}{9053,57 * 1000} \\ &= 1.1046062078e-7 \end{aligned}$$

Partiendo de la ecuación (17) se procede a realizar el cálculo de la magnitud de la impedancia para una resistencia de 7.5KΩ a una frecuencia de 11Khz con sus porcentajes de error de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Magnitud(11Khz)} &= FC(11Khz) \times \frac{1}{M(11Khz)} \\ \text{Magnitud(11Khz)} &= 1.1046062078e-7 \times \frac{1}{1215.8723} = 7446.23\Omega \end{aligned}$$

En la tabla presentada a continuación se muestran los valores de magnitud de impedancia para la resistencia de 7.5KΩ con sus porcentajes de error a otros valores de frecuencia.

Tabla 8. Magnitud de impedancia para una resistencia de 7.5K Ω y porcentajes de error.

Frecuencia	M	Magnitud Impedancia	%Error
1 Khz.	1382.5362	6548.59 Ω	12.68%
6 Khz.	1290.5362	7015.43 Ω	6.46%
11 Khz.	1215.8723	7446.23 Ω	0.71%
16 Khz.	1239.3805	7305.00 Ω	2.6%
21 Khz.	1239.3805	7305.00 Ω	2.6%

Los porcentajes de error obtenidos se pueden reducir si se calcula un factor de calibración para cada paso de barrido en frecuencia o si se realizan barridos de frecuencias en rangos pequeños, esto con el fin de obtener resultados más confiables al momento de utilizar el equipo.

En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos de medir la fase de un capacitor y sus respectivos porcentajes de error en cada valor de frecuencia del barrido.

Tabla 9. Medición de la fase de un capacitor y porcentajes de error

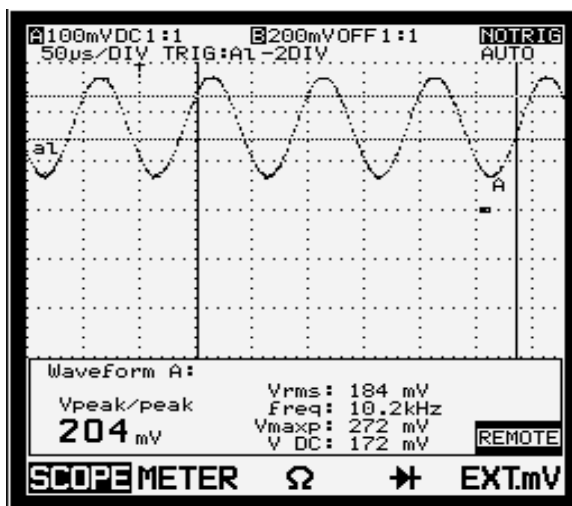
Frecuencia	Fase Capacitor	Polos internos del sistema(medidos con R= 1KΩ)	Diferencia (Fase real)	% error
1 Khz.				
6 Khz.	0	93,2045	93,205	3.33%
11 Khz.	0	96,7526	96,753	7.44%

Frecuencia	Fase Capacitor	Polos internos del sistema(medidos con R= 1KΩ)	Diferencia (Fase real)	% error
16 Khz.	0	99,4504	99,450	10%
21 Khz.	11,8411	103,206	91,365	1.1%
26 Khz.	18,6909	106,653	87,962	2.26%
31 Khz.	23,1981	109,701	86,509	4.44%
36 Khz.	26,3784	111,071	84,692	5.89%
41 Khz.	28,738	114,583	85,845	4.61%
46 Khz.	30,5561	118,361	87,805	2.44%
51 Khz.	34,4285	122,236	87,795	2.44%
56 Khz.	38,6343	124,658	86,024	4.44%
61 Khz.	44,3789	129,558	85,179	5.55%
66 Khz.	46,9462	132,002	85,056	5.55%
71 Khz.	51,5264	135,626	84,099	5.89%
76 Khz.	55,4377	139,173	83,735	7.77%
81 Khz.	59,798	146,484	86,686	4.44%
86 Khz.	62,6838	145,046	82,362	8.55%
91 Khz.	67,3263	150,274	82,948	8.31%
96 Khz.	70,3041	150,805	80,501	10.1%
101 Khz.	73,4621	154,328	80,866	10.14%

Los polos internos del sistema pueden ser calculados con cualquier valor de resistencia y no deberían cambiar significativamente, debido a que la respuesta no equivale a la resistencia, ya que esta no aporta a la fase y por lo tanto la respuesta se debe al sistema.

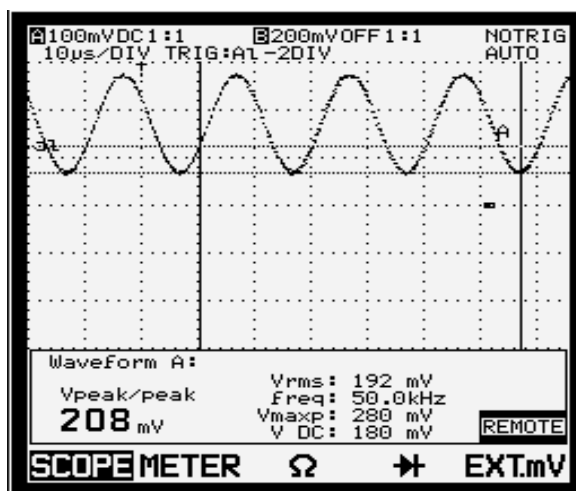
En las graficas 60, 61 y 62 se presentan salidas de excitación a diferentes valores frecuencias. Pertenecientes al barrido realizado para la calibración del sistema.

Figura 60. Tensión de excitación de salida a una frecuencia de 10 KHz.



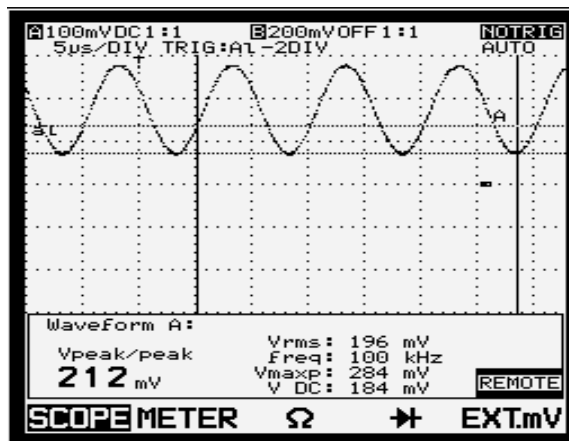
Fuente: Autores del Proyecto

Figura 61. Tensión de excitación de salida a una frecuencia de 50 KHz.



Fuente: Autores del Proyecto

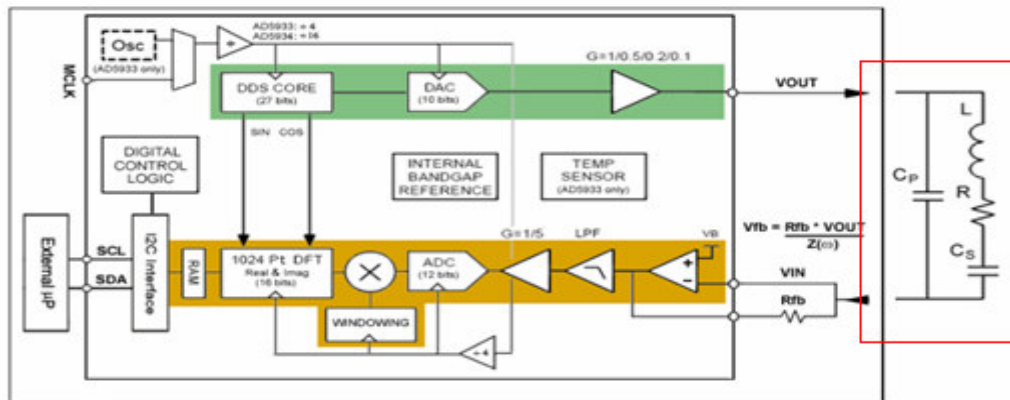
Figura 62. Tensión de excitación de salida a una frecuencia de 100k



Fuente: Autores del Proyecto

4.2.2 Simulaciones AD5933.

Figura 63. Conexión del circuito de carga al AD5933

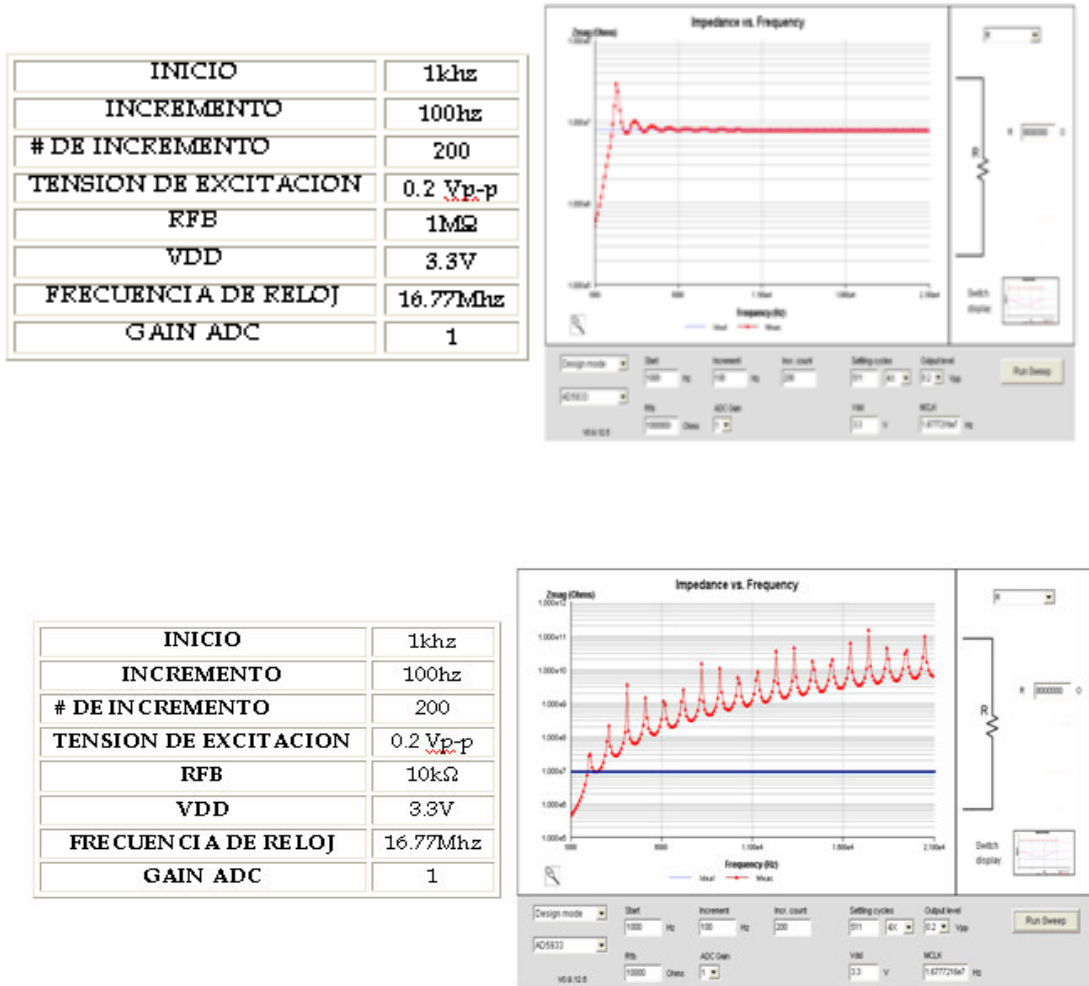


Fuente: Software de analog devices

Utilizando la herramienta de software que ofrece *analog devices* para simular el comportamiento del dispositivo AD5933, que permite variar parámetros como amplitud

de la señal de excitación, resistencia de realimentación entre otros, se realizaron algunas simulaciones. En las figuras la línea roja muestra la medida del AD5933 y la línea azul corresponde a la respuesta ideal.

Figura 64. Magnitud vs. Frecuencia. Variación de Impedancia realimentación



Fuente: Autores del Proyecto

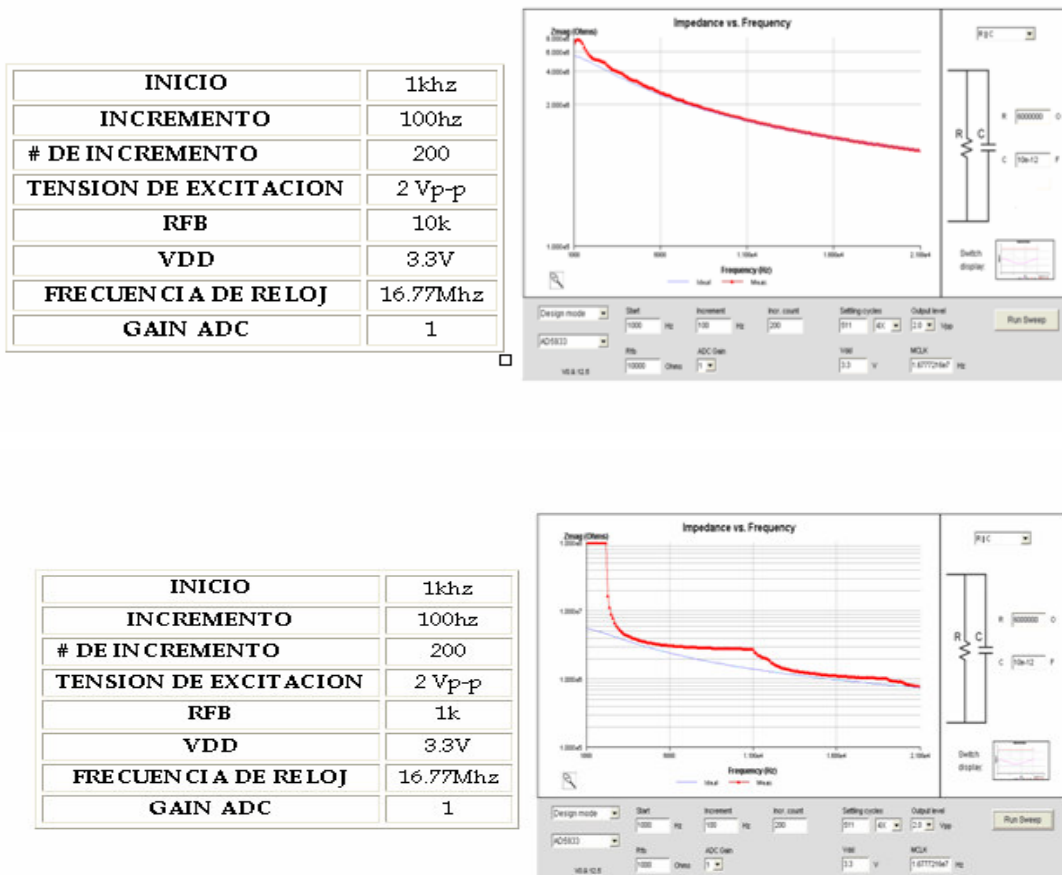
En las figuras se muestra conectada al dispositivo una resistencia de 8MΩ, todos los parámetros en ambas simulaciones permanecen iguales excepto la impedancia de realimentación, como se puede observar la respuesta del integrado, en la primera figura

presenta una respuesta casi perfecta, mientras que en la segunda el error es significativo y la respuesta empieza a oscilar debido a que la impedancia de calibración usada en el segundo caso no cubre el rango de medida de los MΩ. (Ver tabla 5 de rangos y errores)

A continuación se muestra un circuito RC paralelo como carga del dispositivo, donde $R=6M\Omega$ y $C=10pF$.

Los parámetros se mantienen iguales, solo se varía la impedancia de realimentación.

Figura 65. Magnitud vs. Frecuencia. Variación de Impedancia realimentación



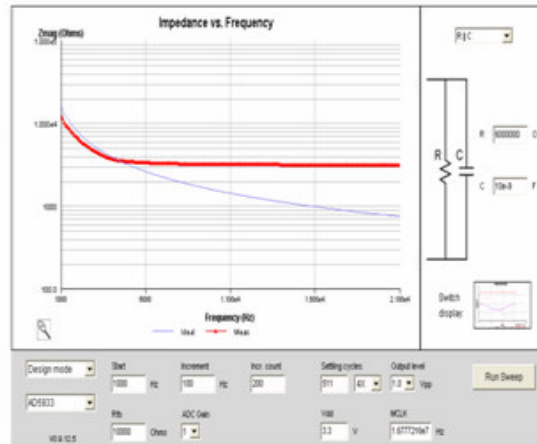
Fuente: Autores del Proyecto

En figura 65 se evidencia una mala selección de la impedancia de calibración que conlleva a errores graves en los resultados del AD5933.

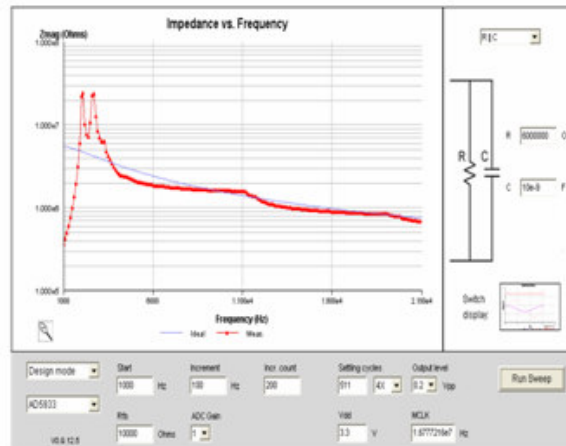
Otro parámetro de selección importante para minimizar errores en los resultados es el valor de la amplitud de la señal de excitación. Dependiendo del valor que se escoja para la amplitud de la señal de excitación, se obtendrán resultados con más o menos error.

Figura 66. Magnitud vs. Frecuencia. Variación de la amplitud de la señal de excitación.

INICIO	1khz
INCREMENTO	100hz
# DE INCREMENTO	200
TENSION DE EXCITACION	1 Vp-p
RFB	10k
VDD	3.3V
FRECUENCIA DE RELOJ	16.77Mhz
GAIN ADC	1



INICIO	1khz
INCREMENTO	100hz
# DE INCREMENTO	200
TENSION DE EXCITACION	0.2 Vp-p
RFB	10k
VDD	3.3V
FRECUENCIA DE RELOJ	16.77Mhz
GAIN ADC	1

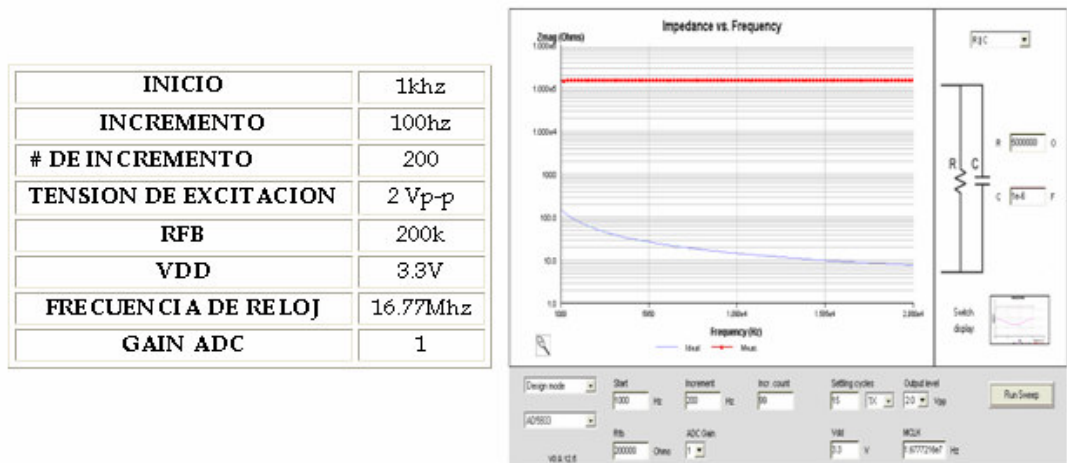


Fuente: Autores del Proyecto

En la primera figura el valor de excitación de es de 1Vp-p, y se observan errores mayores del 100% mientras, que en la segunda la señal de excitación es de 0.2Vp-p y la respuesta del sistema sigue la respuesta ideal.

Cuando no se escogen los parámetros adecuados para realizar la calibración del sistema, pueden encontrarse resultados bastante alejados del valor de la impedancia que se desea medir, como se observa en la figura 67.

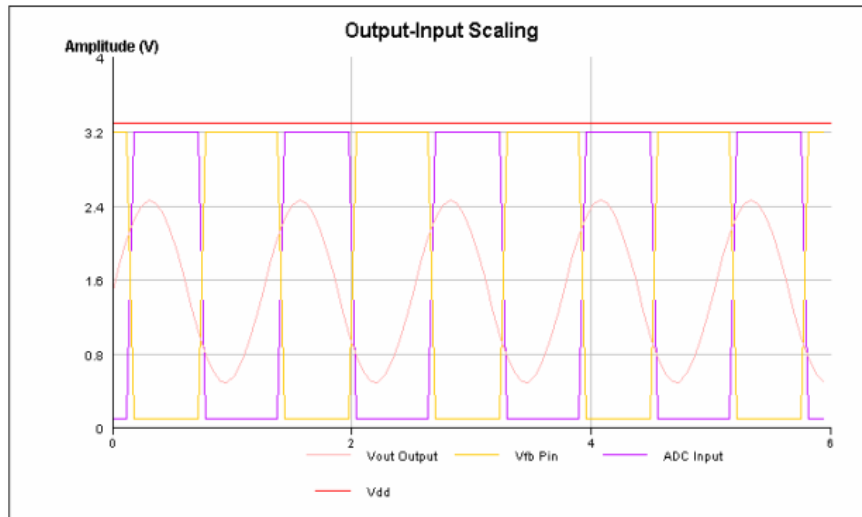
Figura 67. Magnitud vs. Frecuencia. Sistema mal calibrado



Fuente: Autores del Proyecto

En la figura 68 se muestra la saturación de las señales senoidales de entrada del conversor análogo digital y la señal de tensión de realimentación cuando el sistema se encuentra mal calibrado.

Figura 68. Tensiones de entrada y salida para un sistema mal calibrado



Fuente: Autores del Proyecto

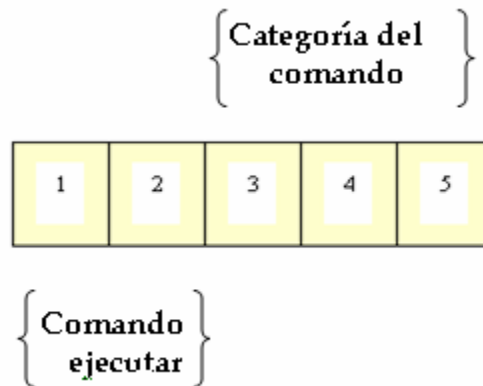
Cuando se habla de una mala calibración del sistema se está refiriendo a una mala selección de los parámetros involucrados en esta. En la figura anterior, los resultados obtenidos están fuera del rango para el cual se calibró el equipo lo que conlleva a una saturación del sistema.

4.3 PROTOCOLO DE COMUNICACIONES MIMP07-PC

Este protocolo de comunicación ofrece la posibilidad que cualquier persona, aun siendo ajena al proyecto pueda entender y manejar la comunicación del dispositivo (MIMP07) con un PC.

Antes de mostrar el protocolo de comunicación se definen los comandos, estos están conformados por 5 caracteres tipo ASCII de la siguiente manera:

Figura 69. Caracteres del nombre de un comando



Fuente: Autores del Proyecto

Las Categorías del comando se dividen en tres:

- × Comandos de configuración → CNF
- × Comandos de control → CNT
- × Comandos que determinan error → CER

Tabla 10. Descripción y nombre de los comandos del protocolo de comunicaciones.

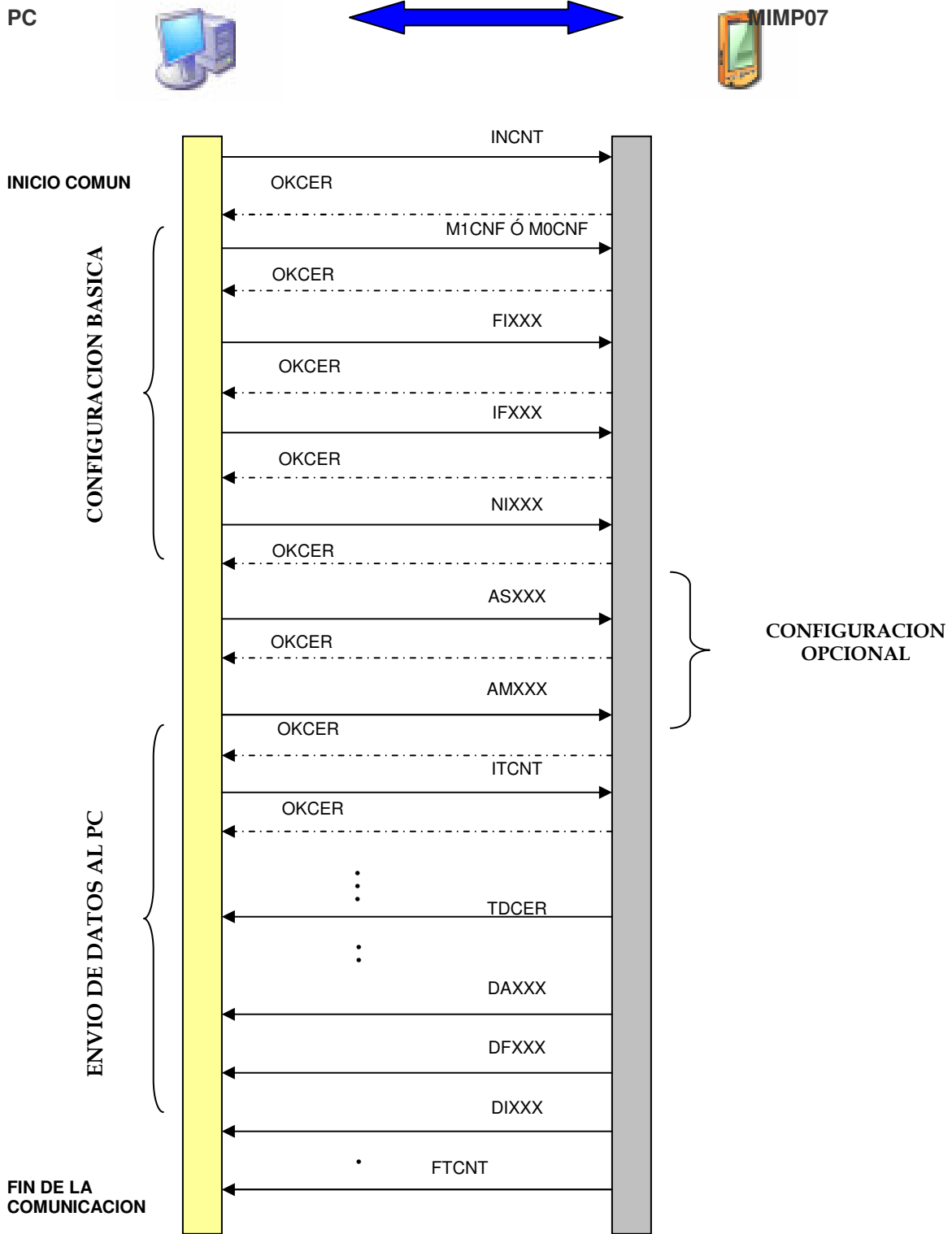
COMANDO	DESCRIPCION
AMXXX	Este comando configura el factor de amplificación de la señal que entra al conversor análogo – digital.
ASXXX	Este comando configura la amplitud de la señal de excitación.
DAXXX	Entrega el dato de la magnitud de la impedancia medida.
DFXXX	Entrega el dato de fase.
DIXXX	Muestra el incremento actual, la frecuencia inicial y el primer incremento.
ERXXX	Indica cuando ocurre algún error en el protocolo.

COMANDO	DESCRIPCION
FIXXX	Este comando configura el valor inicial del barrido en frecuencia.
FNCNT	Indica que la comunicación ha terminado.
FTCNT	Indica que la toma de datos ha finalizado.
IFXXX	Este comando configura el incremento en el barrido de frecuencia.
INCNT	Indica el inicio de la comunicación entre el PC y el MIMP07.
ITCNT	Se utiliza para da la orden del inicio de la toma de datos
M0CNF	Con este comando se configura el envió como un paquete de datos. Este es el modo de envió por defecto del dispositivo.
M1CNF	Con este comando se configura el envió de datos uno por uno.
NIXXX	Este comando configura el número de incrementos. Máximo de pasos 511.
OKCER	Indica que el dato ha sido recibido correctamente.
TDCER	Se activa cuando el dispositivo se encuentra realizando el proceso de toma de datos

Los comandos se seleccionaron de esta forma basada en el estándar empleado por los equipos de medición de instrumentación electrónica para laboratorios de Heelett Packard (H.P).

A continuación se presenta el diagrama en el que se explica el protocolo de comunicación PC-MIMP07.

Figura 70. Protocolo de comunicación PC- MIMP07



Fuente: Autores del Proyecto

La comunicación entre el PC y el MIMP07 inicia cuando el PC envía al MIMP07 el comando de inicio INCNT, el dispositivo responde con el comando OKCER reconociendo que el dato enviado ha sido recibido sin errores, después el PC envía M1CNF o M2CNF, comandos que permiten seleccionar el modo de envío de datos, ya sea dato a dato, o todos los datos en un sólo envío, el MIMP 07 nuevamente debe enviar OKCER si ha recibido la información de manera correcta.

EL PC procede a enviar todos los parámetros necesarios para configurar el sistema, frecuencia inicial FIXXX, Incremento de frecuencia IFXX y el número de incrementos NIXXX, el dispositivo envía nuevamente un OKCER cada vez que recibe uno de estos parámetros de configuración de lo contrario debe enviar ERXX indicando la existencia de un error al utilizar los comandos. Los comandos FIXXX, IFXX y NIXXX pueden ser enviados en cualquier orden, de no ser enviados el MIMP07 tomará los valores por defecto, frecuencia inicial 1 hz, incremento de frecuencia 1Khz y número de incrementos 20

También se puede configurar la amplitud de la señal de excitación, AMXX, y el factor de ampliación, ASXX, en cualquier orden. De no configura la amplitud de la señal de excitación y el valor de amplificación, el MIMP07 tomará los valores por defecto, amplitud de la señal de excitación 0.2 Vp-p y el factor de Amplitud 1. Cada vez que el MIMP07 recibe un comando responde con OKCER, lo cual indica que el comando ha sido recibido y ejecutado satisfactoriamente.

Una vez configurado el sistema el PC envía el comando de control ITCNT, encargado de dar inicio a la toma de datos, y el dispositivo debe enviar OKCER dando la confirmación que el proceso está siendo efectuado correctamente.

Después de proporcionar toda la información necesaria para tomar los datos el dispositivo envía al TDCER que confirma que esta realizando el barrido para las frecuencias programadas. MIMP07 envía uno a uno los datos medidos DAXXX,

amplitud, DFXXX, fase, y DIXXX, valor del incremento actual (si el modo seleccionado fue M1CNF, para el modo M0CNF los datos son enviados uno a uno después de finalizar todo el barrido de frecuencia). El momento en que el PC recibe toda la información de la toma de datos se finaliza la comunicación entre ellos cuando el MIMP07 envía el comando FTCNT, para más adelante repetir el proceso.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

× Se diseñó un sistema portátil capaz de medir la magnitud y fase de la impedancia eléctrica (y por lo tanto la parte real e imaginaria de la impedancia eléctrica). El dispositivo final está basado en el estándar USB, por lo tanto, no requiere de alimentación más que la suministrada por el puerto USB del PC. El equipo realiza un barrido en frecuencia desde 1Hz hasta 100kHz y mide impedancias entre 100Ω y $10M\Omega$. Para realizar el control del integrado AD5933 de *analog devices*, que es la base del medidor de impedancia MIMP07, y la transmisión de datos al PC, mediante el integrado FT232BM de *micro-chip*, se seleccionó el DSP56F801 de *motorola*, un dispositivo programable, de fácil manejo y bajo costo, además, se posee una amplia experiencia en el manejo del dispositivos en trabajos de grado previos.

La amplitud de la señales de excitación depende de la impedancia que se desea medir, en el caso de los sólidos porosos los resultados óptimos se obtienen en el rango 4 de 198mVp-p (Ver tabla 1), debido a que la impedancia es relativamente alta, y con valores más altos de excitación se satura el dispositivo. Hay que tener en cuenta que a esta señal de excitación el sólido poroso se comporta aproximadamente como un sistema lineal.

× El equipo diseñado presenta ventajas y desventajas:
Dentro de las ventajas se encuentra que el dispositivo realiza un barrido en frecuencia con un sólo CI el AD5933, éste se encarga de generar la señal de excitación, realizar la transformada discreta de fourier y retornar los datos necesarios para hacer el calculo de la magnitud y fase de la impedancia eléctrica, lo cual facilita el trabajo, y no hace

necesario implementar en el hardware fuentes de corriente, detección sincrónica, generadores de señales y otros componentes de un impedanciómetro.

Entre las desventajas del medidor de impedancia está que se debe tener información de antemano de la impedancia que se desea medir, una idea de la magnitud, para poder escoger la mejor calibración del sistema. Una posible solución a este problema es usar el software de simulación que ofrece *analog devices*, para tener una idea de la respuesta que se va obtener del sistema.

- × El barrido en frecuencia del sistema se configura básicamente con tres parámetros: Inicio del barrido, Incremento y Numero de incrementos el cual puede ser máximo de 511 pasos

- × Para relacionar los datos de impedancia eléctrica con la porosidad de materiales cerámicos se puede utilizar la ley de Archie la cual relaciona los parámetros anteriores mediante la expresión:

$$\sigma_{app} = \sigma_f a \phi^m$$

Según esta ley a bajas frecuencia se presenta un comportamiento lineal mientras que a altas frecuencias su comportamiento es disperso, por lo tanto, las medidas de espectro de impedancia eléctrica para frecuencias hasta 20khz son apropiadas para un estudio de porosidad basado en medidas eléctricas. El estudio de la porosidad y las propiedades mecánicas de estos materiales se realizará en una segunda fase del proyecto en la cual se utilizará el MIMP07 para realizar otras medidas, teniendo como punto de referencia los datos obtenidos en el medidor de impedancia Solartron

- × Es indispensable, antes de realizar cualquier medición, calibrar el sistema. De la correcta calibración del mismo dependen los resultados de las mediciones. Para este proceso se deben tener en cuenta los siguientes parámetros.

- × Salida de excitación (Vp-p).

- × Impedancia de calibración. Impedancia de valor conocido conectada entre V_{out} y V_{in} para calibrar el sistema.
- × PGA. Ganancia programable del amplificador de corriente-tensión.
- × Resistor RFB. Resistencia de realimentación conectada entre el pin 4 (RFB) y pin 5 (V_{in}) del AD5933.
- × Frecuencia de calibración.
- × Rango de magnitud de la impedancia a medir.

× Con el objeto de minimizar errores, se debe calcular el factor de calibración para cada punto del barrido de frecuencia

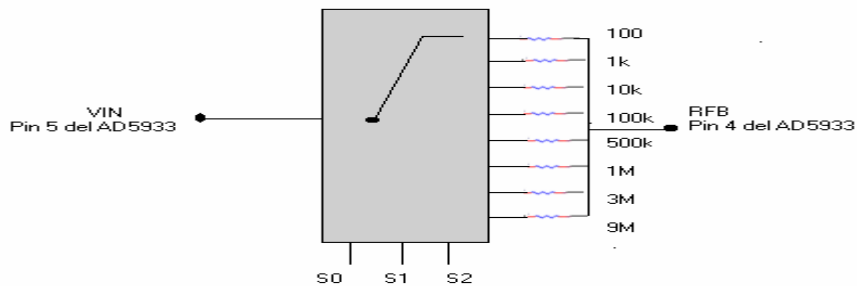
× El cálculo de la parte imaginaria del espectro de impedancia eléctrica utilizando los resultados de la tesis de maestría titulada: Detección precoz de cáncer de cuello uterino basada en espectro de impedancia eléctrica²⁵, no fue necesaria debido a que el dispositivo implementado permite medir la magnitud y fase de la impedancia, con lo cual se obtiene la parte real e imaginaria del espectro de impedancia eléctrica.

× Se realizaron medidas de Espectroscopia de impedancia eléctrica con el medidor de impedancia Solartron 1280B, de la Corporación para la investigación de la corrosión (Sede Guatiguara). Se obtuvo la parte real e imaginaria del espectro de impedancia eléctrica para frecuencia entre 0.2hz y 20khz. La toma de datos se realizó para 95 piezas, una toma para cada una de sus caras, la cara superior, la cara lateral izquierda y por último la cara la frontal. En aproximadamente quince minutos fue posible realizar las tres tomas de datos completas que corresponden a una sola pieza. Transcurridos estos quince minutos se repitió el proceso para las demás. Estas pruebas se realizaron del 6 de Octubre al 20 de Noviembre del 2006. Se hizo indispensable el uso de la jaula de faraday para disminuir el ruido en las mediciones.

²⁵ MIRANDA, Op Cit.

Es importante mencionar que en algunas piezas los datos obtenidos presentaron grandes errores, esto se presentó con mayor incidencia en las últimas piezas medidas, debido a que se deshidrataron en el transcurso de las mediciones. Se debe anotar que el valor de la magnitud de la impedancia aumento de los Mega Ω a los Giga Ω .

* Para una segunda fase del proyecto se puede implementar un seleccionador controlado por Software para escoger el valor de la impedancia de realimentación que produzca menos error al momento de medir una impedancia desconocida. Para eliminar la necesidad de estar cambiando la resistencia cuando se salga del rango.



6. BIBLIOGRAFIA

ANALOG DEVICES. AD5933/5934 DATASHEET. IMPEDANCE CONVERTER, NETWORK ANALYZER, 2005

ÁLVAREZ SANTOS, Ramiro. Tecnología de Circuitos Impresos: Compatibilidad Electromagnética (CEM) en el Diseño de las PCB Y PCA. 2002.

BENAVANTE GARCIA, David, Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos, 2002, 291 h, Tesis de doctorado, Universidad de Alicante, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias de la tierra y Medio Ambiente.

CUBIDES, Yorlen Astrid y MIELES, Fidel Enrique. Diseño de una fuente de corriente senoidal y de pulsos bifásicos para medición de espectro de impedancia eléctrica en tejido humano. Bucaramanga, 2006, 123 p. Trabajo de Pregrado para título de Ingenieros Electrónicos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

ESTUPIÑAN DURAN, Hugo, Preparación y evaluación de materiales porosos a base de titanio para aplicaciones de ingeniería biomédica, Bucaramanga, 2005, 133 h. Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Química, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

FTDI CHIP, FT232BM DATA SHEET, USB UART (USB - Serial) I.C.,2005

GONZALEZ, Liliana y PONCE, Nilson Enrique. Materiales Cerámicos en Ingeniería. Bucaramanga, 2000, Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Mecánicas

JC, Anderson, Jm, Alexander, Ciencia de los materiales, Procesos de post-conformado, 2 edición, México DF, 1998, Noriega Editoriales, 1998, 359-362p.

MIRANDA, David. Detección Precoz de Cáncer de Cuello Uterino Basada en Espectro de Impedancia Eléctrica. Bucaramanga, 2005. Trabajo de Maestría (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Bioingeniería.

MONTROSE, Mark I. Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance. Second Edition. IEEE 2000, Inc., New York.

MOTOROLA, 56F801 EVALUATION MODULE HARDWARE USER'S MANUAL, 2003

MOTOROLA, 56F801 DATA SHEET, HYBRID CONTROLLER, 2004

RYDER, E. A. Temperature measurement in engineering. Junctions and Sílices. Stamford, CT Omega Press, a division of Omega engineering, INC. 1975, 180 p, Volumen 1.

ROBLES, Leonor y **CHÁVEZ,** Felipe. Medición de Impedancia Eléctrica en Tejido Cervico Uterino In-Vitro. Bucaramanga, 2005. Trabajo de Grado (Ingeniería electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Bioingeniería.

SANCHEZ, Marcos Jorge. Sistema de medida de la resistividad eléctrica a altas temperaturas y su aplicación a los compuestos $U_{1-x}La_xPt.$, Santander, 2001. Trabajo de grado título licenciado en Ciencias Físicas. Universidad de Cantabria. Departamento de ciencias de la tierra y física de la materia.

SEDRA, Adel y **SMITH,** Kenneth. Circuitos Microelectrónicos. 4 Ed. Oxford University Press, 1999.

WILLEY, Jhon y **SONS.** Impedance Spectroscopy Theory, Experiment and Application. Second Edition. Hoboken, New Jersey Wiley-Interscience, 1995, 606 p.

<http://www.monografias.com> , última visita: 01-02-07

<http://www.madrimasd.org/materiales/Asesorias/default.aspx> , última visita: 01-02-07

<http://www.anatomohistologia.uns.edu.ar/plantilla.asp?zona=modnicero> , última visita: 01-02-07

http://www.analog.com/Analog_Root/static/techsupport/designtools/interactivetools/ad593x/ad593x.html, ultima visita 04-02-07

ANEXO A. PROGRAMAS DE CODEWARRIOR MIMP07

A1. DEFINICIÓN DE VARIABLES GLOBALES

// Variables de configuración, control y Datos//

```
extern unsigned int cnf_ganancia = 1; // Por defecto 1V/V
extern unsigned int cnf_amp = 2; // Por defecto 2Vpp
extern unsigned int cnf_fini_1 = 0x00; // Por defecto 1kHz
extern unsigned int cnf_fini_2 = 0x00;
extern unsigned int cnf_fini_3 = 0x00;
extern unsigned int cnf_ifrec_1 = 0x00; // Por defecto 1kHz
extern unsigned int cnf_ifrec_2 = 0x00;
extern unsigned int cnf_ifrec_3 = 0x00;
extern unsigned int cnf_ninc_1 = 0x14; // 20 pasos por defecto
extern unsigned int cnf_ninc_2 = 0x00;
extern bool cnf_mode = TRUE; // Modo de operación 1
```

A2. CONSTANTES DE LA RAM

```
#define slave1 0x80 // direccion de control
#define slave2 0x81
#define slave3 0x82 // direccion de start frequency
#define slave4 0x83
#define slave5 0x84
#define slave6 0x85 // direccion de frequency increment
#define slave7 0x86
#define slave8 0x87
#define slave9 0x88 // direccion de numero de incrementos
#define slave10 0x89
#define real1 0x94 //direccion MSB real
#define real2 0x95 //direccion LSB real
#define imagi1 0x96 //direccion MSB imaginario
#define imagi2 0x97 //direccion LSB imaginario
#define ciclo 0x8B //direccion
#define multi 0x8A
#define TOLER 0.0001
#define begin {
#define end }
```

A3. FUNCIONES PARA TRANSFERENCIA DSP-AD5933 //Protocolo.h//

```
void CNF_Mclk(void); //reloj
void CNT_Standby(void); //modo stanby
void CNF_NOsc(void); //ciclos
void CNF_FIni(byte, byte, byte ); // inicio de frecuencia
void CNF_IFrec(byte, byte, byte ); // incremento
void CNF_NInc(byte, byte); // numero de incrementos
void CNT_Inicio(void); // modo inicio
void DAT_TData(void); // toma de datos
void delay_us(int time);
void delay_ms(int time);
long double pot(float val,char x);
long double atan(float x);
float sqrt(float x);
void CNF_Reset(void);
float sin(float x);
long double fac(char x);
```

```
// FUNCIONES DEL PROTOCOLO //
unsigned int char2hex(char, char);
```

A4. PROGRAMACION DEL AD5933

```
#include "EI2C1.h"
#include "AS1.h"
#include "Protocolo.h"
#include "ConstantesRam.h"
```

```
// FUNCIONES DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN //
unsigned int char2hex(char MSB, char LSB)
```

```
{
    unsigned int Hexadecimal;
    int LSB_ = (unsigned int)LSB - 48;
    int MSB_ = (unsigned int)MSB - 48;
    if (LSB_ < 0)
        LSB_ = 0;
    else
    {
        if (LSB_ > 9)
        {
            LSB_ -= 17;
            if (LSB_ >= 0)

```

```

        if (LSB_ <= 5)
            LSB_ += 10;
        else
            LSB_ = 0;
    else
        LSB_ = 0;
}

}

if (MSB_ < 0)
    MSB_ = 0;
else
{
    if (MSB_ > 9)
    {
        MSB_ -= 17;
        if (MSB_ >= 0)
            if (MSB_ <= 5)
                MSB_ += 10;
            else
                MSB_ = 0;
        else
            MSB_ = 0;
    }

}
Hexadecimal = 16*MSB_;
Hexadecimal += LSB_;
return(Hexadecimal);
}

// FUNCIONES PARA LA PROGRAMACION DEL AD5933 //

void CNF_Reset(void) //RESET
{
    EI2C1_SelectSlave(slave2);//RESET
    EI2C1_SendChar(0x10);
}

//-----//

void CNF_FIni(byte cnt_D2, byte cnt_D1, byte cnt_D0) //start frequency

```

```

{
    EI2C1_SelectSlave(slave3);//82
    EI2C1_SendChar(cnt_D2); //00

    EI2C1_SelectSlave(slave4);//83
    EI2C1_SendChar(cnt_D1); //7D

    EI2C1_SelectSlave(slave5);//84
    EI2C1_SendChar(cnt_D0); //02
}

//-----//
void CNF_IFrec(byte cnt_D2, byte cnt_D1, byte cnt_D0) //incremento
{
    EI2C1_SelectSlave(slave6); //MSB //85
    EI2C1_SendChar(cnt_D2); //02

    EI2C1_SelectSlave(slave7); //86
    EI2C1_SendChar(cnt_D1); //71

    EI2C1_SelectSlave(slave8); //LSB //87
    EI2C1_SendChar(cnt_D0); //0b
}

//-----//
void CNF_NInc(byte cnt_D1, byte cnt_D0) //cantidad de pasos
{
    EI2C1_SelectSlave(slave9); //88
    EI2C1_SendChar(cnt_D1);

    EI2C1_SelectSlave(slave10); //89
    EI2C1_SendChar(cnt_D0); //0A
}

//-----//

void CNF_Mclk(void) // RELOJ
{
    EI2C1_SelectSlave(slave2); //81
    EI2C1_SendChar(0x00);
}

```

```
//-----//
void CNF_NOsc(void) //NUMERO DE CICLOS
{
    EI2C1_SelectSlave(multi); //8A
    EI2C1_SendChar(0x00);

    EI2C1_SelectSlave(ciclo); //8B
    EI2C1_SendChar(0x96);
}

```

```
//-----//
void CNT_Standby(void) // MODO STANBY
{
    EI2C1_SelectSlave(slave1); //80
    EI2C1_SendChar(0xB3); //b3 //b1
}

```

```
//-----//
void CNT_Inicio(void)
{
    // if(a==1)
    // {

    EI2C1_SelectSlave(slave1); //80
    EI2C1_SendChar(0x13); //13 //11

    delay_ms(2);

    EI2C1_SelectSlave(slave1); //80
    EI2C1_SendChar(0x23); //23 //21
}

```

```
//-----//
```

```
void DAT_TDato(void) //FUNCION PARA CORREGIR Y REGISTRAR LOS DATOS
DEL ASIC
{

```

```
}
```

```
//-----//  
/*          CAMBIAR POR UN TIMER          */  
//-----//
```

```
void delay_us(int time) //DELAY DE MICROSEGUNDOS
```

```
{  
    int i;  
  
    for(i=1;i<=time;i++)  
        asm  
        {  
            nop;  
            nop;  
            nop;  
            nop;  
            nop;  
            nop;  
            nop;  
            nop;  
            nop;  
            nop;  
        };  
}
```

```
void delay_ms(int time) //DELAY DE MILISEGUNDOS
```

```
{  
    int i;  
    for(i=1;i<=time;i++)  
    {  
        delay_us(500);  
        delay_us(500);  
    }  
}
```

