

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN IMPEDANCIOMETRO PARA MEDICIÓN
DEL ESPECTRO DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA**

Autores:

**VITERBO BARRERA BARROSO
JOHN EDUARDO CANOVA ARDILA**

TRABAJO DE GRADO



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

2008

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN IMPEDANCIOMETRO PARA MEDICIÓN
DEL ESPECTRO DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA**

Autores:

**VITERBO BARRERA BARROSO
JOHN EDUARDO CANOVA ARDILA**

TRABAJO DE GRADO

Director:

Ing. & Físico DAVID ALEJANDRO MIRANDA MERCADO, MSc

Codirector:

Ing. SAMUEL ALBERTO JAIMES MORALES



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

2008

Hoy culmina una de las etapas más felices de mi vida, llena de momentos inolvidables y de excelentes personas que por su cariño, comprensión y colaboración, hicieron posible este gran logro.

*Un logro que dedico a DIOS por ser mi fuente de esperanza y sabiduría
A mi padre VITERBO que desde el cielo me acompaña todos los días de mi vida
A mi madre CARMEN por enseñarme el valor de la vida
A mi hermana Luz Dary por su valentía y apoyo incondicional
A mis otros hermanos, Cesar, Carolina, Joaquín y Pamela, por su cariño
A mi tía Herminda por su apoyo incondicional momentos difíciles de mi vida
A Rosmary Rivera, Pablo Buitrago y sus hijas, por su cariño, apoyo y comprensión en
estos últimos años
A mi compañero de proyecto John por su humildad, comprensión y sabiduría
A José Amaya por su maestría para formar profesionales con sentido humano
A mi familia, amigos y a todas aquellas personas que fueron partícipe de este gran logro,
Muy sinceramente Gracias.*

VITERBO BARRERA

Muchas veces en la vida se llega a pensar que los triunfos son propios, sin calcular la cantidad de seres que directa e indirectamente aportaron en la consecución de este. Creo que este error lo voy a cometer, porque sinceramente fueron tantas las personas que tuvieron que ver en que esta grata etapa de mi vida llegue al final y en que este libro hoy sea una realidad, que me tocaría escribir otro para nombrarlas a todas. En primera instancia le agradezco a DIOS por Él ha emparejado todo. Él en su infinita grandeza ha hecho posible lo que para mí, en mi condición humana, parecía imposible. Todo el Honor y la honra sean para ti. Gracias a mi madre por su palabra de aliento y llamado a la paciencia, en los momentos de efervescencia. Papá te agradezco sumamente por el ejemplo de liderazgo, de tenacidad... sencillamente por ser el visionario incansable. Mil gracias a Yolima por ser la palabra de aliento en los momentos donde todo parecía nada. Agradezco a Viterbo con quien desde el año 2002, cuando empezamos a construir esta realidad juntos, a dado muestras de ser un gran amigo y un gran colega. Finalmente, y volviendo a la salvedad citada en el primer párrafo, agradezco a todos y cada uno de mis amigos porque estoy seguro que ellos también jugaron un papel fundamental en este triunfo que se refleja en este documento. Mil gracias.

JOHNC.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos:

A nuestro director David Alejandro Miranda Mercado por su confianza y colaboración en cada una de las etapas del proyecto y por su compromiso desinteresado por la ciencia y la humanidad, para formar profesionales comprometidos con la vida.

A nuestro codirector Samuel Alberto Jaimes Morales por brindarnos en todo momento su amistad y conocimiento para sacar adelante el proyecto.

Al grupo de investigación CIMBIOS por patrocinar nuestra investigación y a sus miembros por su calidad humana para crear un ambiente de trabajo agradable.

A nuestros padres, familiares y amigos por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles de nuestro proyecto.

A nuestra escuela E3T y a la escuela de Física por brindarnos las bases conceptuales y a todas aquellas personas que en cierta forma contribuyeron al desarrollo de este proyecto.

INTRODUCCIÓN.....	8
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	18
1.1 MÉTODOS PARA MEDIR IMPEDANCIA ELÉCTRICA.....	18
1.1.1 Método de dos electrodos (2EM).....	18
1.1.2 Método de 3 electrodos (3EM)	19
1.1.3 Método de cuatro electrodos (4EM)	20
1.1.4 Modo Potenciostato	21
1.1.5 Modo Galvanostato	21
1.2 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA	22
1.3 APLICACIONES DE LA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA.....	23
1.3.1 Caracterización de tejido humano	23
1.3.2 Caracterización de medios porosos	25
1.3.3 Otras aplicaciones	26
1.4 NUESTRO PROYECTO	27
2. IMPEDANCIÓMETRO MIMP07.....	28
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MIMP07	28
2.2 MEJORAS REQUERIDAS	30
3. DISEÑO DE HARDWARE	33
3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	33
3.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES	35
3.3 TOPOLOGÍAS DEL MIMP08.....	46
3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONMUTACIÓN	52
3.4.1 Comportamiento del AD5933	53
3.4.2 Calibración del AD5933.....	55
3.4.3 Implementación del sistema de conmutación	61
3.5 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO	64
4. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN.....	67
4.1 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN I2C.....	67

4.1.1	Descripción general del Protocolo I2C	67
4.1.2	Implementación del protocolo de comunicación I2C en el MC56F8323 .	69
4.1.3	Control del AD5933	71
4.2	PROTOCOLO “SPECTRUM”: COMUNICACIÓN MIMP08 – PC	74
4.3	PRUEBAS Y DISCUSIÓN	81
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	85
5.1	PRUEBAS PRELIMINARES CON EL MIMP07.....	85
5.2	PRUEBAS CON EL MIMP08.....	89
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
6.	CONCLUSIONES	93
7.	RECOMENDACIONES.....	96
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	97
ANEXO A.	CÓDIGOS.....	99
ANEXO B.	MANUAL DE USUARIO.....	108

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Configuración del método de dos electrodos.....	19
Figura 2. Configuración del método de tres electrodos.....	20
Figura 3. Configuración del método de tres electrodos.....	21
Figura 4. Zonas de dispersión sobre del espectro de impedancia eléctrica.....	24
Figura 5. Caracteres del nombre de un comando.....	29
Figura 6. Diagrama de Bloques del MIMP08.....	33
Figura 7. Empaquetado MC56F8323.....	37
Figura 8. Empaquetado AD5933.....	39
Figura 9. Diagrama de Bloques AD5933.....	40
Figura 10. Empaquetado del ADG1408.....	44
Figura 11. Empaquetado del FT232.....	45
Figura 12. Empaquetado del ADM660.....	46
Figura 13. Conexión entre el AD5933 y el MC56F8323.....	47
Figura 14. Conexión para el funcionamiento del ADG1408.....	48
Figura 15. Conexión del FT232.....	49
Figura 16. Primera Configuración de Etapa de Alimentación.....	50
Figura 17. Etapa de alimentación Final.....	52
Figura 18. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 1M Ω y resistencia de calibración R de 100k Ω	54
Figura 19. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 100k Ω y resistencia de calibración R de 1M Ω	55
Figura 20. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 100 Ω y resistencia de calibración R de 100 Ω	56
Figura 21. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 750 Ω y resistencia de calibración R de 750 Ω	57

Con formato: Fuente:
(Predeterminado) Arial, 12 pt,
Sin Negrita

Figura 22. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 1kΩ y resistencia de calibración R de 1kΩ.....	57
Figura 23. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 2kΩ y resistencia de calibración R de 2kΩ.....	58
Figura 24. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 4kΩ y resistencia de calibración R de 4kΩ.....	59
Figura 25. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 10kΩ y resistencia de calibración R de 10kΩ.....	59
Figura 26. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 100kΩ y resistencia de calibración R de 100kΩ.....	60
Figura 27. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 1MΩ y resistencia de calibración R de 1MΩ.....	60
Figura 28. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 1MΩ, resistencia de 10MΩ y capacitancia de 100pF.....	62
Figura 29. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 100kΩ, resistencia de 10MΩ y capacitancia de 100pF.....	63
Figura 30. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 10kΩ, resistencia de 10MΩ y capacitancia de 100pF.....	64
Figura 31 Capa TOP de la Tarjeta Impresa del MIMP08.....	66
Figura 32 Capa TOP de la Tarjeta Impresa del MIMP08.....	66
Figura 33. Diagrama de tiempos del protocolo I2C.....	69
Figura 34. Bean SW_I2C.....	70
Figura 45. Diagrama de flujo para realizar el barrido de frecuencia.....	73
Figura 36. Bean AsynchroSerial.....	75
Figura 37. Estructura de comandos del protocolo SPECTRUM	76
Figura 38. Protocolo SPECTRUM: comunicación MIMP08-PC.....	80
Figura 39. Transmisión de datos a través de la línea SDA del protocolo I2C.....	82

Figura 40. Señales que representa el Código de la Frecuencia Inicial y la dirección de registro correspondiente (ver sesión 3.2). Canal 1: línea SCL; Canal 2: línea SDA.....	83
Figura 41. Señales que representan el Código del Incremento de Frecuencia y la dirección de registro correspondiente (ver sesión 3.2). Canal 1: línea SCL; Canal 2: línea SDA.....	83
Figura 42. Señales que representan el Código del Número de Incrementos y la dirección de registro correspondiente (ver sesión 3.2). Canal 1: línea SCL; Canal 2: línea SDA.....	83
Figura 43. Señales de excitación de 2Vpp generadas por el AD5933.....	84
Figura 44. Modelo equivalente para una resistencia de hilo bobinado.....	86
Figura 45. Prueba con RFB = 1MΩ.....	87
Figura 46. Prueba con RFB = 500kΩ.....	88
Figura 47. Prueba con RFB = 100kΩ. (75).....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de excitación del AD5933.....	39
Tabla 2. Mapa de registros del AD5933.....	42
Tabla 3. Mapa del Registro de Control del AD5933.....	61
Tabla 4. Rangos de medición de impedancia para el nivel de 2Vpp.....	65
Tabla 5. Medidas consideradas para diseño de tarjeta Impresa.....	78
Tabla 6. Descripción y nombre de los comandos del protocolo SPRECTUM.....	81
Tabla 7. Parámetros programados para probar los protocolos de comunicación.....	89
Tabla 8. Valores obtenidos al medir R=6kΩ y C= 0F.....	91
Tabla 9. Valores obtenidos al medir R=10kΩ y C= 100pF.....	91

RESUMEN

TITULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN IMPEDANCIOMETRO PARA MEDICIÓN DEL ESPECTRO DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA.^{*}

AUTORES: BARRERA BARROSO, Viterbo y CANOVA ARDILA, John Eduardo.^{**}

Palabras claves: Espectro de Impedancia eléctrica, Conversor de Impedancia, Procesador digital de señales, Sistemas de comunicación, Sistema de conmutación.

En este documento se encuentra el diseño e implementación de un equipo que mide el espectro de impedancia eléctrica basado en el método de dos electrodos. Este equipo permite realizar barridos de frecuencia desde 1kHz hasta 100kHz y medir la magnitud de la impedancia desde 100Ω hasta 10MΩ.

Este equipo está conformado por varias etapas, cada una de ellas con un propósito específico dentro del sistema de medición. Estas etapas son: DSP, sistema de comunicación serial, sistema de comunicación I2C, conversor de impedancia, sistema de conmutación y etapa de alimentación.

El DSP MC56F8323 del fabricante Motorola permite controlar el conversor de impedancia, el sistema de conmutación y la comunicación serial con el PC. El conversor de Impedancia AD5933 es un circuito integrado del fabricante Analog Devices, el cual inyecta señales de tensión de frecuencia variable y mide corriente para calcular la impedancia mediante un modulo de procesamiento interno. La impedancia medida luego es enviada al DSP por medio de una interfaz I2C. El sistema de conmutación permite ajustar la escala de medición del AD5933 para que los datos de impedancia medidos por el equipo sean los adecuados. En esta etapa se usó el multiplexor de 8 canales ADG1408 del fabricante Analog Devices. Para la comunicación serial por medio del puerto USB, se usó el FT232RL del fabricante Future Technology Devices Internacional. Este dispositivo, además de permitir la comunicación con el PC, se utiliza para regular la tensión entregada por el puerto USB. La etapa de alimentación está diseñada para alimentar el DSP con baterías AAA recargables, para así aumentar la versatilidad y portabilidad del equipo.

^{*} Proyecto de grado.

^{**} Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: MSc. David Alejandro Miranda Mercado. Codirector: Ing. Samuel Alberto Jaimes Morales.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN IMPEDANCE METER FOR MEASUREMENT OF THE ELECTRIC IMPEDANCE SPECTRUM

AUTHORS: BARRERA BARROSO, Viterbo y CANOVA ARDILA, John Eduardo.

Key Words: Electric Impedance Spectrum, Impedance Converter, Digital Signal Processor, Communication Systems, Commutation System.

In this document it can be found the design and implementation of a device that measures the electric impedance spectrum based on the two electrodes method. This device allows performing frequency sweeps from 1kHz to 100kHz and also allows measuring the impedance magnitude from 100Ω to 10MΩ.

This device is formed by various stages, each one with a specific purpose in the measurement system. These stages are: DSP, serial communication system, I2C communication system, impedance converter, commutation system and supplying stage.

The DSP MC56F8323, produced by Motorola, allows controlling the impedance converter, the commutation system and the serial communication with the PC. The impedance converter AD5933 is an integrated circuit, produced by Analog Devices, which applies tension signals of variable frequency and measures current in order to calculate the impedance with an internal processing module. Then, the already measured impedance is sent to the DSP through an I2C interface. The commutation system allows adjusting the AD5933 measurement scale in order that the data measured by the device are the more suitable. In this stage it was used an eight channel multiplexer ADG1408 produced by Analog Devices. For the serial communication through USB port, it was used the FT232RL produced by Future Technology Device International. This device, not only allows the communication with the PC, but also is used to regulate the tension given by the USB port. The supplying stage is designed to supply the DSP with AAA rechargeable batteries in order to increase the device versatility and portability.

* Degree Project.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: MSc. David Alejandro Miranda Mercado. Codirector: Ing. Samuel Alberto Jaimes Morales.

INTRODUCCIÓN

La caracterización y modelado de cuerpos por medio de sus características físicas y químicas es una de las principales fuentes de investigación de la ciencia actual. El análisis de cada una de estas variables está siendo utilizada para resolver problemas en la industria cerámica, petrolera y en las ramas medica y biológica.

Es por eso que el grupo de investigación Ciencia de Materiales Biológicos y Semiconductores (CIMBIOS) ha centrado su investigación en la caracterización de cuerpos por medio de la espectroscopia de impedancia eléctrica. Entre las investigaciones realizadas se destacan la caracterización de tejido humano, sólidos porosos, materiales semiconductores, entre otros, implementando equipos para aplicaciones específicas. En la presente investigación se desarrolló un medidor de espectro de impedancia eléctrica de propósito general, de bajo consumo de potencia y tamaño reducido, brindando fácil manejo y versatilidad para su uso en investigaciones de laboratorio y de campo. El MIMP08 (Medidor de Impedancia 2008), es la evolución del MIMP07 (Medidor de Impedancia 2007) desarrollado en CIMBIOS.

Este libro se divide en cinco capítulos que describen el desarrollo realizado. En el primer capítulo se presenta una fundamentación teórica donde se encuentran los métodos más comunes para medir impedancia eléctrica, algunos conceptos relacionados y aplicaciones de la espectroscopia de impedancia eléctrica. En el segundo capítulo se encuentra una descripción del MIMP07, donde se analizan ventajas y desventajas de este equipo y las mejoras requeridas. En el capítulo tres se presenta el diseño del MIMP08, en donde se describe la operación general del equipo, la selección de componentes, el diseño en Hardware, el diseño del sistema de conmutación y el Diseño de la tarjeta impresa. El cuarto capítulo describe la implementación de los protocolos de comunicación I2C y SPECTRUM, los cuales

permiten realizar las operaciones de configuración y de control del MIMP08. En el capítulo cinco se muestran las pruebas realizadas tanto con el MIMP07, como con el MIMP08 y se hace un análisis de los resultados obtenidos. En el último capítulo se presentan las conclusiones de la investigación realizada.

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 MÉTODOS PARA MEDIR IMPEDANCIA ELÉCTRICA

Para la medición de impedancia eléctrica existen diversos métodos, cada uno de los cuales posee sus características y particularidades dependiendo del tipo de aplicación para el cual vaya a ser usado. Entre estos se encuentran: el método de dos electrodos (2EM, del inglés 2 Electrode Method), el método de tres electrodos (3EM, del inglés 3 Electrode Method) y el método de cuatro electrodos (4EM, del inglés 4 Electrode Method), los cuales pueden ser utilizados en modo potencióstato o galvanostato.

1.1.1 Método de dos electrodos (2EM)¹

Este método consiste en aplicar una corriente o una tensión, constante o alterna, a una muestra con impedancia Z_x , y medir su respuesta ante la excitación, a través de dos electrodos que presentan una impedancia Z_e . La relación entre la señal excitada y la señal medida permite el cálculo de la impedancia de la muestra en estudio.

En este método, la resistividad de los contactos está contenida en la medida y puede llegar a ser del mismo orden que esta. Por ello, es normalmente utilizado cuando se desea medir materiales de alta impedancia donde los efectos de carga producidos por los cables de medición sean despreciables, ver figura 1.

¹ SALAZAR, Yolocuatitli. Caracterización de tejidos cardiacos mediante métodos mínimamente invasivos y no invasivos basados en espectroscopia de impedancia eléctrica. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Electrónica. p. 40-41

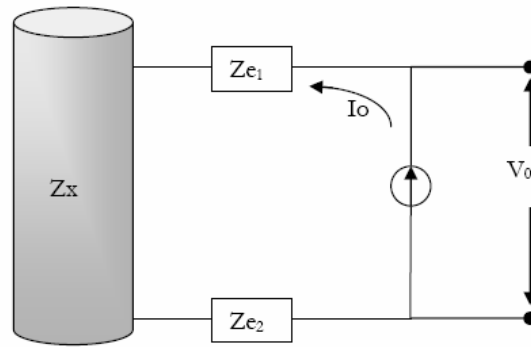


Figura 1. Configuración del método de dos electrodos

Fuente: SALAZAR, Yolocuatitli.

1.1.2 Método de 3 electrodos (3EM)²

Este método consiste en aplicar una señal de excitación de corriente o tensión, directa o alterna, al material en estudio, por medio de dos electrodos. Uno de ellos es tomado como electrodo de referencia (Z_{e2}) y el otro como el nodo por donde se inyecta la señal de excitación (Z_{e1}), ver figura 2. Cuando se estimula el material, se produce una respuesta eléctrica que es medida como una caída de tensión V_0 , entre un tercer electrodo (Z_{e3}) y el electrodo de referencia.

² SALAZAR, Yolocuatitli. Op. cit., p. 42-43.

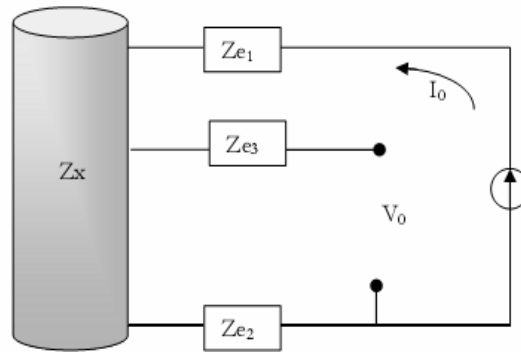


Figura 2. Configuración del método de tres electrodos

Fuente: SALAZAR, Yolocuatitli.

1.1.3 Método de cuatro electrodos (4EM)³

Este método consiste en aplicar una corriente o una tensión, directa o alterna, a la impedancia de interés Z_x por medio de dos electrodos Z_{e1} y Z_{e4} , y cuya respuesta de tensión ante el estímulo es medida entre los dos electrodos restantes Z_{e2} y Z_{e3} , ver figura 3.

Con este método se logra evitar el error producido por la caída de tensión en los contactos de los electrodos, siempre y cuando, la impedancia de entrada del circuito utilizado para medir la tensión V_0 sea mucho mayor que la impedancia de entrada de los electrodos empleados para la medición.

³ SALAZAR, Yolocuatitli. Op. cit., p. 42

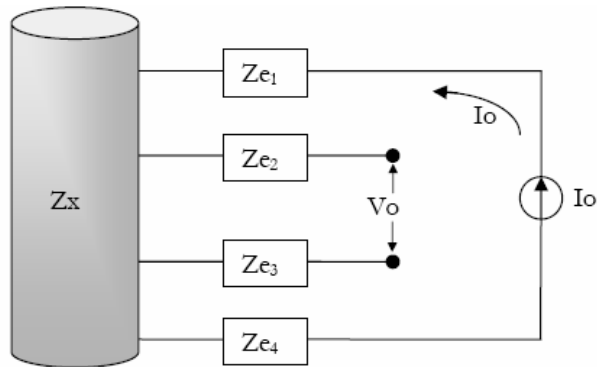


Figura 3. Configuración del método de tres electrodos

Fuente: SALAZAR, Yolocuautili.

1.1.4 Modo Potenciostato

Este modo consiste en la aplicación de una señal de tensión, controlada y estabilizada, y la medición de la respuesta en corriente⁴. Este modo es muy utilizado para pruebas en AC, donde el sistema a medir presenta un comportamiento estable.

1.1.5 Modo Galvanostato

En el modo galvanostato una corriente controlada y estabilizada es aplicada a la muestra y su respuesta de tensión es medida⁵. Este modo permite el control de los niveles tensión que serán medidos en la muestra.

⁴ Potenciostato-Galvanostato. <http://www.itma.es/esp/03/equipamiento/idi/equipamientometal115.html>.

⁵ lbit.

1.2 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA

Para comprender mejor el uso de la espectroscopia de impedancia eléctrica hay que tener claramente definido el concepto de impedancia eléctrica. La impedancia eléctrica es una cantidad compleja que mide el grado de oposición al flujo de corriente alterna sinusoidal a diferentes frecuencias. Este concepto fue introducido por Oliver Heaviside en 1884⁶.

El concepto de impedancia eléctrica se aplica en el dominio de la frecuencia con una respuesta dada por la función de transferencia

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)} = R(\omega) + jX(\omega) \quad (1)$$

Donde $R(\omega)$ es la parte real de la impedancia en términos de la componente resistiva y $X(\omega)$ es la parte imaginaria de la impedancia en términos de la componente reactiva.

Existen otras funciones complejas relacionadas con la función de impedancia eléctrica, frecuentemente llamadas inmitancias⁷: la admitancia $Y \equiv Z^{-1} \equiv Y' + jY''$, la función modulo $M \equiv j\omega C_c Z \equiv M' + jM''$ (donde $C_c = \epsilon_0 A_c / \ell$, es la capacitancia de una celda medida en el vacío con área de electrodo A_c y longitud de separación ℓ) y la permitividad eléctrica compleja $\epsilon^* \equiv M^{-1} \equiv \epsilon' - j\epsilon''$.

El espectro de impedancia eléctrica es el término asociado en bioingeniería para referirse a la resistividad eléctrica compleja en función de la frecuencia. Su uso como herramienta para la caracterización de cuerpos biológicos data de principios del siglo

⁶ Impedancia. <http://es.wikipedia.org/wiki/Impedancia>

⁷ BARSOUKOV, Evgenij, MACDONALD, J. Ross. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

XX⁸. Sin embargo, el interés en el estudio de las propiedades eléctricas de los tejidos se remonta a 1786, cuando Galvani mostró experimentalmente el efecto de la electricidad en las funciones motoras de animales. Rigaud et. Al, presenta una recopilación de los trabajos realizados en el uso del espectro de impedancia eléctrica para la caracterización de tejido biológico y su uso como herramienta clínica y diagnóstica, hasta 1996. Otros autores, tal como Brown B. et. al., reportan el uso del espectro de impedancia eléctrica como medio para el diagnóstico de algunas patologías.

1.3 APLICACIONES DE LA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA

En los últimos años, la espectroscopia de la impedancia eléctrica ha tomado gran auge en el mundo investigativo, ya que proporciona una gran información acerca de los cuerpos estudiados, sin causar ninguna alteración del mismo. A continuación se presentan algunas de las aplicaciones de esta técnica no destructiva.

1.3.1 Caracterización de tejido humano

Se ha encontrado que la medida de impedancia eléctrica arroja datos importantes acerca del estado en el cual se encuentra un tejido⁹. Por medio de esta medida se puede determinar: hidratación, edema, volumen de fluidos corporales, volumen intracelular y extracelular, porcentaje de grasa y en general, el estado de los tejidos y las células que los constituyen. Es por ello que la espectroscopia de impedancia

⁸ SCHAWN, H.P. Electrical Properties of Tissue and cell Suspensions. In advances in Biological and medical Physics. 5 ed. New York: Acad. Press, 1957, pag. 147

⁹ OLIVER, L.M. et. An impedimetric sensor for monitoring the growth of staphylococcus epidermidis. Engineering in Medicine and Biology Society. 28th Annual International Conference of the IEEE (Aug. 2006); p. 535-538.

eléctrica es una herramienta muy poderosa para el monitoreo de eventos fisiológicos, la detección de cáncer y control de enfermedades¹⁰.

La dependencia del comportamiento del tejido humano con la frecuencia lleva a determinar tres zonas dentro del espectro dieléctrico del tejido, llamadas regiones de relajación. Estas zonas son: α , que corresponde a espectros de baja frecuencia; β , que corresponde a espectros de frecuencia media; γ , que corresponde a alta frecuencia. En la figura 4, se ilustra gráficamente estas zonas de relajación.

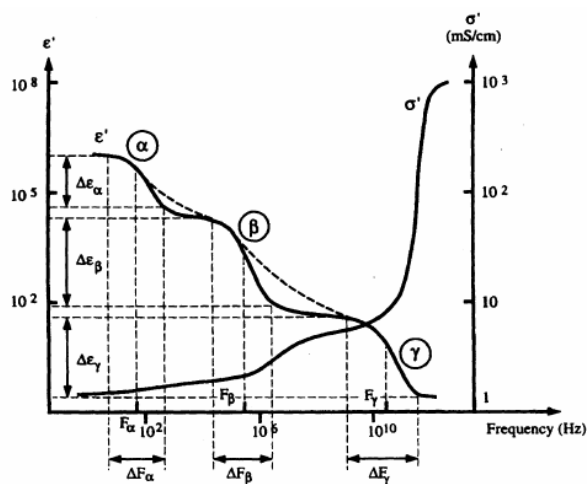


Figura 4. Zonas de dispersión sobre del espectro de impedancia eléctrica

Fuente: SALAZAR, Yolocautitli.

Zona de Dispersión α : Representa la zona de bajas frecuencias (Hz) y está asociada con procesos de difusión iónica en el sitio de la membrana celular o acumulación de carga en la membrana. Se puede considerar que en esta región la corriente atraviesa solamente el espacio extracelular de las capas superficiales, por

¹⁰ MIRANDA, David. Detección precoz de cáncer de cuello uterino basada en espectro de impedancia eléctrica. Bucaramanga, 2005. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas.

tanto la célula posee una elevada impedancia. Una de las razones por las cuales no se realizan mediciones en la región de dispersión α es que esta no proporciona información relacionada con el estado y la forma de un tejido¹¹.

Zona de Dispersión β : Corresponde a la banda de frecuencias de unos pocos Khz. a 1MHz, donde las estructuras celulares son el principal determinante de la impedancia del tejido. Esta dispersión es esencialmente debida a mecanismos de carga capacitivos de las membranas celulares.

1.3.2 Caracterización de medios porosos

Existen varias técnicas para caracterizar este tipo de materiales dentro de las cuales se encuentran la porisimetría de mercurio, el análisis por medio de microscopios electrónicos, la abstracción electrónica, entre otros. En esta sección se muestra la caracterización de medios porosos por medio de medidas eléctricas.

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. Esta relación ha sido llamada "Ley de Archie", y presenta la siguiente forma:

$$\sigma_{app} = \sigma_f a \varphi^m \quad (2)$$

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 es el 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

¹¹ ROBLES, Leonor y CHAVEZ, Jair. 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.

medio y la conductividad del líquido que ocupa los poros, y generalmente se denota por la letra F

$$F = \frac{\sigma_{app}}{\sigma_f} \quad (3)$$

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 que porción del volumen total de poros participa activamente en el flujo de la corriente eléctrica y que 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.

1.3.3 Otras aplicaciones

Además de las aplicaciones mencionadas anteriormente, la espectroscopia de impedancia eléctrica, puede ser utilizada para la detección de crecimiento bacteriano en alimentos, la estimación de velocidades de corrosión de distintos materiales bajo diversas condiciones ambientales, el monitoreo de aguas, la caracterización de concretos, la cuantificación de agua en mezclas oleosas entre otras.

1.4 NUESTRO PROYECTO

El desarrollo del MIMP08 pretende ser un aporte a la solución de problemas enmarcados dentro de la problemática regional y nacional.

El acceso a los servicios de salud, en regiones apartadas y deprimidas es uno de los grandes problemas que afronta nuestro país. En muchas ocasiones no se cuenta con los recursos técnicos necesarios para el diagnóstico o monitoreo de enfermedades dados los altos costos de equipo y personal especializado. Por otra parte, el sector industrial requiere la caracterización de materiales para el manejo de la calidad de sus productos, el monitoreo y control de procesos, y la integridad a nivel corrosión de sus instalaciones, punto crítico en sectores como el transporte de hidrocarburos y la industria civil.

Comentario [U1]: ,

Las técnicas convencionales representan altos costos y largos periodos de tiempo, para arrojar resultados, es por ello que se presenta el diseño e implementación de un equipo portátil, de bajo costo, basado en espectroscopia de impedancia eléctrica, de fácil manejo, que permita resolver la carencia regional y nacional en los aspectos mencionados, brindando soluciones oportunas a las necesidades presentes. Además, se pretende aumentar la capacidad de innovación nacional y el crecimiento empresarial con tecnología basada en el actual estado del arte.

2. IMPEDANCIÓMETRO MIMP07

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MIMP07

La descripción general que se presenta a continuación está basada en los resultados documentados en el trabajo de grado “Diseño e Implementación de un Impedanciometro para caracterización no destructiva de sólidos porosos”¹².

El MIMP07 es un equipo medidor de impedancia eléctrica para sólidos porosos, que cuenta con un sistema para la medición de magnitud y fase de la impedancia eléctrica. El equipo permite realizar un barrido de frecuencia desde 1kHz hasta 100kHz, medir impedancias en el rango de 100Ω a $10M\Omega$ y obtener el suministro de potencia desde el puerto USB de un computador personal PC.

El diseño del MIMP07 está basado en tecnología de circuitos integrados programables de bajo costo y fácil manejo. A continuación se presentan los dispositivos utilizados en el MIMP07.

- Procesador Digital de Señales DSP56F801 del fabricante Motorola.
- Conversor de Impedancia Eléctrica AD5933 del fabricante Analog Devices.
- Controlador USB2.0 referencia FT232BM del fabricante Future Technology Devices.

¹² BUSTAMANTE, Luis y MARTINEZ, Claudia. Diseño e Implementación de un Impedanciometro para caracterización no destructiva de sólidos porosos. Bucaramanga, 2007. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas.

Estos dispositivos permiten al equipo realizar en forma automática las operaciones de control y comunicación. El DSP56F801 controla el AD5933, recibe las tramas de datos correspondientes a los valores medidos y se comunica con el PC a través del FT232BM.

Dicha comunicación está basada en el estándar USB, el cual es de fácil manejo y bajo costo¹³. Para configurar el equipo, el usuario debe enviar una serie de comandos de configuración y de control desde el PC¹⁴, los cuales están basados en el estándar usado por los equipos de medición en instrumentación electrónica para laboratorios de Hewlett Packard (HP). Estos comandos contienen cinco caracteres en código ASCII como se muestra en la figura 5.¹⁵

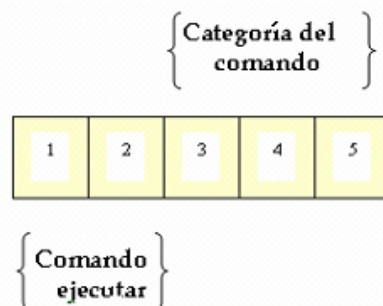


Figura 5. Caracteres del nombre de un comando.

Fuente: BUSTAMANTE, Luis y MARTÍNEZ, Claudia.

Con formato: Fuente: (Predeterminado) Arial, Sin Negrita

Existen dos tipos de comandos que permiten el manejo del equipo: los comandos de configuración que se usan para establecer el rango del barrido de frecuencia y los comandos de control que son utilizados para manejar el inicio de la toma de datos y para establecer el inicio de la comunicación entre el PC y el MIMP07.

¹³ SEVERANCE, Charles. FireWire Finally Comes Home. IEEE Computer Society. Michigan. Vol. 31, no. 3; p. 117.

¹⁴ BUSTAMANTE, Luis y MARTINEZ, Claudia. Op.cit., p. 113-114.

¹⁵ Ibit., p. 113.

Para realizar la toma de datos, el usuario debe enviar los comandos de configuración y de control desde el PC al MIMP07. Estos son interpretados por el DSP56F801, el cual los envía al AD5933 por medio del protocolo de comunicación I2C. El AD5933 interpreta estos comandos y realiza la toma de datos en cada punto de frecuencia del barrido. Posteriormente, los datos son almacenados en un registro del AD5933 y leídos por el DSP56F801, el cual los envía al PC por medio del puerto USB.

2.2 MEJORAS REQUERIDAS

Esta sección muestra en detalle cada una de las mejoras que requiere el MIMP07, las cuales están basadas en los resultados presentados en la investigación “Diseño e Implementación de un Impedanciometro para caracterización no destructiva de sólidos porosos”¹⁶.

- **Realizar el embebido del DSP al equipo.** Con esta se pretende realizar el embebido del DSP a la tarjeta del equipo, para que el sistema no dependa de la tarjeta de desarrollo. Para ello se debe realizar una etapa de alimentación, que suministre la corriente suficiente para activar el dispositivo.
- **Sistema de conmutación analógico controlado por software para la selección de la escala de medición del AD59933.** Con esta mejora se pretende minimizar el error en la medición de la impedancia eléctrica y eliminar la necesidad de cambiar manualmente la resistencia de realimentación cuando el AD5933 se encuentre por fuera del rango de medición¹⁷. Para ello, se debe implementar un sistema de conmutación analógico controlado por software que permita seleccionar automáticamente las resistencias de realimentación para la calibración óptima del equipo.

¹⁶ BUSTAMANTE, Luis y MARTINEZ, Claudia. Op.cit.

¹⁷ ANALOG DEVICES, Inc. (2005). AD5933 Data Sheet; p. 12.

- **Aprovechamiento de los niveles de excitación del AD5933.** El MIMP07 fue diseñado fundamentalmente para medir impedancia eléctrica en sólidos porosos, lo cual limita su uso a materiales cerámicos y utiliza solo un nivel de tensión proporcionado por el AD5933 para excitar la impedancia eléctrica. Por lo tanto, con esta mejora se pretende obtener un mejor aprovechamiento de los niveles de excitación del AD5933, para medir la impedancia eléctrica tanto en sólidos porosos como en medios biológicos y corrosión, lo cual requiere que se implemente un algoritmo que permita programar los registros correspondientes dentro del AD5933¹⁸.
- **Etapas de alimentación por medio de baterías recargables.** El MIMP07 obtiene el suministro de energía del puerto USB del PC, el cual no puede suministrar los 125mA para activar el MC56F8323, haciendo necesario el uso de una tarjeta de desarrollo para manejar el dispositivo. Por lo tanto, con esta mejora se pretende integrar el MC56F8323 al equipo, para eliminar la necesidad de usar la tarjeta de desarrollo. Esto requiere la implementación de una etapa de alimentación que suministre por medio de baterías AA o AAA recargables, la corriente necesaria para activar el MC56F8323.
- **Optimización del protocolo de comunicación entre el PC y el MIMP07.** Con esta mejora se pretende garantizar una comunicación libre de errores entre el PC y el MIMP08. Para ello, se debe implementar un algoritmo que permita la detección de errores en los comandos enviados por el usuario desde el PC hacia el equipo.
- **Optimización del protocolo de comunicación I2C para la comunicación entre el MC56F8323 y el AD5933.** Con esta mejora se pretende garantizar un desempeño óptimo del protocolo de comunicación I2C, de modo que se establezca una comunicación libre de errores entre el MC56F8323 y el

¹⁸ Referirse a la sesión 3.2.2 de este libro. Conversor de Impedancia AD5933; p. 30.

AD5933. Para ello, se debe implementar el protocolo I2C en el MC56F8323 y realizar la comunicación con el AD5933 para probar su desempeño.

3. DISEÑO DE HARDWARE

3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

El MIMP08¹⁹ es un sistema automático de medición de impedancia, que utiliza el método de dos puntas²⁰ para obtener el espectro de impedancia eléctrica de muestras, para el estudio de sus propiedades. Este dispositivo está conformado por varias etapas, cada una de ellas con un propósito específico dentro del sistema de medición, estas etapas son: DSP (Digital Signal Processor), sistema de comunicación serial, sistema de comunicación I2C, convertor de impedancia, sistema de conmutación y etapa de alimentación, ver figura 6.

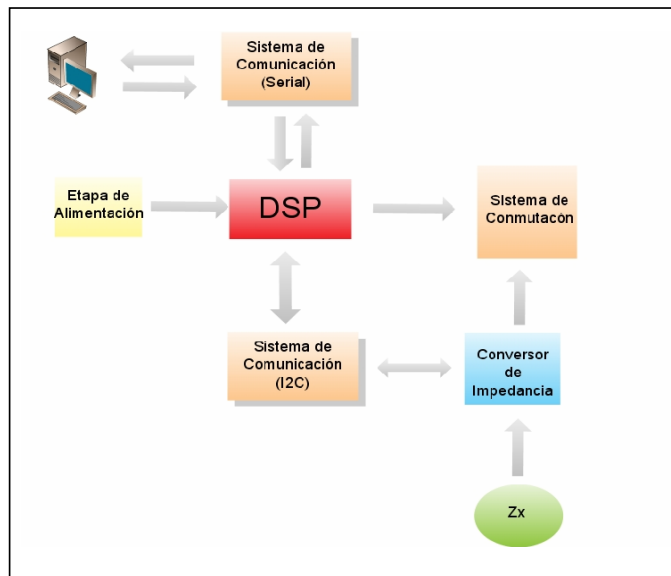


Figura 6. Diagrama de Bloques del MIMP08

Fuente: Autores del proyecto

¹⁹ MIMP08 son las siglas de Medidor de Impedancia 2008

²⁰ Referirse a la sesión 1.1.1 de este libro. Método de dos electrodos (2EM); p. 11.

El eje fundamental de este equipo es el conversor de impedancias AD5933 de Analog Devices. Este dispositivo permite la medición de la impedancia eléctrica inyectando señales de voltaje AC y midiendo señales de corriente AC. Este conversor de impedancia ofrece la oportunidad de un alto rango de medición de impedancia eléctrica (hasta las 10MΩ, sin reloj externo) y distintos niveles de excitación, ajustándose de esta forma a diferentes aplicaciones, ofreciendo bajo costo y facilidad de implementación, además de ser un dispositivo robusto y confiable.

El cerebro del MIMP08 es el DSP MC56F8323, el cual proporciona y recibe información de varias etapas del equipo. El DSP recibe y envía los datos de configuración y de impedancia respectivamente a través de un dispositivo de interfaz UART USB-serial, el cual permite la comunicación con el puerto USB (Universal Serial Bus) de un computador personal. El sistema de comunicación serial fue programado dentro del protocolo SPECTRUM, que garantiza una comunicación segura y sin errores entre el usuario y el MIMP08²¹.

Una vez el DSP recibe los datos que el usuario ha establecido para el barrido de frecuencia (frecuencia inicial, incremento de frecuencia y número de incrementos), este envía al conversor de impedancia dichos datos mediante un sistema de comunicación basado en el protocolo I2C a través de un puerto SPI del procesador. Los datos de configuración son recibidos por el conversor de impedancia, el cual ajusta las nuevas condiciones para realizar la medición. El conversor de impedancia tiene dentro de su configuración una resistencia de realimentación, que se selecciona dependiendo del valor de impedancia que vaya a ser medido y del barrido de frecuencia que se haya seleccionado. La labor del sistema de conmutación es decidir automáticamente, cual corresponde al valor de la resistencia de realimentación que se requiere para dicha medición. El DSP envía señales al sistema de conmutación mediante tres líneas lógicas, para seleccionar el valor de resistencia de

²¹ Referirse a la sesión 4.2 de este libro. Protocolo SPECTRUM; p. 67.

realimentación adecuada para la medición. Una vez se ha ajustado la resistencia de realimentación adecuada para cada rango de impedancia e intervalo de frecuencia, el dispositivo realiza el barrido y realiza la toma de datos, los cuales son enviados al DSP haciendo uso del protocolo I2C, para su posterior envío al PC donde serán visualizados.

El MIMP08 cuenta con dos fuentes de alimentación. La primera es la alimentación que puede proporcionar el puerto USB del PC. Esta es usada para alimentar el sistema de conmutación, el convertor de impedancia y el dispositivo de interfaz UART USB-serial. La corriente entregada por el puerto USB es insuficiente para la alimentación del DSP, por esta razón se hizo necesaria la implementación de una segunda etapa de alimentación que suministre el consumo respectivo, mediante baterías de fácil adquisición en el mercado como son las baterías AAA recargables. Para la etapa de alimentación se hizo necesario incorporar dentro del medidor una configuración elevadora de tensión que proporcionará los niveles adecuados para el dispositivo de procesamiento.

3.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES

La selección de los componentes electrónicos se realizó teniendo en cuenta, además de las características adecuadas para el funcionamiento del equipo, tres principios con los que debe contar un dispositivo portátil y de utilización en labores de campo, como lo son: bajo consumo de potencia, dimensiones reducidas y bajo costo.

A continuación se describen las etapas con cada uno de los dispositivos requeridos:

- DSP (MC56F8323)
- Convertor de impedancia (AD5933)
- Sistema de conmutación (ADG1408)

- Sistema de comunicación serial (FT232R)
- Etapa de Alimentación (ADM660)

- **DSP MC56F8323**

Como se mencionó anteriormente, el DSP cumple el papel principal de control de dispositivos y de sistemas de comunicación dentro del MIMP08. Este dispositivo es un híbrido entre un procesador digital de señales (DSP) y un microcontrolador: la potencia de un DSP, combinado con la funcionalidad de un microcontrolador. Este dispositivo se seleccionó para la implementación del MIMP08 por su bajo costo, código de programación compacto y conocido (lenguaje C), flexibilidad en su configuración y menor tiempo de desarrollo, dada la experiencia del grupo de investigación en la programación de dicho dispositivo.

Las características principales del MC56F8323 son:

- Alimentación de 3.3 V
- 27 líneas (máximo) para puertos de propósito general (GPIO)
- 60 MIPS a 60 MHz de velocidad de núcleo.
- 32 KB de memoria Flash.
- 4 KB de memoria RAM.
- 8 KB de datos Flash.
- 8 KB de datos RAM.
- Empaquetado de este dispositivo es LQFP de 64 pines. Ver figura 7.

Módulo SPI: Este módulo fue programado para establecer la comunicación mediante protocolo I2C, entre el DSP y el AD5933, para configurar el dispositivo y recibir los datos de impedancia medida.

GPIO: Se programaron tres puertos de propósito general como líneas lógicas de selección para el multiplexor analógico que permite la selección de la resistencia de realimentación adecuada para la medición.

- **Convertor de impedancia AD5933.**

El AD5933 es un convertor de impedancia de Analog Devices, que combina un generador de señales, un amplificador de ganancia programable, un convertor analógico-digital (ADC) y la transformada rápida de Fourier, para la medición de la impedancia eléctrica. Las características de este dispositivo son las siguientes:

- Alimentación de 2.7 a 5.5V
- Reloj Interno (MCLK) de 16.776MHz
- Rango de impedancia de 100Ω a 10MΩ.
- Rango de frecuencia 1kHz a 100kHz.
- Sensor de temperatura.
- Convertidor analógico- digital de 12-bits
- Cuatro niveles de excitación. Ver tabla 1.
- El empaquetado que tiene este dispositivo es el RU-16. Ver figura 8.

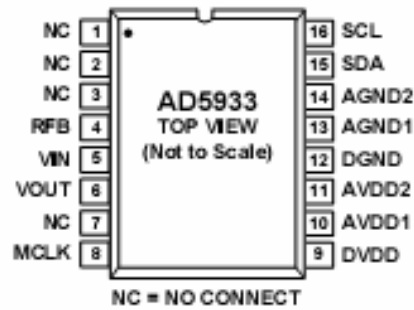


Figura 8. Empaquetado AD5933

Fuente: Hoja de Datos del Fabricante

Tabla 1. Niveles de excitación del AD5933.

Amplitud de la señal de excitación	Nivel de offset
Rango 1: 1.98 V p-p	1.48 V
Rango 2: 0.97 V p-p	0.76 V
Rango 3: 383 mV p-p	0.31 V
Rango 4: 198 mV p-p	0.173 V

Para el MIMP08, la alimentación del AD5933 es de 3.3V utilizando como fuente el puerto USB regulado mediante el FT232.

Configuración del AD5933

Este dispositivo basa su funcionamiento en el diagrama de bloques de la figura 9.

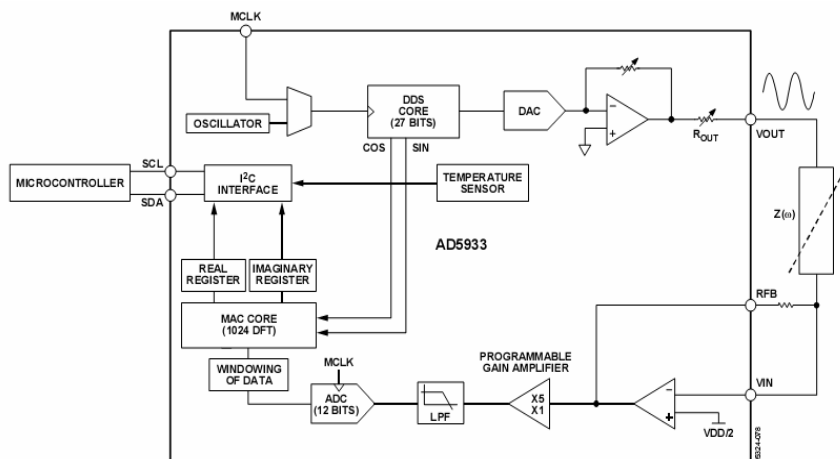


Figura 9. Diagrama de Bloques AD5933

Fuente: Hoja de Datos del Fabricante

El AD5933 tiene como entradas los datos seleccionados por el usuario para la configuración del barrido: frecuencia de inicio, incremento de frecuencia, número de incrementos, ganancia del PGA interno, número de ciclos de excitación y nivel de excitación. Estos datos son almacenados en los registros internos que tienen la distribución mostrada en la tabla 2.

Tabla 4. Mapa de registros del AD5933

Nombre del Registro	Dirección	Datos del Registro	Lectura/Escritura
Control	80h	D15 a D8	Lectura/Escritura
	81h	D7 a D0	Lectura/Escritura
Frecuencia de Inicio	82h	D23 a D16	Lectura/Escritura
	83h	D15 a D8	Lectura/Escritura
	84h	D7 a D0	Lectura/Escritura
Incremento de Frecuencia	85h	D23 a D16	Lectura/Escritura
	86h	D15 a D8	Lectura/Escritura
	87h	D7 a D0	Lectura/Escritura

Nombre del Registro	Dirección	Datos del Registro	Lectura/Escritura
Número de incrementos	88h	D15 a D8	Lectura/Escritura
	89h	D7 a D0	Lectura/Escritura
Número de ciclos de excitación	8Ah	D15 a D8	Lectura/Escritura
	8Bh	D7 a D0	Lectura/Escritura
Estado	8Fh	D7 a D0	Solo Lectura
Dato de Temperatura	92h	D15 a D8	Solo Lectura
	93h	D7 a D0	Solo Lectura
Datos Reales	94h	D15 a D8	Solo Lectura
	95h	D7 a D0	Solo Lectura
Datos Imaginarios	96h	D15 a D8	Solo Lectura
	97h	D7 a D0	Solo Lectura

Algunos de los valores que son almacenados en los registros que tienen la opción de ser escritos, tienen una codificación de acuerdo con el valor deseado. Esta codificación va dada por (1) o por (2), dependiendo del registro:

$$\text{Código_Frecuencia_inicial} = \left(\frac{\text{Frecuencia_inicial_requerida}}{\frac{MCLK}{4}} \right) * 2^{27} \quad (4)$$

$$\text{Código_Incremento_Frecuencia} = \left(\frac{\text{Incremento_Frecuencia}}{\frac{MCLK}{4}} \right) * 2^{27} \quad (5)$$

El registro de control, como su nombre lo indica, controla diferentes variables del dispositivo, tales como nivel de excitación, número de ciclos de excitación, ganancia del PGA, entre otros, Ver tabla 3. Este registro no necesita codificación y será usado para el control del AD5933²²

El registro de número de incrementos (Registro 88h y 89h), no requiere codificación, y el usuario introduce un valor que puede ser máximo 511, este valor determina la longitud del vector que contiene los datos de la impedancia medida.

²² Referirse a la sesión 4.1.3. Control del AD5933; p. 64.

Tabla 5. Mapa del Registro de Control del AD5933

BIT	D15	D14	D13	D12	Función
	0	0	0	0	No Opera
	0	0	0	1	Inicio con Frecuencia Inicial
	0	0	1	0	Inicio de Barrido de Frecuencia
	0	0	1	1	Incremento de Frecuencia
	0	1	0	0	Repetir Frecuencia
	1	0	0	0	No Opera
	1	0	0	1	Medición de Temperatura
	1	0	1	0	Modo Potencia Baja
	1	0	1	1	Modo Standby
	1	1	0	0	No Opera
	1	1	0	1	NO Opera
D11					No Opera
		D10	D11		Rango de Tensión de Excitación
		0	0		Rango 1
		0	1		Rango 2
		1	0		Rango 3
		1	1		Rango 4
D8					PGA 0=x1 1=x5
D7					Reservado, Configurar en 0
D6					Reservado, Configurar en 0
D5					Reservado, Configurar en 0
D4					Reset
D3		1			Reloj Externo = 1
		0			Reloj Interno = 0
D2		0			Debe estar configurado en 0
D1					Reservado, Configurar en 0
D0					Reservado, Configurar en 0

El registro de número de ciclos de excitación determina el número de veces que se va excitar la muestra para calcular la impedancia desconocida. El valor máximo de este será $511 \times 4 = 2044$.

Una vez el AD5933 tiene estos datos de configuración, aplica el nivel de tensión seleccionado sobre la muestra a la cual se le va a hallar el espectro de impedancia eléctrica, luego, con la configuración no inversora que tiene en la entrada, mide la corriente de respuesta que presenta la muestra a la tensión inyectada. Esta señal

analógica es muestreada por el ADC para luego ser procesada por el núcleo del dispositivo. Allí el ad5933 realiza el cálculo de la transformada discreta de Fourier, para luego enviar los registros correspondientes a los datos de parte real y parte imaginaria de la impedancia (Registros del 94h al 97h).

- **Multiplexor ADG1408**

Para el diseño del sistema de conmutación²³, se implementó un multiplexor, el cual permite la conmutación de la resistencia de realimentación, necesaria para el funcionamiento del AD5933. El multiplexor seleccionado fue el AD1408 del fabricante Analog Devices, un multiplexor 8-1 con las siguientes características:

- Alimentación de 0-25V.
- 140ns de velocidad de conmutación.
- 60MHz de ancho de banda.
- 0.002 μ A de Corriente de polarización.
- Empaquetado TSSOP de 16 pines. Ver figura 10.
- Resistencia = 0.5 Ω .

Este dispositivo, al igual que el AD5933, será alimentado por medio del puerto USB, aprovechando su bajo consumo en corriente. Dicho dispositivo fue seleccionado por la simplicidad en la configuración, su bajo consumo de potencia y compatibilidad con el DSP MC56F8323.

²³ Referirse a la sesión 3.4 de este libro. Diseño del sistema de Conmutación; p. 45.

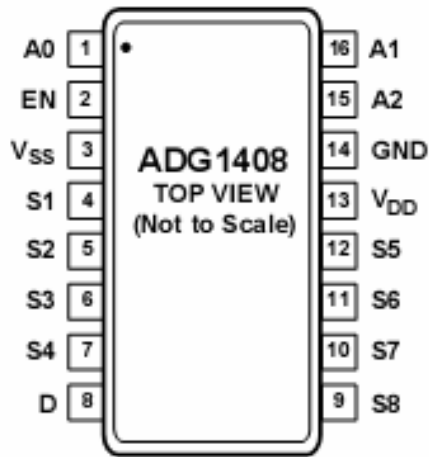


Figura 10. Empaquetado del ADG1408

Fuente: Hoja de datos del fabricante

- **FT232RL**

El envío y recepción de datos se realiza a través del modulo SCI del DSP MC56F8323, por medio de las líneas, Rx y Tx. Para establecer la comunicación con el PC vía puerto USB se hace necesario utilizar un dispositivo UART USB-serial. El dispositivo seleccionado para esta función fue el FT232RL del fabricante Future Technology Devices Internacional y fue seleccionado por su velocidad de transmisión, bajo costo, tamaño y configuración sencilla, además de contar con un regulador interno para alimentar al AD5933 y al ADG1408.

Algunas de las características de este dispositivo son las siguientes:

- Alimentación vía puerto USB (5V).
- Rata de transferencia de datos desde 300 Baudios hasta 3 Mega baudios.
- Regulador interno de 3.3V.

- Tecnología C-MOS en la entrada y TTL a la salida (compatibilidad con el DSP MC56F8323).
- Empaquetado SSOP de 28 pines. Ver figura 11.

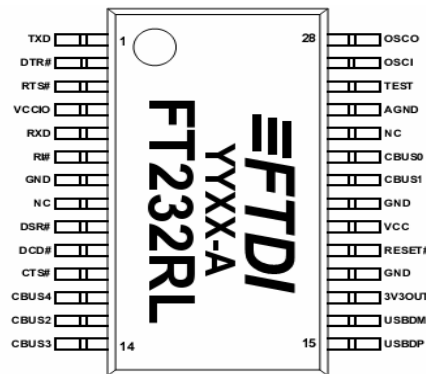


Figura 11. Empaquetado del FT232

Fuente: Hoja de datos del Fabricante

- **ADM 660**

La alimentación del DSP, se realiza a través de dos baterías AAA de 1.2V, que proporcionan una tensión máxima de 2.4V. Sin embargo, como se citó anteriormente, la alimentación del DSP es de 3.3V, por lo cual la tensión proporcionada por las dos baterías se hace insuficiente. Es por esto que se hizo necesaria la implementación de una etapa de ganancia DC-DC (boosting), para poder suministrar dicha tensión.

El dispositivo seleccionado para este propósito fue el ADM660 del fabricante Analog Devices, con las siguientes características:

- Configuración como Doblador o Inversor.
- Alimentación dada por la entrada que puede estar de 1.5 V a 7.5V.
- Corriente máxima de salida 100mA.
- 94% en eficiencia de transferencia de potencia.

- Empaquetado SOIC-8. Ver figura 12.

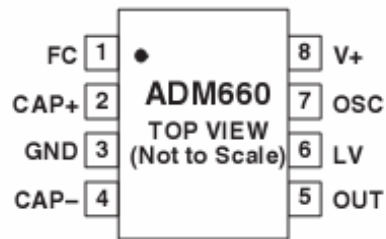


Figura 15. Empaquetado del ADM660

Fuente: Hoja de datos del Fabricante.

Este dispositivo fue seleccionado por su bajo consumo de potencia, configuración sencilla y bajo nivel de tensión a la entrada.

3.3 TOPOLOGÍAS DEL MIMP08

Las topologías de circuito relacionadas con el AD5933, el FT232RL y el MC556F8323 fueron seleccionadas de acuerdo a las hojas de datos de los dispositivos. Por otra parte, las topologías del sistema de conmutación y de la fuente de alimentación se adaptaron de acuerdo a las necesidades del equipo. A continuación se muestra en detalle cada una de las topologías implementadas.

- **Comunicación AD5933-MC56F8323 y conexión a la muestra**

En la figura 13 se muestra el esquemático de la conexión de la muestra, y se observa la resistencia de realimentación, RFB, que es seleccionada de manera automática mediante el sistema de conmutación²⁴.

²⁴ Referirse a la sesión 3.4. Diseño del sistema de Conmutación; p. 64.

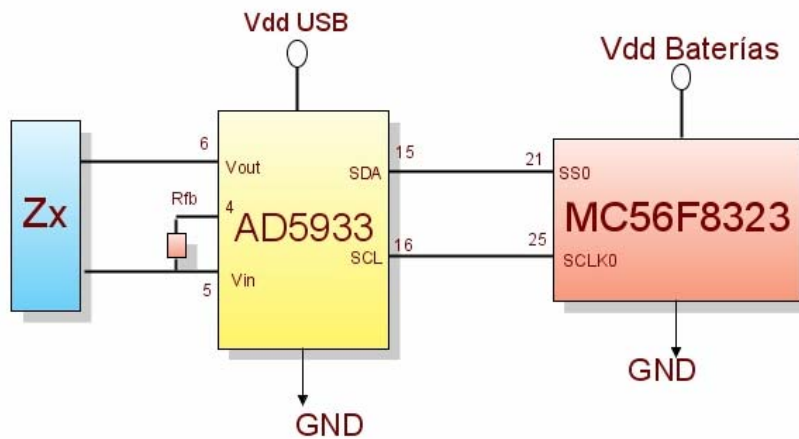


Figura 13. Conexión entre el AD5933 y el MC56F8323

Fuente: Autores del Proyecto.

El diagrama presenta las conexiones de las líneas SS0 y SCLK0 del DSP, con las líneas SDA y SCL del AD5933, por medio de las cuales se controla y sincroniza la comunicación con el AD5933 por medio del protocolo I2C. La alimentación de los dispositivos señalados proviene de fuentes diferentes. El AD5933 se alimenta desde el regulador de 3.3V incorporado en el FT232RL que es alimentado por el puerto USB; mientras que el DSP es alimentado por una etapa de alimentación que aumenta la tensión de las baterías AAA.

- **Conmutación**

Como se mencionó anteriormente, para el diseño del sistema de conmutación, se implementó un multiplexor con el cual se selecciona la resistencia de realimentación, necesaria para el óptimo funcionamiento del AD5933. El esquemático de esta etapa se muestra en la figura 14.

La figura 14 indica como, el DSP, mediante tres líneas lógicas, programadas sobre los puertos de propósito general (GPIO) de los pines 15, 16 y 18, controla la conmutación de la resistencia de realimentación del AD5933 de acuerdo a la magnitud de impedancia que vaya a ser medida.

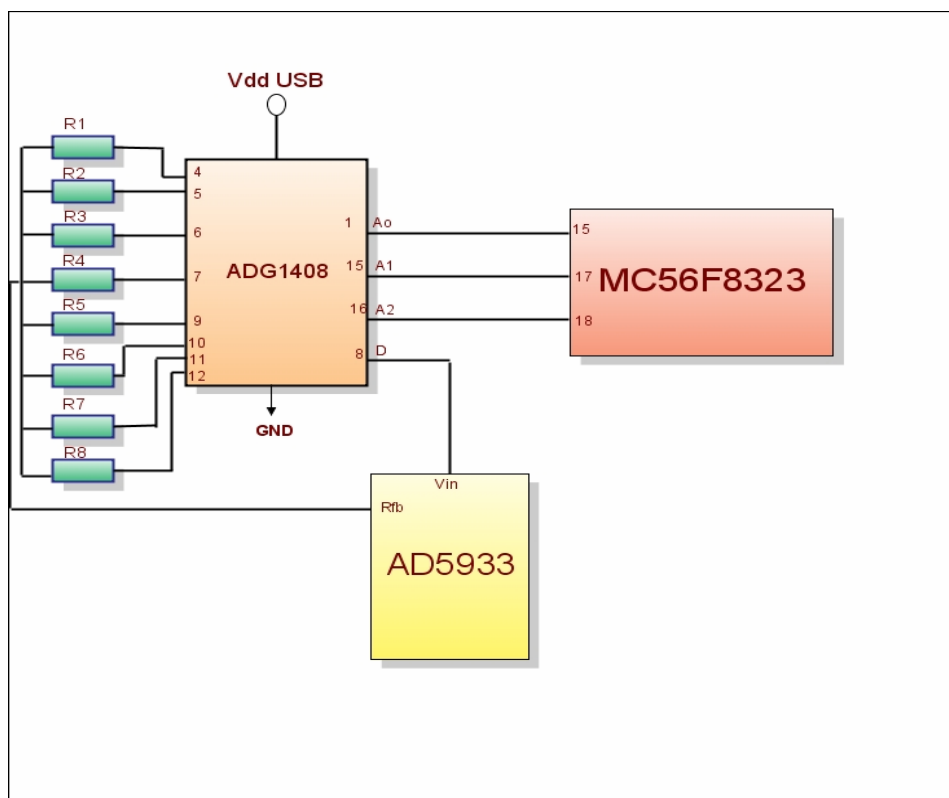


Figura 14. Conexión para el funcionamiento del ADG1408

Fuente: Autores del Proyecto.

La alimentación del ADG1408 es suministrada por el puerto USB, y regulada por el FT232RL.

- **Interconexión del FT232RL**

El diagrama de conexión de este dispositivo es mostrado en la figura 17. Este dispositivo cumple con dos funciones dentro del MIMP08. La primera consiste en servir como interfaz entre el PC y el DSP para la transmisión de datos bajo el protocolo serial asíncrono por el puerto USB. Para esto, los pines RX y TX del FT232RL son conectados a los pines Rx y Tx, que están destinados para el módulo SCI del DSP (pin 1 y 64). Los datos que provienen del PC van conectados por el puerto USB mediante los pines USBDM (del inglés USB data signal plus) y USBDP (del inglés USB data signal minus).

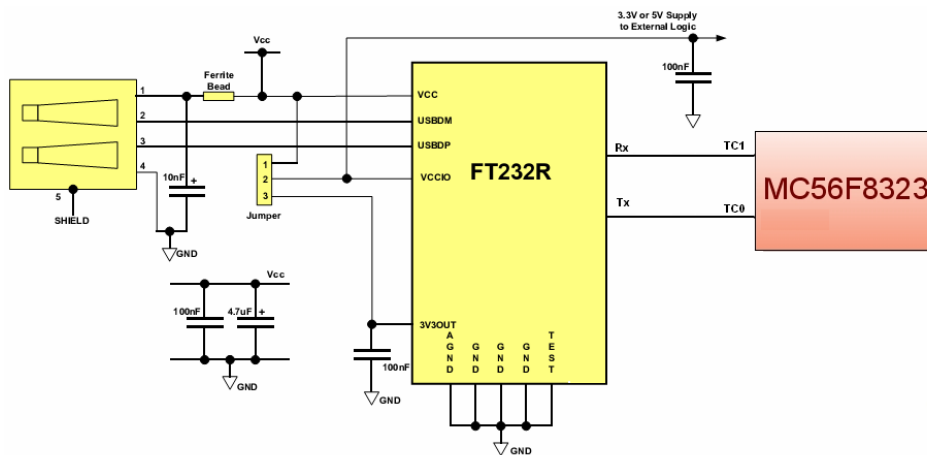


Figura 15. Conexión del FT232

Fuente: Autores del Proyecto.

La segunda función que cumple el FT232RL, es regular la tensión que entrega el puerto USB (5V), para alimentar los dispositivos para los cuales se dispuso esta alimentación, ADG1408 y AD5933. El FT232RL recibe los 5V del puerto USB, para esto se hace necesario colocar entre el puerto USB y el FT232RL un núcleo de ferrita, luego mediante el regulador interno se obtienen los 3.3V necesarios para

alimentar los dispositivos anteriormente mencionados. En la configuración con la cual se implementó el MIMP08 se adaptó un jumper para obtener, según sea la posición de esta, bien sea 3.3 V o 5 V.

- **Alimentación del DSP**

Para el DSP se diseñó una etapa de alimentación exclusiva, la cual proporciona la tensión y la corriente necesaria para su óptimo funcionamiento. Según el objetivo trazado, la máxima tensión que se podría extraer de la fuente externa es de 2.4V (baterías AAA recargable), por esto se hace necesario implementar una configuración que eleve la tensión.

Se implementó el circuito de la figura 16 donde se dispuso de una configuración dobladora, donde se aprovechó las bondades ofrecidas por el ADM660, el cual dobla la tensión entregada por las baterías.

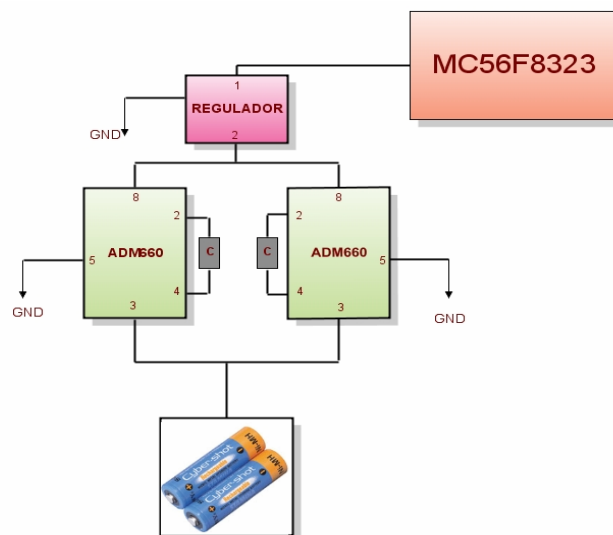


Figura 16. Primera Configuración de Etapa de Alimentación

Fuente: Autores del Proyecto.

El mercado ofrece una variedad de reguladores con los que se podría diseñar esta etapa, pero la configuración sencilla que ofrece el ADM660, la cual solo requiere un capacitor para ajustar la frecuencia de la bomba de carga, es de menor tamaño que las configuraciones que pueden ofrecer otras alternativas (las cuales requieren inductores y elementos extras en su configuración). La disposición de dos ADM660 se debe a la cantidad de corriente que exige el DSP (125mA).

Al realizar pruebas preliminares a esta configuración se observó que el dispositivo en su configuración *boosting* original no proporciona los niveles de tensión y de corrientes requeridos por el procesador, es por ello que se optó por otra alternativa haciendo uso de la configuración inversora del ADM660.

Esta configuración pretende aprovechar el nivel de tensión entregado por las baterías y la salida del convertidor DC-DC. Si bien, la cantidad de corriente que exige el DSP baja el nivel de tensión a la salida de doblador, al conectar las salidas de dos ADM660 en configuración inversora, en serie con las baterías, se obtiene el nivel de tensión de 3.3V, y la cantidad de corriente necesaria. Ver figura 17.

Al pin de fuente de cada dispositivo se conectó en paralelo un capacitor de acople, para de esta forma reducir tanto PSRR (Power Supply Ripple Rejection), como inductancias parasitas.

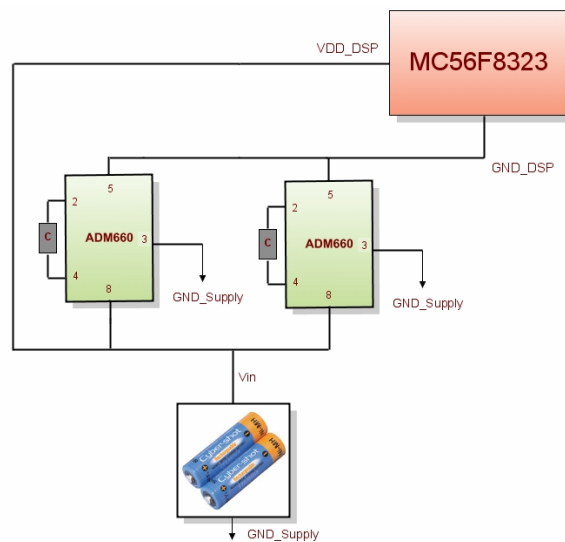


Figura 17. Etapa de alimentación Final

Fuente: Autores del Proyecto

3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONMUTACIÓN

En esta sección se presenta la metodología para el diseño del sistema de conmutación del MIMP08, el cual se planteó como una mejora del MIMP07²⁵, para ajustar automáticamente la escala de medición del AD5933 cuando este se encuentre por fuera del rango de medición, eliminando así la necesidad de cambiar manualmente la resistencia de realimentación (RFB) del dispositivo.

Los dos primeros pasos de la metodología consisten en analizar el comportamiento del AD5933 (operación y calibración) haciendo uso de la herramienta de simulación del dispositivo suministrada por el fabricante²⁶. En dichos pasos se analiza el

²⁵ Referirse a la sesión 2.2 de este libro. Mejoras requeridas; p. 23.

²⁶ www.analog.com

comportamiento del dispositivo para diferentes resistencias de realimentación y de calibración, lo cual permite establecer los rangos de medición y los factores de calibración, para cada resistencia de realimentación seleccionada. Después se pasa al diseño del sistema conmutación del MIMP08, para seleccionar la resistencia de realimentación adecuada por medio del ADG1408, ajustando así la escala de medición del AD5933.

3.4.1 Comportamiento del AD5933

El AD5933 permite realizar un barrido de frecuencia desde 1KHz hasta 100KHz y medir impedancias desde 100Ω hasta $10M\Omega$, sin embargo, para realizar dichas mediciones se debe calibrar adecuadamente el dispositivo. Por esto se realizaron simulaciones para observar el comportamiento del dispositivo cuando se varían los parámetros que afectan la calibración tales como, resistencia de realimentación, impedancia de calibración y el nivel de la señal de excitación.

La figura 18 muestra el comportamiento del AD5933 al medir el espectro de una impedancia compuesta por una resistencia de $100k\Omega$ y una capacitancia de $100pF$. En dicha figura se puede observar que para una resistencia de realimentación de $1M\Omega$, los valores de la impedancia medida tienden a alejarse significativamente por encima del valor ideal. Por lo tanto, al calibrar el dispositivo se debe tener presente que la resistencia de calibración sea mayor o igual a la resistencia de realimentación, para garantizar que la medida se mantenga dentro del rango de medición del AD5933.

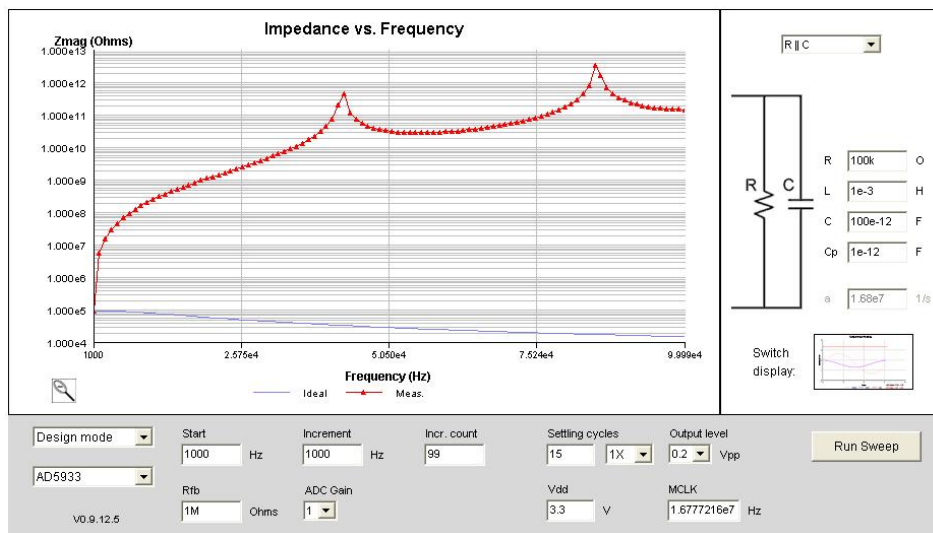


Figura 18. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de $1\text{M}\Omega$ y resistencia de calibración R de $100\text{k}\Omega$.

Fuente: Autores del proyecto

La figura 19 muestra el comportamiento del AD5933 al medir el espectro de una impedancia compuesta por una resistencia de $1\text{M}\Omega$ y una capacitancia de 100pF . En dicha figura se puede observar que para una resistencia de realimentación de $100\text{k}\Omega$, los valores de la impedancia medida son iguales al valor ideal hasta cierto punto de frecuencia y después se mantiene constante, alejándose así del valor ideal. Por lo tanto, para obtener errores pequeños en la medida, el valor mínimo que puede tomar la magnitud de la impedancia medida no puede estar por debajo del valor de la impedancia de realimentación.

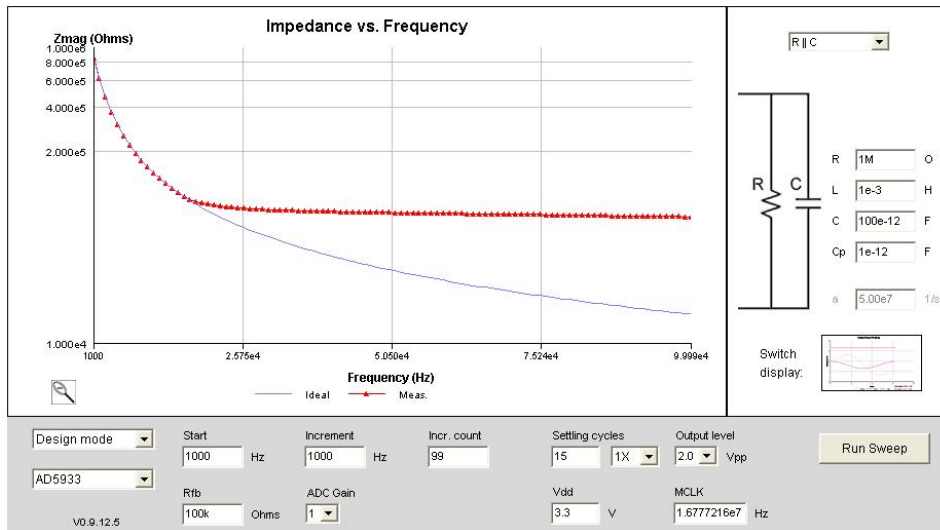


Figura 19. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 100kΩ y resistencia de calibración R de 1MΩ.

Fuente: Autores del proyecto

3.4.2 Calibración del AD5933

Aprovechando que el comportamiento del AD5933 no depende individualmente de la componente resistiva o capacitiva, sino de la magnitud de la impedancia, las simulaciones para encontrar las resistencias de realimentación que se van a utilizar en el MIMP08, se realizaron con circuitos resistivos puros.

Por otra parte, en la sección anterior se mostró que la calibración del AD5933 depende de la relación que se tome entre la resistencia de realimentación y la impedancia de calibración, lo cual implica que para estudiar el comportamiento del dispositivo se debe tener presente dicha relación.

A continuación se presenta una serie de figuras tomadas con el software Analog Devices, las cuales muestran el comportamiento del AD5933 al medir un circuito resistivo puro.

La figura 20 muestra el comportamiento del AD5933 al medir una resistencia R de 100Ω con una resistencia de realimentación RFB de 100Ω. En dicha figura se puede observar que el valor medido es igual al valor esperado en todo el rango de frecuencia del dispositivo, indicando que esta es una configuración adecuada para calibrar el dispositivo.

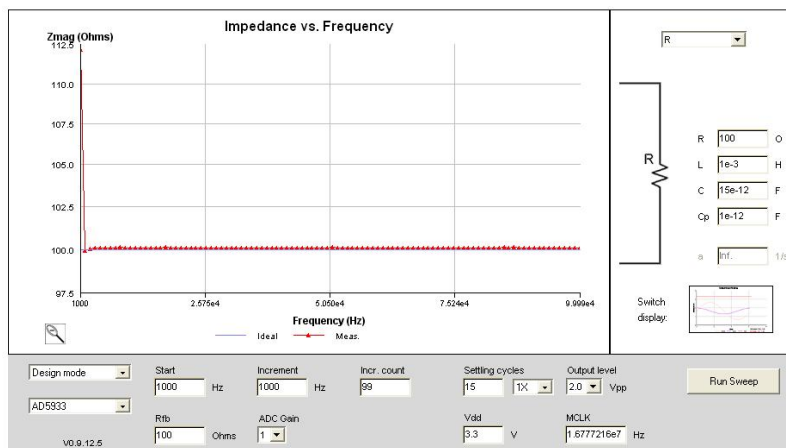


Figura 20. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 100Ω y resistencia de calibración R de 100Ω.

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 21 se cambio la resistencia de realimentación del dispositivo a 750Ω y se ajustó la resistencia a medir en 750Ω. Para esta configuración, al igual que en la anterior, se observa que el valor medido es igual al valor esperado en todo el rango de frecuencia del dispositivo cuando el valor de RFB es igual al de R.

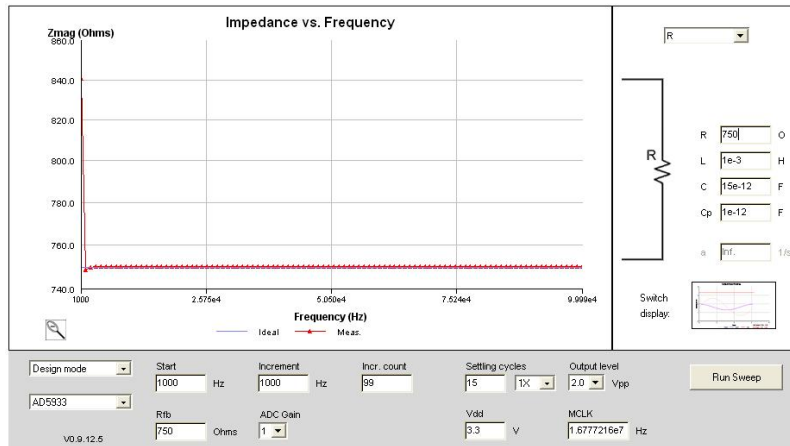


Figura 21. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 750Ω y resistencia de calibración R de 750Ω.

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 22 se cambiaron nuevamente las resistencias RFB y R, ambas por 1kΩ. Para esta configuración, al igual que en las dos anteriores, se observa que el valor medido es igual al valor esperado en todo el rango de frecuencia del dispositivo cuando RFB es igual a R.

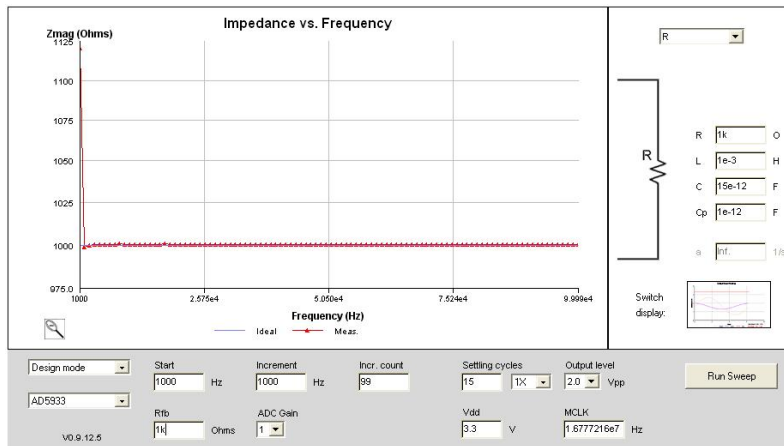


Figura 22. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 1kΩ y resistencia de calibración R de 1kΩ.

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 23 se cambiaron las resistencias RFB y R, ambas por 2kΩ. Para esta configuración se observa una pequeña desviación del valor medido con respecto al valor esperado en todo el rango de frecuencia del dispositivo, sin embargo, se puede escoger esta configuración para calibrar el equipo debido a que dicha desviación es muy pequeña.

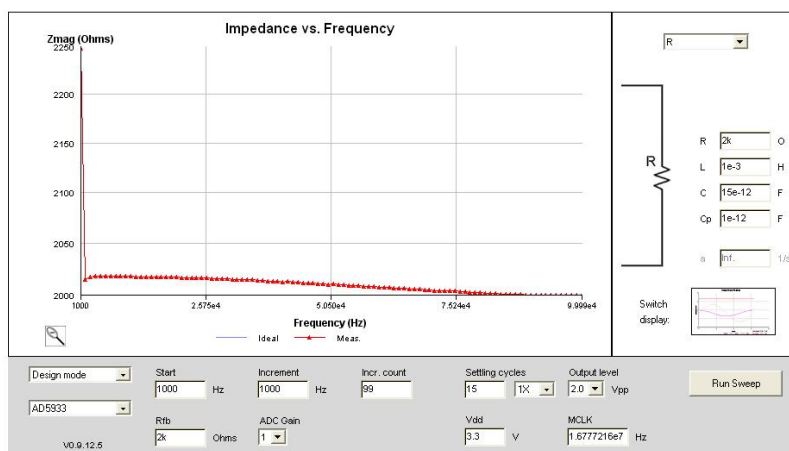


Figura 23. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 2kΩ y resistencia de calibración R de 2kΩ

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 24 se cambiaron las resistencias RFB y R, ambas por 4kΩ. Para esta configuración se observa el mismo comportamiento de la anterior, por tanto se puede escoger esta configuración para calibrar el equipo.

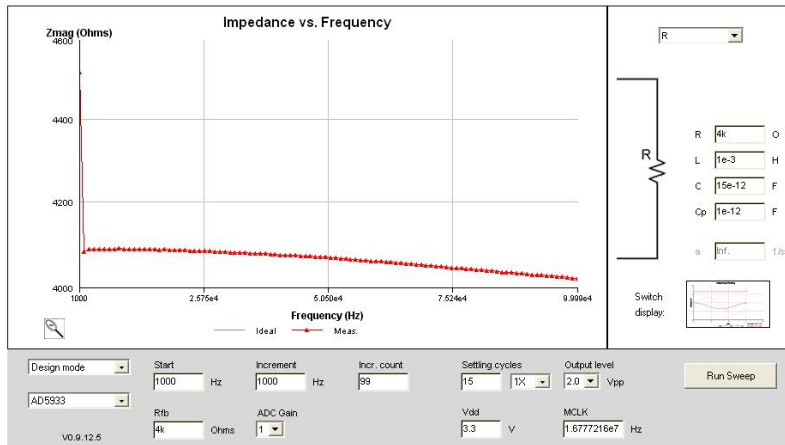


Figura 24. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 4k Ω y resistencia de calibración R de 4k Ω .

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 25 se cambiaron las resistencias RFB y R, ambas por 10k Ω . Para esta configuración se observa nuevamente el mismo comportamiento de las dos anteriores, por lo que se puede escoger esta configuración para calibrar el equipo.

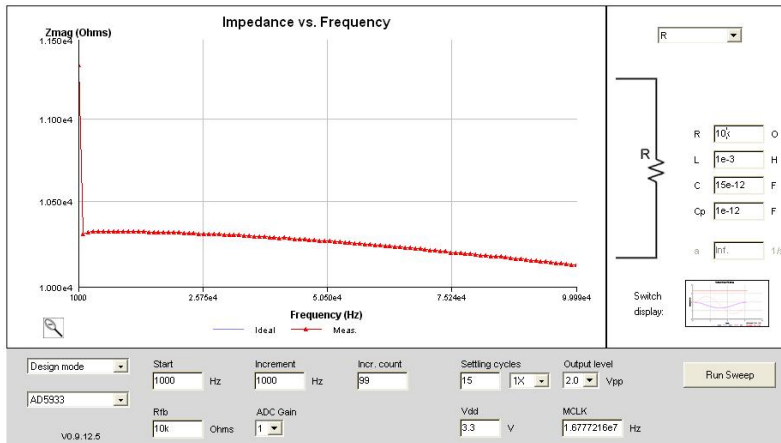


Figura 25. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 10k Ω y resistencia de calibración R de 10k Ω .

Fuente: Autores del proyecto

En la figura 26 se cambiaron las resistencias RFB y R, ambas por 100kΩ. Para esta configuración se observa nuevamente que la desviación entre el valor medido y el valor esperado es muy pequeña, por consiguiente, se puede escoger esta configuración para calibrar el equipo.

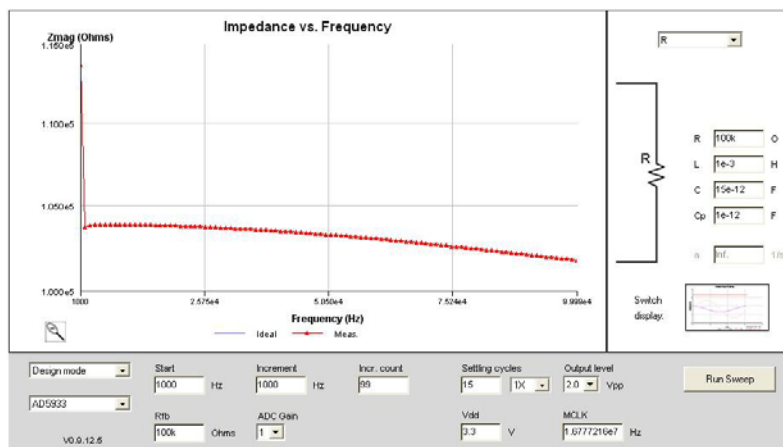


Figura 26. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 100kΩ y resistencia de calibración R de 100kΩ.

En la figura 27 se cambiaron las resistencias RFB y R, ambas por 1MΩ. Esta configuración fue la última que se escogió para calibrar el equipo.

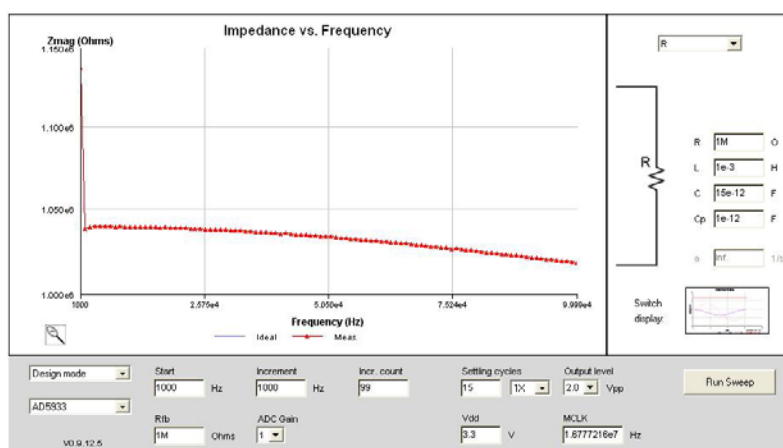


Figura 27. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 1MΩ y resistencia de calibración R de 1MΩ.

Con las simulaciones realizadas se establecieron las resistencias de realimentación óptimas y los rangos de medición para el diseño del sistema de conmutación del MIMP08, los cuales se presentan en la tabla 4. En dicha tabla se observa que los rangos de medición están definidos por las resistencias de realimentación debido al comportamiento que presenta el AD5933 cuando la medición se realiza sin la resistencia de realimentación adecuada.

Tabla 4. Rangos de medición de impedancia para el nivel de 2Vpp

NIVEL DE EXCITACIÓN DE 2Vpp		
RESISTENCIA DE REALIMENTACION (Ω)	IMPEDANCIA DE CALIBRACIÓN (Ω)	RANGOS DE MEDICIÓN (Ω)
100	100	100 a 750
750	750	750 a 1k
1k	1k	1k a 2k
2k	2k	2k a 4k
10k	1k	4k a 10k
100k	100k	10k a 100k
1M	1M	100k a 1M

3.4.3 Implementación del sistema de conmutación

Una vez establecidos los rangos de medición, se realizó la implementación del sistema de conmutación del MIMP08. Este sistema permite escoger la resistencia de realimentación adecuada por medio de un sistema de escala automática.

Para ajustar la escala de medición del equipo, el sistema de conmutación comienza con la resistencia de realimentación de $1M\Omega$ y la cambia por la siguiente cada vez que el AD5933 se encuentra por fuera del rango de medición. Para esto, el equipo empieza realizando un barrido de frecuencia y calcula la diferencia entre los datos

medidos y los límites de los rangos de medición, cuando la diferencia entre el dato de impedancia medida y el límite inferior del rango o entre el límite superior y el dato de impedancia, es negativa, se dice que el dato de impedancia esta por fuera del rango de medición. En ese caso, el sistema cambia la resistencia de realimentación de $1\text{M}\Omega$ a $100\text{k}\Omega$ y sigue realizando esto hasta que el valor de la impedancia medida se encuentre dentro del rango de medición.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo el sistema de conmutación realiza la calibración del equipo para medir una impedancia RC compuesta por una resistencia de $10\text{M}\Omega$ en paralelo con una capacitancia de 100pF sin que el AD5933 se salga del rango de medición.

Para la figura 28, el rango de medición está entre $1\text{M}\Omega$ y $10\text{M}\Omega$. En esta se observa que, cuando el valor medido se sale del límite inferior del rango de medición, el sistema de conmutación debe cambiar la resistencia de realimentación RFB de $1\text{M}\Omega$ a $100\text{k}\Omega$.

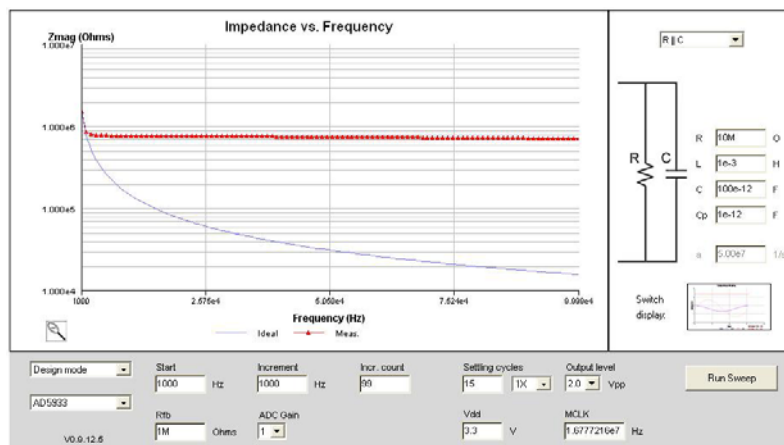


Figura 28. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de $1\text{M}\Omega$, resistencia de $10\text{M}\Omega$ y capacitancia de 100pF .

Fuente: Autores del proyecto

Para la figura 29, el rango de medición está entre $100\text{k}\Omega$ y $1\text{M}\Omega$. En esta se observa que, cuando el valor medido se sale de $100\text{k}\Omega$, el sistema de conmutación debe cambiar la resistencia de realimentación RFB de $100\text{k}\Omega$ a $10\text{k}\Omega$.

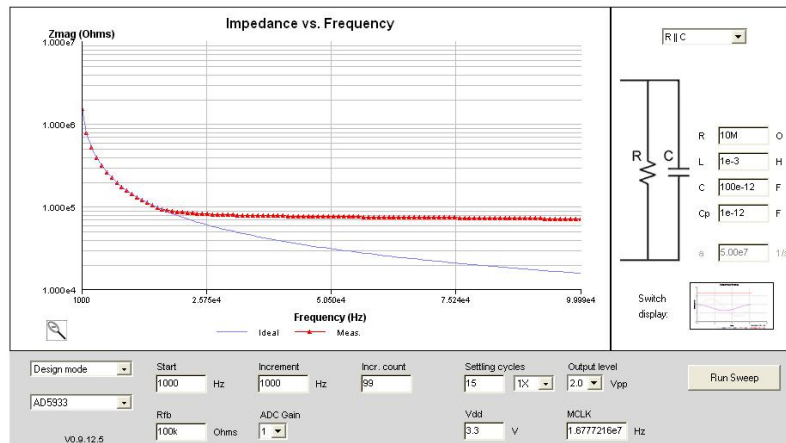


Figura 29. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de $100\text{k}\Omega$, resistencia de $10\text{M}\Omega$ y capacitancia de 100pF .

Fuente: Autores del proyecto

Para la figura 30, el rango de medición está entre $10\text{k}\Omega$ y $100\text{k}\Omega$. En esta se observa que el valor medido es igual al valor esperado en todo el rango de frecuencia del dispositivo, por lo tanto, la resistencia de realimentación de 10k es la adecuada para medir el circuito RC del ejemplo mencionado anteriormente.

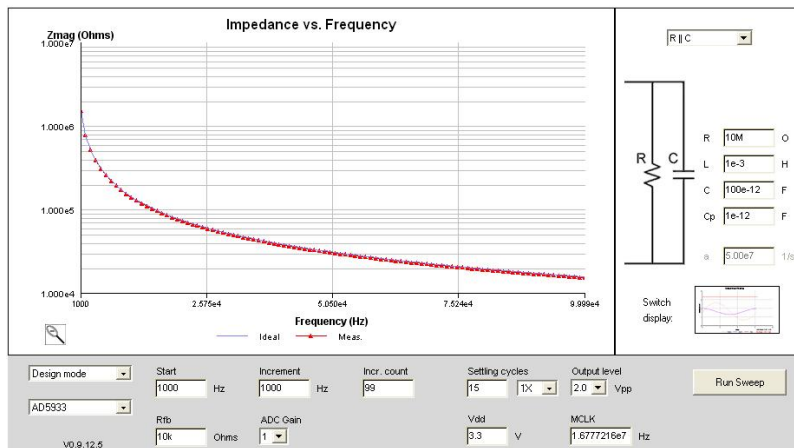


Figura 60. Medición de impedancia con resistencia de realimentación RFB de 10k Ω , resistencia de 10M Ω y capacitancia de 100pF.

Fuente: Autores del proyecto

3.5 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO

El diseño del circuito impreso se basó en el Standard de la IEEE IPC2221, en el cual se citan normas sobre compatibilidad e interferencia electromagnética, que puede afectar el comportamiento del equipo, así como reglas básicas de diseño.

El PCB fue diseñado en tecnología de doble capa, y se siguieron los siguientes lineamientos:

- Los elementos fueron distribuidos de modo que los caminos fueran cortos, para evitar grandes resistencias y acople electromagnético con señales externas.
- El ancho de las pistas fue seleccionado de acuerdo al presupuesto de corrientes de cada uno de los dispositivos.

- Los ángulos de los caminos en los cambios de dirección se implementaron a 135° para reducir autoinducción y mantener la resistencia uniforme en todo el trayecto.

Tabla 5. Medidas consideradas para diseño de tarjeta Impresa

Característica	Distancia (mín.)
Ancho de pista	0.2mm
Ancho de vía	0.5mm
Distancia Pad-pista	0.2mm
Distancia pista-pista	0.2mm
Distancia borde de tarjeta-pista/vía	0.53mm
Distancia vía-pista	0.2mm

- El plano de tierra se diseñó para garantizar un retorno óptimo de la corriente en cada uno de sus caminos.
- Debido a que solo la parte del conversor hacia el lado de la muestra y las resistencias de realimentación comprenden la parte analógica, no fue necesario aislar las tierras de los dispositivos. Sin embargo, el diseño tiene en consideración que las corrientes de retorno de la parte digital no crucen la sección analógica.

La tarjeta impresa del MIMP08, fue diseñada a doble capa. Capa TOP, figura 31. Capa BOTTOM, ver figura 32.

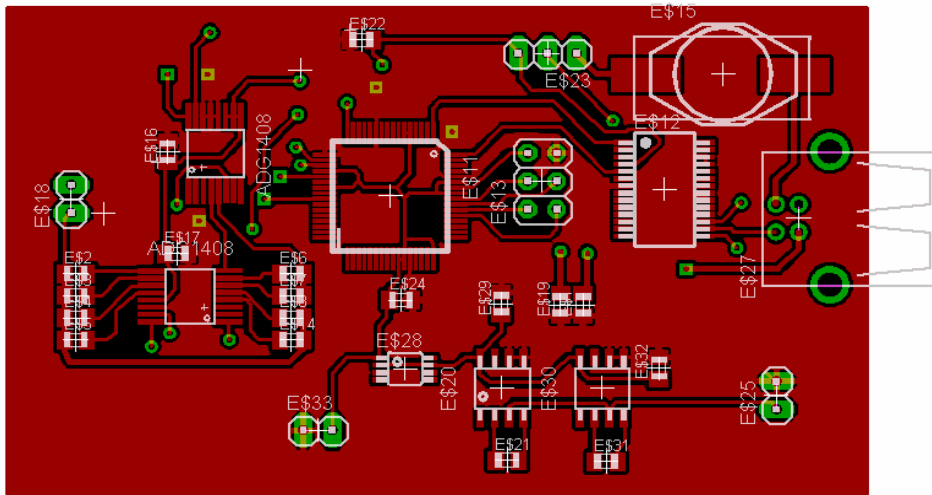


Figura 31. Capa TOP de la Tarjeta de Circuito Impreso del MIMP08

Fuente: Autores del Proyecto

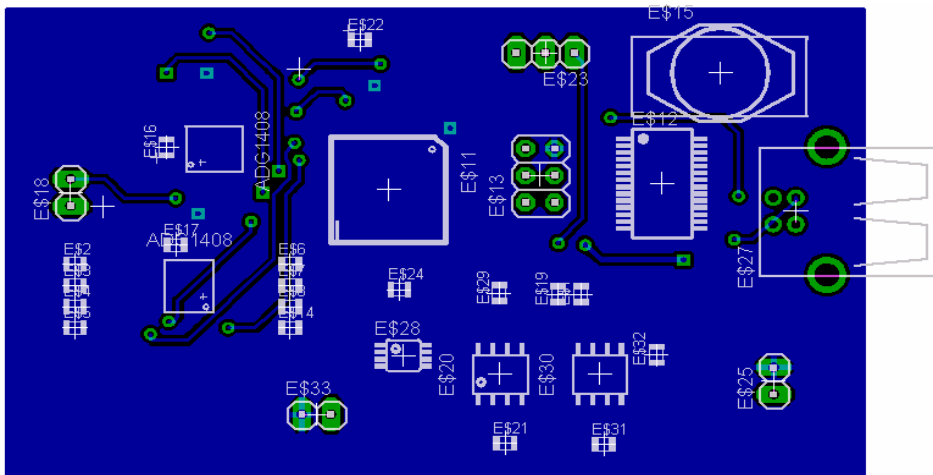


Figura 32 Capa BOTTOM de la Tarjeta de Circuito Impreso del MIMP08

Fuente: Autores del Proyecto

4. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

En este capítulo se describe la implementación de los protocolos de comunicación I2C y SPECTRUM, los cuales permiten realizar las operaciones de configuración y de control del MIMP08. Para implementar estos protocolos en el MC56F8323, se utilizó la herramienta software CodeWarrior™ (IDE) for Freescale™ 56800/E Digital Signal Controllers versión 8.0 y el Processor Expert Interface; este último basado en componentes denominados Embedded Beans™ que reducen el tiempo y costo en el desarrollo de aplicaciones²⁷.

4.1 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN I2C

A continuación se presenta una descripción general del protocolo de comunicación I2C y su implementación en el MC56F8323 así como los registros del AD5933 programados, para configurar el dispositivo.

4.1.1 Descripción general del Protocolo I2C

El protocolo de comunicación I2C trabaja sobre un bus de datos serial²⁸, el cual opera bajo la arquitectura Master/Slave (Maestro/Esclavo). Dicha arquitectura permite al dispositivo maestro el control de varios dispositivos esclavos, utilizando dos líneas de comunicación: la línea de datos serial (SDA) y la línea de reloj serial (SCL).

²⁷ Freescale Semiconductor, Inc. Codewarrior™ Development Studio for Freescale™ 56800/E Hybrid Controllers: MC56F83xx/DSP5685x Family Targeting Manual. Rev. Oct. 2004. p. 81.

²⁸ <http://es.wikipedia.org>

- **Modo de funcionamiento del protocolo:**

El inicio de la transferencia de datos comienza cuando el dispositivo maestro establece un nivel bajo sobre la línea SDA, mientras la línea SCL permanece en nivel alto. Después, el dispositivo maestro envía una cadena de datos, que contiene la dirección del esclavo y un bit de lectura o escritura R/W (del inglés, Read/Write) que indica la dirección del flujo de datos (0 indica escritura sobre el esclavo y 1 lectura desde el esclavo).

Una vez enviada la dirección del esclavo, el dispositivo maestro verifica la línea SDA para detectar el bit de acuse generado por el esclavo. Este bit es conocido como el bit de reconocimiento (Acknowledge) y está representado por un nivel bajo sobre la línea SDA.

Cuando el dispositivo maestro detecta el bit de reconocimiento del esclavo, envía la siguiente cadena de datos, que corresponde a una dirección de registro dentro del esclavo. El esclavo responde nuevamente con un bit de acuse una vez recibe el último dato de la cadena para indicar al maestro que puede empezar a leer los datos.

El dispositivo maestro detecta el bit de reconocimiento y comienza a leer los datos almacenados en el dispositivo esclavo. Una vez el dispositivo maestro termina de leer todo los datos guardados en los registros del dispositivo esclavo, la línea SDA se pone a nivel alto (No Acknowledge) indicando que la comunicación ha terminado.

La Figura 33 muestra un diagrama de tiempos para la transferencia de datos por medio del protocolo de comunicación estándar I2C de 7 bits.

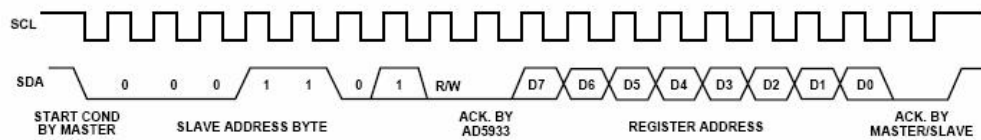


Figura 33. Diagrama de tiempos del protocolo I2C

Fuente: Analog Devices²⁹.

4.1.2 Implementación del protocolo de comunicación I2C en el MC56F8323

El protocolo de comunicación I2C se implementó para establecer la comunicación entre el MC56F8323 y el AD5933. Para su implementación se utilizó el Bean SW_I2C³⁰ del Processor Expert Interface (ver figura 34), el cual emula un protocolo de comunicación estándar I2C de 7 bits usando dos pines de propósito general (GPIO, General Port Input/Output), para la línea de datos serial (SDA, Serial Data Line) y la línea de reloj serial (SCL, Serial Clock Line).

A continuación se presenta la descripción de los parámetros del Bean SW_I2C, que fueron configurados para generar los códigos del protocolo de comunicación I2C.

- **Bean Name:** nombre de la interfaz que emula el protocolo I2C y que está presente en cada una de las funciones generadas por la interfaz. El nombre editado para este parámetro fue EI2C1.
- **Data Pin:** GPIO de la CPU usado para la línea SDA. Se utilizó el pin no. 21 (SS0_B_TXD1_GPIOB0) del MC56F8323.
- **Clock Pin:** GPIO de la CPU usado para la línea SCL. Se utilizó el pin no. 25 (SCLK0_GPIOB3) del MC56F8323.

²⁹ ANALOG DEVICES, Inc. (2005). Op.cit., p. 25.

³⁰ Processor Expert For Freescale 56800/E, http://processorexpert.com/lnk_mc56800PEPlugin.php.

- **Mode Selection:** selecciona el modo de operación del protocolo I2C. Para este parámetro se seleccionó el modo Maestro (Master).
- **I2C Mode Bus:** determina la velocidad de transmisión del protocolo I2C. Se escogió el modo rápido (Fast Mode), el cual establece una velocidad de transmisión menor a 400 Kbits/s.

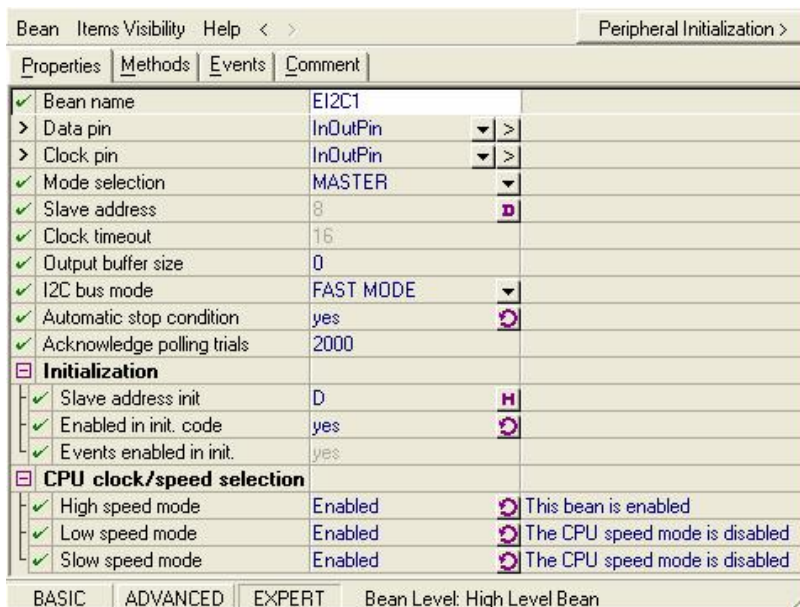


Figura 34. Bean SW_I2C

Fuente: Autores del proyecto.

Después de configurar los parámetros del Bean SW_I2C, se compiló el programa para generar las funciones utilizadas para la comunicación entre el MC56F8323 y el AD5933.

4.1.3 Control del AD5933

Para controlar el AD5933 se implementaron una serie de códigos³¹ con la ayuda de la herramienta CodeWarrior™ (IDE), los cuales se describen en el diagrama de flujo de la figura 35. Este diagrama presenta la secuencia de pasos para realizar el barrido de frecuencia. La programación de los comandos presentados se implementó en forma estructurada para facilitar el entendimiento y administración del software desarrollado.

El primer paso para realizar el barrido de frecuencia es establecer los parámetros FRECUENCIA INICIAL, INCREMENTO DE FRECUENCIA y NÚMERO DE INCREMENTOS. Estos parámetros son enviados a los registros del AD5933 en formato hexadecimal.

Una vez establecidos los parámetros que describen el barrido de frecuencia, el AD5933 se pone en Modo STANDBY para colocar los pines VIN y VOUT a tierra y posteriormente ejecutar un comando de RESET. A continuación se realiza la programación de los comandos INITIALIZE WITH START FREQUENCY y START SWEET FREQUENCY, los cuales permiten dar inicio al barrido de frecuencia. Antes de la ejecución de este último comando se debe programar un retardo que permita al AD5933 terminar el procesamiento de la señal de entrada evitando que otra señal sea procesada en el mismo intervalo de tiempo.

Cuando el AD5933 recibe los comandos que configuran el barrido de frecuencia, comienza el proceso de conversión de las señales, que representan la impedancia que está siendo medida. Este proceso de conversión dentro del AD5933 tarda un tiempo mientras el ADC convierte las 1024 muestras de la señal que son entregadas al DSP, para realizar la DFT y almacenar las muestras en los registros de datos Real e Imaginario. Para determinar si el proceso de conversión ha terminado, se chequea

³¹ En el anexo A de este libro se encuentran los códigos implementados para el control del AD5933

el registro de estado. Si el proceso de conversión no ha terminado, se programa el comando INCREMENT FREQUENCY o el comando REPEAT FREQUENCY dentro del registro de control³² hasta que finaliza el proceso de conversión, en este caso se leen los registros de datos Real e Imaginario desde el MC56F8323 y se da por terminado el proceso de control del AD5933.

Para enviar los códigos desde el MC56F8323 hacia el AD5933 se interconectaron las líneas SDA y SCL de ambos dispositivos³³ y se utilizaron las siguientes funciones generadas por el Bean SW_I2C:

- **EI2C1_SendChar:** permite enviar un byte de datos a través de la línea SDA en cadenas de 7 bits seguidos de 1 bit de escritura, el cual es 0.
- **EI2C1_RecvChar:** permite recibir un byte de datos a través de la línea SDA en cadenas de 7 bits seguidos de 1 bit de lectura, el cual es 1.
- **EI2C1_SendBlock:** permite enviar una cadena de datos a través de la línea SDA, enviando por cada byte de la cadena de datos, 7 bits seguidos de 1 bit de lectura, el cual es 1.
- **EI2C1_RecvBlock:** permite recibir un cadena de datos a través de la línea SDA, enviando por cada byte de la cadena de datos, 7 bits seguidos de 1 bit de lectura, el cual es 0.

³² Referirse a la sesión 3.2.2 de este libro. Conversor de Impedancia AD5933; p. 30.

³³ *ibid.*

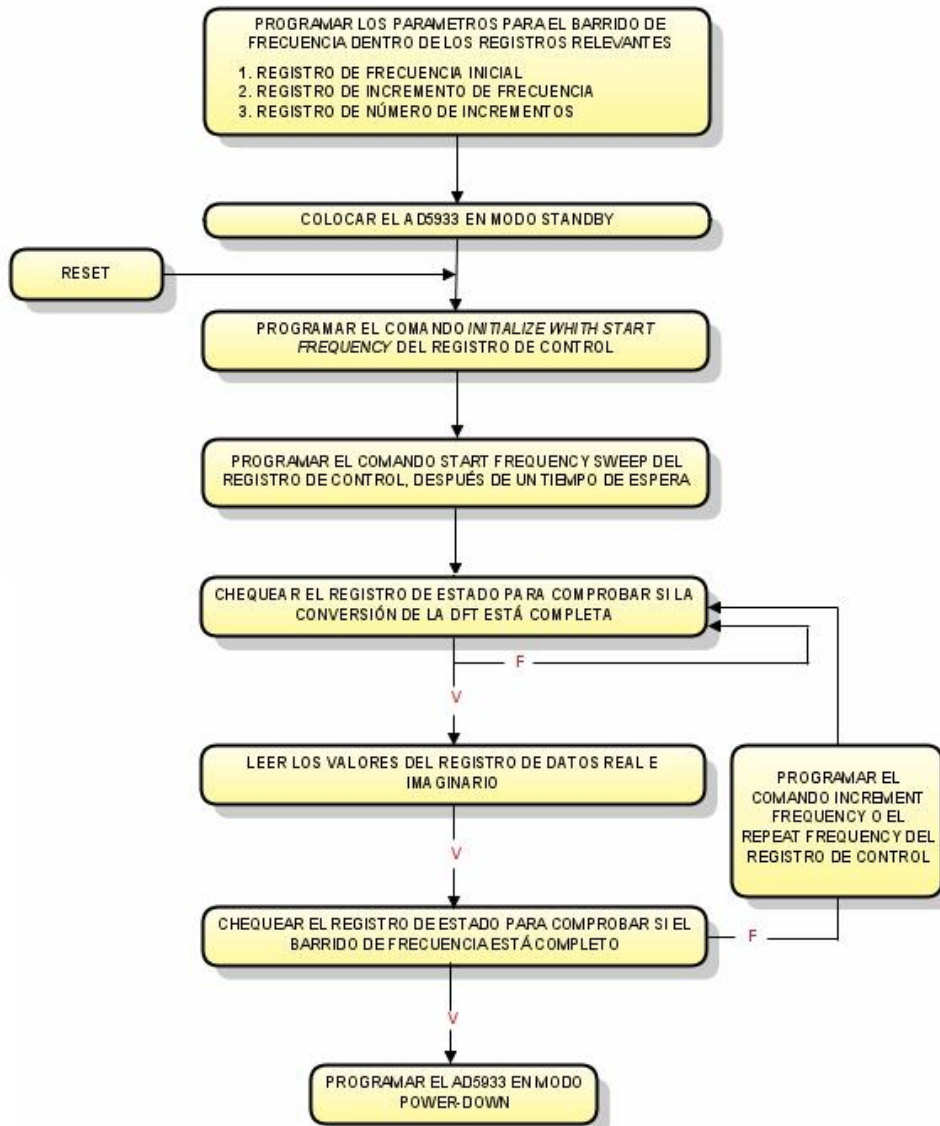


Figura 75. Diagrama de flujo para realizar el barrido de frecuencia

Fuente: Analog Devices³⁴

³⁴ ANALOG DEVICES, Inc. (2005). Op.cit., p. 25.

Por cada dato que el MC56F8323 va a leer o escribir sobre el AD5933 usando las funciones `EI2C1_SendChar` y `EI2C1_RecvChar`, se debe enviar primero el código 0001101 (0D hex.) para identificar el dispositivo³⁵; sin embargo, las funciones `EI2C1_SendBlock` y `EI2C1_RecvBlock` permiten operar con cadenas de bytes enviando sólo una vez el código de identificación del AD5933 a través de la línea SDA, ahorrando así tiempo de ejecución en las operaciones de lectura y escritura de datos.

4.2 PROTOCOLO “SPECTRUM”: COMUNICACIÓN MIMP08 – PC

Este protocolo de comunicación se implementó para realizar el intercambio de datos entre el MIMP08 y el PC. Para su implementación se utilizó el Bean `AsynchroSerial`³⁶ del Processor Expert Interface, el cual encapsula la Interfaz de Comunicación Serial (UART) y provee características estándar para la Comunicación Serial Asíncrona.

A continuación se presenta la descripción de los parámetros del Bean `AsynchroSerial` (ver figura 36), que se configuraron para generar las funciones usadas para la implementación del protocolo SPECTRUM.

- **Bean Name:** nombre de la interfaz que emula el protocolo de comunicación serial asíncrono y que está presente en cada una de las funciones generadas por la interfaz. El nombre editado para este parámetro fue AS1.
- **Channel:** canal utilizado para la comunicación serial asíncrona. Se utilizó el módulo 0 de la interfaz de comunicación serial (SCI0) del MC56F8323.
- **Width:** número de bits de información. Este parámetro se ajustó en 8 bits.
- **Input buffer size:** tamaño del buffer de entrada en bytes. Este parámetro se ajustó en 10 para recibir cadenas de caracteres de ese tamaño.

³⁵ ANALOG DEVICES, Inc. (2005). Op.cit., p. 32.

³⁶ Processor Expert For Freescale 56800/E. Op.cit.

- **Output buffer size:** tamaño del buffer de salida en bytes. Este parámetro se ajustó en 10 para enviar cadenas de caracteres de ese tamaño.
- **RxD:** GPIO de la CPU usado para la entrada de datos. Se utilizó el pin no. 64 (TC1_RXD0_GPIOC5) del MC56F8323.
- **TxD:** GPIO de la CPU usado para la salida de datos. Se utilizó el pin no. 1 (TC0_TXD0_GPIOC6) del MC56F8323.

Baud rate: rata de baudios utilizada para la comunicación. Este parámetro se fijó en 37500 baud para permitir cadena de caracteres del tamaño fijado en los buffer de entrada y salida del protocolo SPECTRUM.

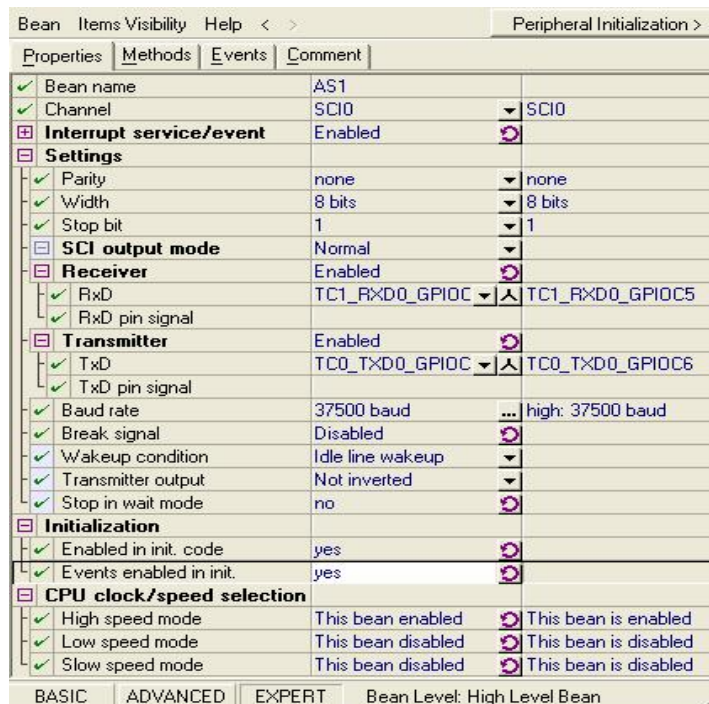


Figura 36. Bean AsynchroSerial

Fuente: Autores del proyecto

Después de configurar los parámetros del Bean AsyncSerial, se compiló el programa para generar las funciones utilizadas en el protocolo SPECTRUM.

Comentario [SJ2]: Contiene una vez se genera, o se programa sobre el generado?

Para implementar los algoritmos del protocolo SPECTRUM que permiten el intercambio de datos entre el MIMP08 y el PC, se utilizaron las siguientes funciones generadas por el Bean AsyncSerial:

- **AS1_GetCharsInRxBuf:** esta función retorna el número de caracteres que están presentes en el buffer de entrada.
- **AS1_RecvBlock:** si algún dato es recibido, esta función retorna el bloque de los datos y su longitud, en caso contrario retorna un código de error.
- **AS1_SendBlock:** permite enviar un bloque de caracteres al canal utilizado para la comunicación serial asíncrona.

En este protocolo de comunicación se definieron una serie de comandos que permiten al usuario configurar y controlar el MIMP08 desde el PC a través del protocolo SPECTRUM. Estos comandos están conformados por 10 caracteres tipo ASCII de la siguiente forma:

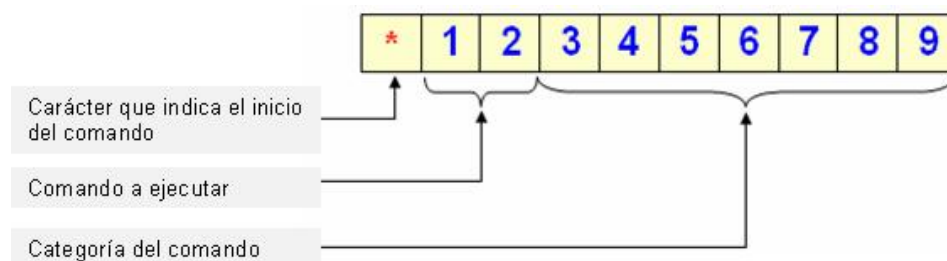


Figura 37. Estructura de comandos del protocolo SPECTRUM

Fuente: Autores del proyecto

Las categorías del comando se dividen en tres:

- Códigos de configuración: **XXXXXX;**
Definen los valores para configurar los parámetros del AD5933. Estos tienen un tamaño que varía de 1 a 6 caracteres numéricos seguidos del carácter punto y coma (;), el cual indica el final del comando.
- Códigos de control: **CNT;**
Son usados para controlar el MIMP08. Estos tienen un tamaño de 3 caracteres seguidos del carácter punto y coma (;), el cual indica el final del comando.
- Códigos que indican error: **CER;**
Indican del estado del comando enviado a través del protocolo SPECTRUM. Estos cuentan con 3 caracteres seguidos del carácter punto y coma (;), el cual indica el final del comando.

Los caracteres especiales de inicio (*) y final (;) de comando se incluyeron en la estructura para garantizar la confiabilidad del protocolo, es decir, que los datos estén libre de errores. Para detectar estos caracteres se implementó un algoritmo de detección de errores³⁷, el cual garantiza que se cumpla la estructura definida para los comandos.

A continuación se presenta la tabla de comandos definidos para el protocolo SPECTRUM. La estructura está basada en los comandos comunes del estándar IEEE 488.2³⁸ usado para instrumentación programable, con la excepción del carácter especial (;) que indica el final del comando.

³⁷ Los códigos del algoritmo se encuentran en el ANEXO A de este libro.

³⁸ Standard digital interface for programmable instrumentation IEEE 488.2, 2004.

Tabla 6. Descripción y nombre de los comandos del protocolo ESPRECTUM

COMANDO	DESCRIPCIÓN
*DACNT;	Entrega la magnitud de la impedancia medida.
*ERCER;	Indica cuando hay un error en el protocolo.
*FIXXXXXX;	Configura el valor inicial del barrido de frecuencia.
*FTCNT;	Indica que la toma de datos ha finalizado.
*IFXXXXXX;	Configura el incremento de frecuencia.
*ITCNT;	Controla el inicio de la toma de datos.
*NIXXX;	Configura el número de incrementos de frecuencia. El máximo número de incrementos es de 511.
*NPXXX;	Configura el número de puntos para promediar los datos. El máximo número de puntos es 511.
*OKCER;	Indica que el dato ha sido recibido correctamente.
*TPXXXXXX;	Configura la toma de datos en un punto de frecuencia.

En la figura 38 se muestra el diagrama en el que se explica el protocolo SPECTRUM para la comunicación entre el MIMP08 y el PC. Esta comunicación comienza cuando el PC envía uno de los comandos que configuran el modo de la toma de datos, MODO DE PROMEDIADO o MODO DE BARRIDO DE FRECUENCIA.

En el modo de promediado, el PC envía los comandos *TPXXXXXX; y *NPXXX; para configurar el punto en el cual se va a tomar el dato y el número de datos utilizados para el promedio, respectivamente. Cada vez que estos son enviados, el MIMP08 responde con un comando de reconocimiento *OKCER;, indicando que ha recibido la instrucción correcta, de lo contrario responde con *ERCER;, para indicar que existe

algún error en la estructura de los comandos. Cuando no se envían los comandos mencionados anteriormente, el MIMP08 toma parámetros por defecto para la toma de datos, realizando un barrido desde 1kHz hasta 100kHz con incrementos de frecuencia de 1kHz y amplitud de la señal de excitación de 2 V.

Una vez configurado el MIMP08, el PC envía el comando *ITCNT; para iniciar la toma de datos; el MIMP08 responde con el comando *FTCNT; para indicar que ha finalizado la toma de datos. Finalmente, el PC envía el comando *DACNT; para leer la magnitud de la impedancia medida.

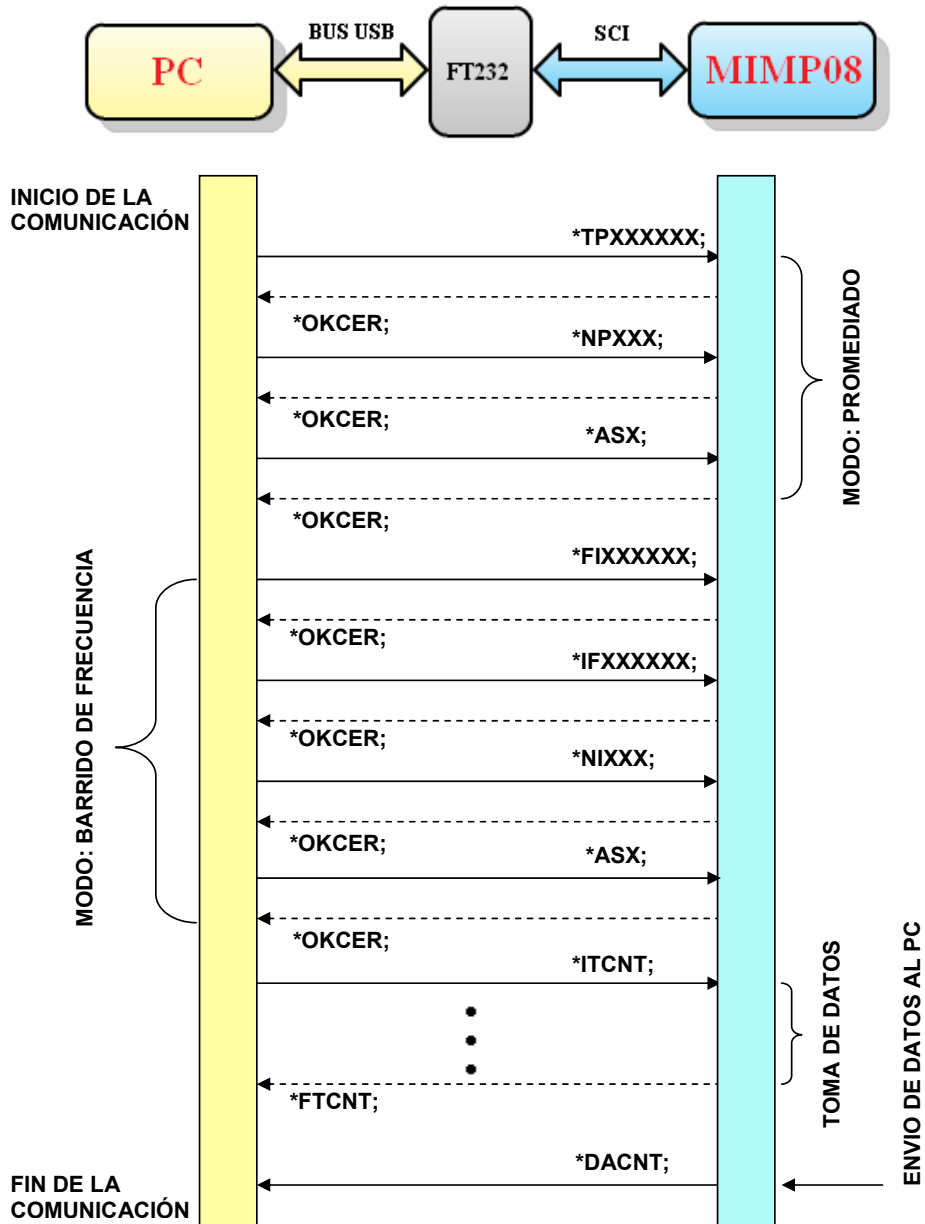


Figura 38. Protocolo SPECTRUM: comunicación MIMP08-PC

Fuente: Autores del proyecto

4.3 PRUEBAS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan las pruebas realizadas con los protocolos de comunicación I2C y SPECTRUM, que permitieron comprobar el correcto funcionamiento de los mismos.

Estas pruebas se realizaron programando un barrido de frecuencia desde 10kHz hasta 20kHz en incrementos de 1kHz. En la tabla 6 se presentan los parámetros que se utilizaron para realizar las pruebas y los códigos correspondientes a cada uno de estos parámetros:

Tabla 7. Parámetros programados para probar los protocolos de comunicación

AMPLITUD DE LA SEÑAL DE EXCITACIÓN: 2Vpp	
Frecuencia Inicial	10kHz
Incremento de Frecuencia	1kHz
Número de Incrementos	11
Código de la Frecuencia Inicial	04E200 hexadecimal
Código del Incremento de Frecuencia	007D00 hexadecimal
Código del Número de Incrementos	000B hexadecimal

En la figura 39 se presenta la secuencia de códigos para cada uno de los comandos de la tabla 6. En esta figura, INICIO y PARADA corresponden a las condiciones que establece el dispositivo maestro (MC56F8323) sobre la línea SDA para comenzar y finalizar el intercambio de datos con el dispositivo esclavo. La DIRECCIÓN DEL ESCLAVO corresponde al código de identificación del AD5933 (0D hex) y el código ESCRIBIR BLOQUE corresponde a un byte (A0 hex) que envía el MC56F8323 para indicar al convertor de impedancias, que se va a enviar una cadena de datos. La DIRECCIÓN DE REGISTRO corresponde a la posición del mapa de registros del AD5933³⁹ en el cual se van a programar los códigos de los comandos presentados

³⁹ Referirse a la sesión 3.2.2 de este libro. Convertor de Impedancia AD5933; p. 30.

en la tabla 6, los cuales están representados en el diagrama como DATOS DEL REGISTRO.

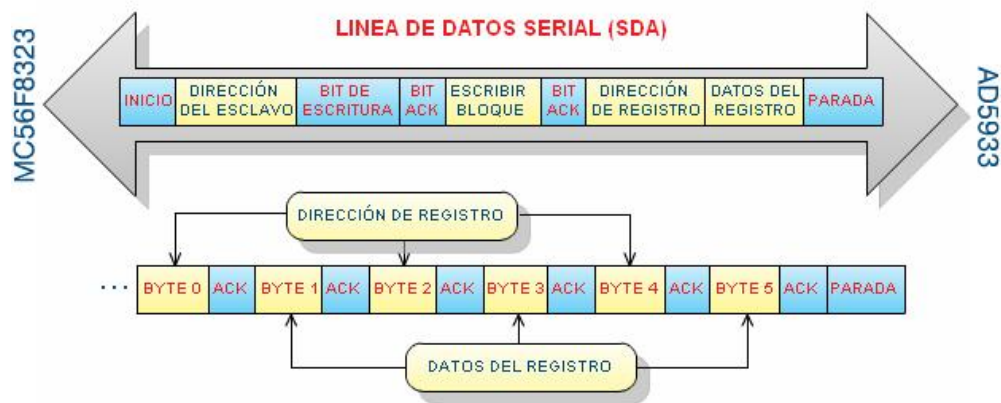


Figura 39. Transmisión de datos a través de la línea SDA del protocolo I2C

Fuente: Autores del proyecto

En las figuras 40, 41 y 42 se muestra la señal de reloj generada en la línea SCL (canal 1) y las señales que representan los datos transmitidos a través de la línea SDA (canal 2). En estas tres gráficas se puede observar que los primeros 7 bits (0001101) después de la condición de inicio corresponden al código de direccionamiento del esclavo. Los siguientes 2 bits de datos corresponden al bit de escritura (0) y el bit de reconocimiento ACK (0) que envía AD5933 hacia el MC56F8323 para indicar que ha recibido los datos. Los últimos bytes de datos corresponden a los códigos de los comandos mostrados en la tabla 6 y a la dirección de registro correspondiente dentro del AD5933⁴⁰.

⁴⁰ Referirse a la sesión 3.2.2 de este libro. Conversor de Impedancia AD5933; p. 30.

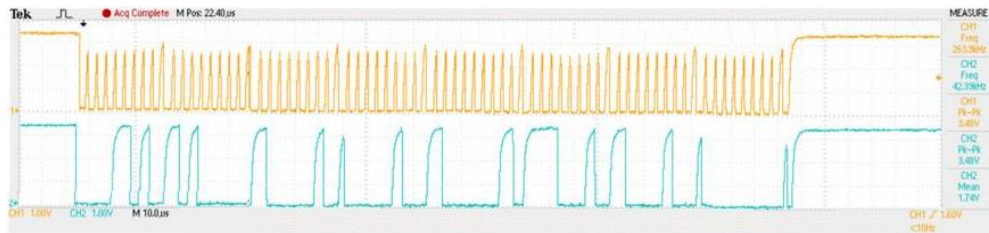


Figura 40. Señales que representan el Código de la Frecuencia Inicial y la dirección de registro correspondiente (ver sesión 3.2). Canal 1: línea SCL; Canal 2: línea SDA

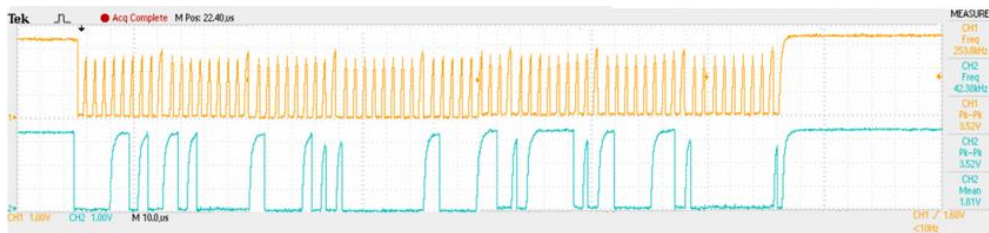


Figura 41. Señales que representan el Código del Incremento de Frecuencia y la dirección de registro correspondiente (ver sesión 3.2). Canal 1: línea SCL; Canal 2: línea SDA

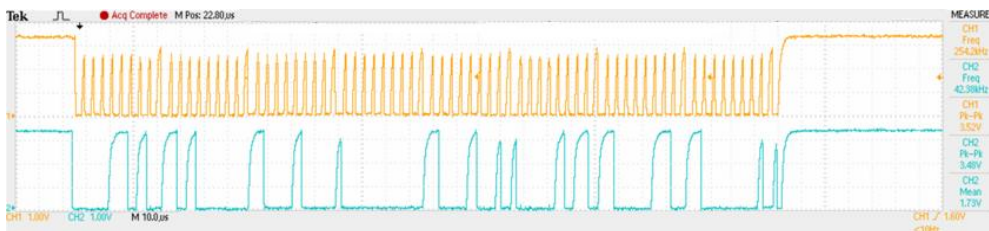


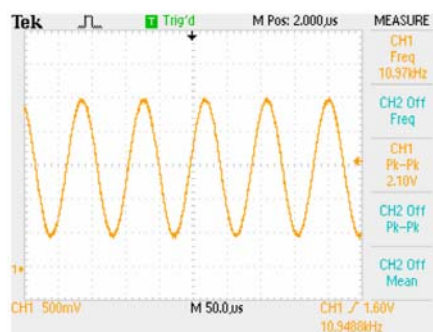
Figura 42. Señales que representan el Código del Número de Incrementos y la dirección de registro correspondiente (ver sesión 3.2). Canal 1: línea SCL; Canal 2: línea SDA

Fuente: Autores del proyecto

A continuación se presentan las señales generadas en el pin *VOUT* del AD5933⁴¹, las cuales se tomaron para verificar que el dispositivo está realizando correctamente las operaciones correspondientes a los parámetros de la tabla 6. En la figura 43 se muestran 3 señales de excitación de las 11 generadas para el barrido de frecuencia programado. La señal de 10kHz indica que el AD5933 está realizando correctamente el parámetro de *INICIO DE FRECUENCIA*; la señal de 11kHz muestra que el AD5933 está realizando el *INCREMENTO DE FRECUENCIA* de 1kHz y la señal de 20kHz indica que el AD5933 está realizando el total del *NÚMERO DE INCREMENTOS*.

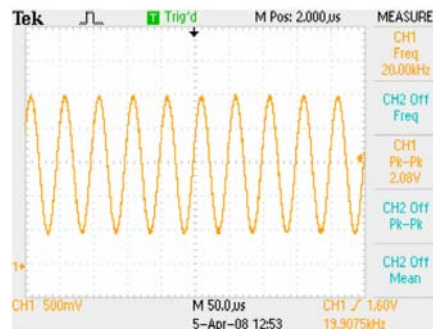


Señal de excitación de 2Vpp en 10kHz



Señal de excitación de 2Vpp en 11kHz

...



Señal de excitación de 2Vpp en 20kHz

Figura 43. Señales de excitación de 2Vpp generadas por el AD5933

Fuente: Autores del proyecto

⁴¹ Referirse a la sesión 3.2.2 de este libro. Conversor de Impedancia AD5933; p. 32.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo, se presentan los resultados de una serie de pruebas realizadas con el MIMP07, que dieron lugar al desarrollo de un nuevo dispositivo para medición de espectro de impedancia eléctrica con una mayor versatilidad y funcionalidad. El resultado de este desarrollo es el MIMP08, el cual permite realizar un barrido de frecuencia desde 1kHz hasta 100kHz y medir impedancias desde 100Ω hasta 10MΩ, inyectando una señal de tensión de 2Vpp en cada punto de frecuencia del barrido y midiendo la señal de corriente; además, dicho equipo cuenta con un sistema de conmutación automático controlado por software para ajustar la escala de medición del AD5933 y un etapa de alimentación basada en dos baterías AAA recargables para suministrar la corriente al procesador digital de señales MC56F832, el cual lee los datos de impedancia del AD5933 y los envía al PC a través del puerto USB. En la sección 5.2 se muestran los resultados obtenidos con el nuevo equipo y finalmente se presenta un análisis de todas las pruebas realizadas.

Comentario [UC3]: Describir las características muy generales de este dispositivo

5.1 PRUEBAS PRELIMINARES CON EL MIMP07

En la primera etapa del proyecto se realizaron pruebas con el medidor de impedancia MIMP07 diseñado e implementado por Luis Fernando Bustamante y Claudia Marcela Martínez⁴² del grupo de investigación CIMBIOS, bajo la dirección de David Alejandro Miranda. Estas pruebas fueron el primer paso para la implementación del sistema de conmutación⁴³ y permitieron entrar en contacto con el conversor de impedancia AD5933. Esto fue de gran importancia para agilizar el desarrollo y conocer más a fondo el funcionamiento del conversor, ya que es un dispositivo recientemente

⁴² BUSTAMANTE, Luis y MARTINEZ, Claudia. Op. cit.

⁴³ Referirse a la sesión 3.4. de este libro. Diseño del sistema de conmutación. P. 45.

introducido en el mercado, con poca disponibilidad de documentación técnica revisada y corregida.

El MIMP07 fue diseñado para la caracterización no destructiva de sólidos porosos, por lo cual su rango de frecuencia se encuentra entre 1kHz y 20kHz, ya que como indica la Ley de Archie, esa es la región del espectro que permite obtener información de las características de estos materiales. Sin embargo, se hicieron pruebas en todo el barrido del conversor (desde 1kHz hasta 100 kHz) para conocer su comportamiento en todo el rango.

Las pruebas se realizaron con resistencias de precisión de hilo bobinado al 2% de tolerancia y con capacitancias cerámicas. Al realizar pruebas con circuitos resistivos puros, se observó que para medidas de resistencia mayor a $1\text{M}\Omega$, el MIMP07 arrojaba valores de impedancia con comportamiento de circuitos RC, por lo cual se recurrió al modelo de la resistencia en frecuencia mostrado en la figura 44.

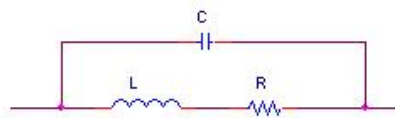


Figura 44. Modelo equivalente para una resistencia de hilo bobinado

FUENTE: BALCELLS, Joseph. FRANCESC, Daura.

Donde L representa la inductancia del devanado y C la capacitancia equivalente que hay entre las espiras. Estos valores dependerán del material y la fabricación del resistor, presentando siempre un comportamiento reactivo, que se hace evidente para altas frecuencias y altos valores de resistencia. Existen en el mercado resistores

para radiofrecuencia hasta del orden de los GHz, con capacitancias e inductancias parásitas muy bajas⁴⁴.

Medición de Impedancia RC, para el ajuste de la resistencia de realimentación

Las pruebas mostradas a continuación se realizaron sobre una resistencia de $1.3\text{M}\Omega$ con una capacitancia en paralelo de 10pF , variando la resistencia de realimentación del conversor, hasta ajustar el valor medido al valor esperado.

Resistencia de realimentación de $1\text{M}\Omega$: al colocar dicha resistencia se observa que el valor medido se empieza a separar del valor esperado a partir de $0.77\text{M}\Omega$, por lo que el barrido de frecuencia solo sigue el comportamiento deseado hasta 12kHz , ver figura 45.

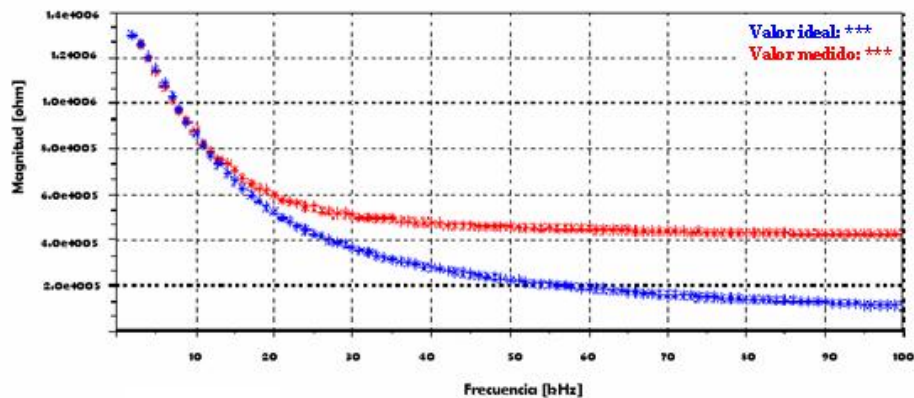


Figura 45. Prueba con $R_{FB} = 1\text{M}\Omega$.

FUENTE: Autores del proyecto.

⁴⁴ BALCELLS, Joseph and Francesc Daura, otros. Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos. Marcombo, 2004. p. 15-17

Resistencia de realimentación de 500kΩ: al cambiar la resistencia de 1MΩ a 500kΩ se obtiene un mejor ajuste hasta una frecuencia de 30kHz, ver figura 46.

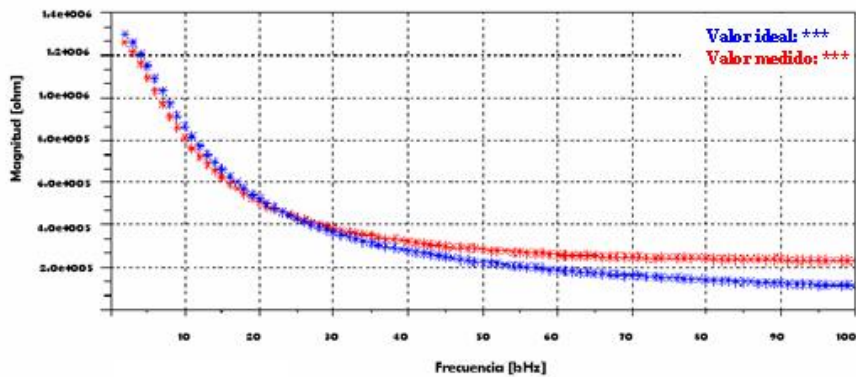


Figura 46. Prueba con RFB = 500kΩ

FUENTE: Autores del proyecto.

Resistencia de realimentación de 100kΩ: cambiando nuevamente la resistencia de realimentación por una de 100kΩ, se observa que la impedancia medida corresponde al valor de impedancia esperado, ver figura 47.

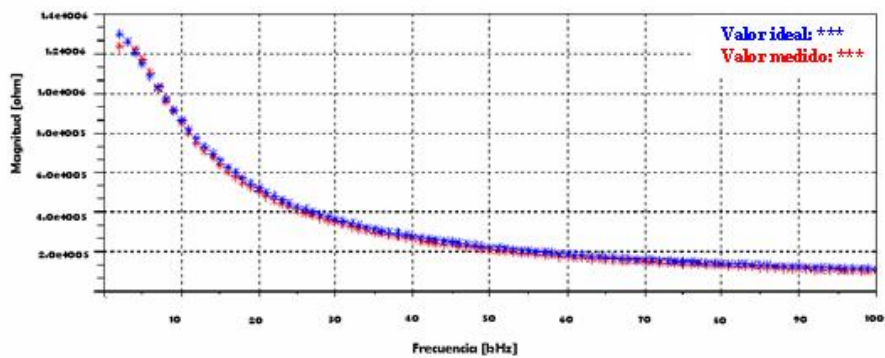


Figura 47. Prueba con RFB = 100kΩ.

FUENTE: Autores del proyecto.

Estas pruebas permitieron observar el comportamiento del AD5933 cuando se cambia su resistencia de realimentación. Los resultados obtenidos fueron fundamentales para el diseño del sistema de conmutación del MIMP08, el cual comienza con una resistencia de realimentación de un valor alto y este va disminuyendo hasta encontrar el valor óptimo para realizar la medida.

5.2 PRUEBAS CON EL MIMP08

A continuación se presentan las pruebas realizadas con el MIMP08 para medición de impedancia eléctrica sobre circuitos RC paralelo para diferentes puntos de frecuencia, presentando los errores obtenidos sobre el valor de magnitud de impedancia.

Prueba No. 1: parámetros utilizados en esta prueba:

Tensión de Excitación = 2 Vpp

Frecuencia Inicial = 1kHz

Incremento de frecuencia = 9 kHz

Número de Incrementos = 10

Resistencia a medir= 6 kΩ

Capacitancia a medir= 0

Tabla 8. Valores obtenidos al medir R=6kΩ y C= 0F.

Punto de Frecuencia [kHz]	Magnitud Ideal [Ω]	Magnitud Medida [Ω]	% de Error
1	6K	2109.7464	64.850
10	6K	5970.3227	0.4900
19	6K	5974.2190	0.4296
27	6K	5969.0573	0.5157
36	6K	5972.6686	0.4555
45	6K	5968.8399	0.5193

54	6K	5966.1140	0.5648
63	6K	5962.9874	0.6169
72	6K	5961.8453	0.6359
81	6K	5975.9167	0.4014

Prueba No. 2: parámetros utilizados en esta prueba:

Tensión de Excitación = 2 Vpp

Frecuencia Inicial = 10kHz

Incremento de frecuencia = 10 kHz.

Número de Incrementos = 10

Resistencia a medir= 10kΩ

Capacitancia a medir= 100pF

Tabla 9. Valores obtenidos al medir R=10kΩ y C= 100pF

Punto de Frecuencia [kHz]	Magnitud Ideal [Ω]	Magnitud medida [Ω]	% de Error
10	99770.554	100618.25	0.8496
20	99091.578	98417.408	0.6804
30	97990.117	96801.275	1.2132
40	96508.005	93826.668	2.7785
50	94697.689	90715.388	4.2053
60	92617.551	86774.815	6.3085
70	90327.442	83208.370	7.8814
80	87884.972	79425.353	9.6257
90	85342.818	75290.404	11.7789
100	82747.094	71551.749	13.5296

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se tomaron medidas sobre circuitos RC paralelo, tanto con el MIMP07, como con el MIMP08. Las medidas realizadas con el MIMP07 presentan comportamientos distintos en la medida de magnitud de la impedancia dependiendo del valor de la resistencia de realimentación debido al efecto de esta sobre la ganancia del conversor análogo-digital del AD5933, el cual se satura dependiendo del valor de dicha resistencia⁴⁵. Cuando la resistencia de realimentación no corresponde a la resistencia con la cual el ADC no se satura, se observa que la curva del espectro de impedancia eléctrica tiende a un valor que no corresponde al valor ideal de la magnitud de la impedancia.

En las medidas hechas con el MIMP08, los porcentajes de error con respecto al valor ideal varían dependiendo del valor de excitación y de la resistencia de realimentación como se muestra en las tablas 7 y 8. En dichas tablas, se observó que los errores coinciden con los arrojados por software de simulación proporcionado por Analog Devices. Además, con los valores medidos se logró comprobar el correcto funcionamiento del sistema de conmutación implementado en el equipo, garantizando así una medida con mínimos porcentajes de error.

Por otra parte, en los dos equipos se presentan altos porcentajes de error a 1kHz. Esto ocurre, debido a que en ambos se usa el reloj interno del AD5933, el cual es de 16.776Mhz⁴⁶. Con este reloj, el ADC del dispositivo utiliza 16 ciclos de reloj para realizar la conversión de las 1024 muestras requeridas, para el cálculo de la DFT (del inglés, Discrete Fourier Transform). Con esta configuración se tiene una frecuencia de muestro de $16.776\text{Mhz}/16\text{ciclos} = 1.048\text{ MSPS}$ (del inglés, Mega Samples per Second). Por lo tanto, para muestrear una señal de 1kHz a 1MSPS, el ADC tomaría

⁴⁵ Referirse a la sesión 3.4. de este libro. Diseño del sistema de conmutación. p. 45.

⁴⁶ Referirse a la sesión 3.2. de este libro. Selección de componentes. p. 29.

1024 muestras por periodo, es decir, que sólo tomaría un periodo de la señal, que al calcular la DFT produce más errores que si tomará mas periodos.

6. CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó un equipo para medir la impedancia eléctrica, haciendo uso de la técnica de dos puntas⁴⁷. Este equipo puede medir impedancias desde 100Ω hasta $10M\Omega$ y realizar un barrido de frecuencia desde 1kHz hasta 100kHz. Para realizar el proceso de conversión de impedancia utiliza el AD5933 de Analog Devices, el cual es controlado por el procesador digital de señales MC56F8323 de Freescale Semiconductor a través de la interfaz I2C. Por otra parte, para el intercambio de datos con el PC utiliza el FT232RL de Future Technology Devices Internacional, el cual provee una interfaz UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) USB-SERIAL para la transmisión de datos a través del puerto USB del PC.
- Se diseñó un sistema de conmutación analógico controlado por software, el cual permite seleccionar automáticamente la resistencia de realimentación adecuada para ajustar la escala de medición del AD5933. Esto elimina la necesidad de cambiar manualmente dicha resistencia para cada medida que se encuentre por fuera del rango del dispositivo. Para su implementación se utilizó el ADG1408, que cuenta con un bajo consumo de potencia, baja distorsión armónica, alta velocidad de conmutación y ancho de banda⁴⁸, apropiado para el barrido de frecuencia que realiza el AD5933. Además puede ser alimentado a 3.3V, que corresponde con el nivel de tensión de todo el sistema.
- Se diseñó una etapa de alimentación capaz de suministrar la potencia necesaria para alimentar el MC56F8323 a partir de dos baterías AAA recargables. La

⁴⁷ Referirse al capítulo 1 de este libro. Método de dos electrodos. p. 11.

⁴⁸ Referirse a la sesión 3.2. de este libro. Selección de componentes. p. 25.

topología de dicha etapa contiene dos reguladores ADM660 conectados en paralelo y en configuración inversora, con el fin de proporcionar tanto el nivel de tensión, como la cantidad de corriente requerida por el MC56F8323 en modo RUN (140mA). La alimentación de los demás dispositivos del MIMP08 fue suministrada a través del regulador de 3.3V que incorpora el FTD232RL. Este dispositivo es alimentado por el puerto USB, que tiene la capacidad de entregar una corriente máxima de 100mA con una tensión de 5V.

- Se diseñó una tarjeta de circuito impreso (PCB) siguiendo las recomendaciones planteadas en el Standard IPC2221⁴⁹. Esta tarjeta brinda estabilidad mecánica y eléctrica al dispositivo. El resultado final es una PCB de 7.5cm de largo y 4.3cm ancho, lo que hace a este impedanciómetro un dispositivo fácil de transportar y muy cómodo para su uso en trabajos de campo.
- Para la comunicación entre el PC y el MIMP08 se implementó el protocolo SPECTRUM, el cual utiliza una serie de comandos que permiten configurar y controlar el equipo. En la estructura de dichos comandos se incluyeron dos caracteres especiales (* al inicio y ; al final), los cuales permiten detectar posibles errores cometidos por el usuario al configurar el equipo o detectar la pérdida de información en la transmisión, garantizando así la toma de datos libre de errores. Por otra parte, para la comunicación entre el MC56F8323 y el AD5933 se implementó el protocolo de comunicación I2C. Este protocolo envía los datos en tramas de 8 bits a una velocidad 250kb/s aproximadamente.
- Una de las principales ventajas que presenta el MIMP08 es disponer de un circuito integrado que realice la generación de la señal de voltaje para excitar la muestra y la medición de la señal de corriente, ahorrando de esta manera la implementación de etapas adicionales tales como: un generador de señales y un

⁴⁹ Standard Printed Board Design, Generic On Board IEEE IPC2221, 1999.

detector síncrono. Además, el MIMP08 presenta dentro de la configuración del sistema conmutación, un sistema de auto escala, el cual ajusta automáticamente la calibración del equipo para realizar el barrido de frecuencia con el menor error posible. Otra ventaja que presenta el equipo diseñado es el área que este ocupa, lo cual se debe al tamaño reducido de sus componentes y a las configuraciones que estos emplean, las cuales presentan pocos elementos externos, permitiendo el diseño de un equipo pequeño y de fácil portabilidad.

- El AD5933 presenta errores considerables para medir impedancias pequeñas ($< 500\Omega$) debido a dos factores: el primero porque el dispositivo no es capaz de proporcionar la corriente requerida por impedancias de ese orden, y el segundo debido a que el valor de la impedancia de salida del dispositivo es comparable con la impedancia medida.
- Los errores que presenta el MIMP08 en el punto de frecuencia de 1kHz se debieron a que el AD5933 funciona a 1MSPS cuando utiliza el oscilador interno que opera a una frecuencia de 16.776MHz, por lo cual el dispositivo solo toma un periodo de la señal de corriente, que no es suficiente para un cálculo eficiente de la transformada de discreta de Fourier, arrojando un dato erróneo en el valor de la impedancia.

7. RECOMENDACIONES

- Implementar un circuito de amplificación externo al AD5933 para atenuar el voltaje de excitación reduciendo así la señal de corriente requerida por la muestra cuando la impedancia medida sea menor a 500Ω y tener en cuenta la impedancia de salida del AD5933 dentro de la calibración del equipo⁵⁰.
- Implementar un circuito divisor de frecuencia que utilice un oscilador externo y conectar la salida de dicho circuito al AD5933, para evitar los errores que se presentan en los puntos de frecuencia menores o iguales a 1kHz ⁵¹ al utilizar el oscilador interno del dispositivo.

⁵⁰ Notas de aplicación del AD5933. www.analog.com.

⁵¹ Notas de aplicación del AD5933. Op. cit.

8. BIBLIOGRAFÍA

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

ANALOG DEVICE, ADG1408/1409 DATASHEET. C-MOS MULTIPLEXERS, 2006.

ANALOG DEVICE, ADM660/8660 DATASHEET. CMOS Switched-Capacitor Voltage Converters, 2002.

BALCELLS Joseph, Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos, Francesc Daura, otros. Marcombo, 2004.

BARSOUKOV, Evgenij, MACDONALD, J. Ross. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

BUSTAMANTE, Luís y MARTINEZ, Claudia. Diseño e Implementación de un Impedanciometro para caracterización no destructiva de sólidos porosos. Bucaramanga, 2007. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas.

FREESCALE SEMICONDUCTOR, Inc., MC56F8323/56F8223, 16 BIT DIGITAL SIGNAL CONTROLLERS, 2007.

Freescale Semiconductor, Inc. Codewarrior™ Development Studio for Freescale™ 56800/E Hybrid Controllers: MC56F83xx/DSP5685x Family Targeting Manual, 2004.

FUTURE TECHNOLOGY DEVICE INTERNATIONAL LTDA, FT232R USB UART I.C., 2005.

MIRANDA, David. Detección precoz de cáncer de cuello uterino basada en espectro de impedancia eléctrica. Bucaramanga, 2005. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas.

OLIVER, L.M. et. An impedimetric sensor for monitoring the growth of staphylococcus epidermidis. Engineering in Medicine and Biology Society. 28th Annual International Conference of the IEEE (Aug. 2006); p. 535-538

ROBLES, Leonor y CHAVEZ, Jair. 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.

SALAZAR, Yolocuautili. Caracterización de tejidos cardiacos mediante métodos mínimamente invasivos y no invasivos basados en espectroscopia de impedancia eléctrica. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Electrónica. p. 40-41.

SEVERANCE, Charles. FireWire Finally Comes Home. IEEE Computer Society. Michigan. Vol. 31, p. 117.

SCHAWN, H.P. Electrical Properties of Tissue and cell Suspensions. In advances in Biological and medical Physics. 5 ed. New York: Acad. Press, 1957.

Standard Printed Board Design, Generic On Board IEEE IPC2221, 1999.

Standard digital interface for programmable instrumentation IEEE 488.2 , 2004.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Impedancia>.

http://processorexpert.com/lnk_mc56800PEPlugIn.php.

<http://www.itma.es/esp/03/equipamiento/idi/equipamientometal115.html>.

ANEXO A. CÓDIGOS

- **BARRIDO DE FRECUENCIA CON EL AD5933**

```
/******RESET******/

void CNF_Reset(byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_RESET[] = {0x81,0x10};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_RESET, block_send, &data_send);
}

/******START FREQUENCY******/

void CNF_FIni(unsigned long FIni,byte block_send,word data_send)
{
    unsigned long Cod_FIni = 0;
    unsigned char reg82 = 0,reg83 = 0,reg84 = 0;
    unsigned char V_CNF_FIni1[2];
    unsigned char V_CNF_FIni2[2];
    unsigned char V_CNF_FIni3[2];

    Cod_FIni = 32*FIni;
    reg82 += (0x00FF0000 & Cod_FIni) >> 16;
    reg83 += (0x0000FF00 & Cod_FIni) >> 8;
    reg84 += (0x000000FF & Cod_FIni);

    V_CNF_FIni1[0] = 0x82;
    V_CNF_FIni2[0] = 0x83;
    V_CNF_FIni3[0] = 0x84;
    V_CNF_FIni1[1] = reg82;
    V_CNF_FIni2[1] = reg83;
    V_CNF_FIni3[1] = reg84;

    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_FIni1, block_send, &data_send);

    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_FIni2, block_send, &data_send);

    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_FIni3, block_send, &data_send);
}
```

```
/******INCREMENT FRECUENCY******/
```

```
void CNF_IFrec(unsigned long IFrec,byte block_send,word data_send)
```

```
{
    unsigned long Cod_IFrec = 0; //este era el error
    unsigned char reg85 = 0,reg86 = 0,reg87 = 0;
    unsigned char V_CNF_IFrec1[2];
    unsigned char V_CNF_IFrec2[2];
    unsigned char V_CNF_IFrec3[2];

    Cod_IFrec = 32*IFrec;
    reg85 += (0x00FF0000 & Cod_IFrec) >> 16;
    reg86 += (0x0000FF00 & Cod_IFrec) >> 8;
    reg87 += (0x000000FF & Cod_IFrec);

    V_CNF_IFrec1[0] = 0x85;
    V_CNF_IFrec2[0] = 0x86;
    V_CNF_IFrec3[0] = 0x87;
    V_CNF_IFrec1[1] = reg85;
    V_CNF_IFrec2[1] = reg86;
    V_CNF_IFrec3[1] = reg87;

    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_IFrec1, block_send, &data_send);

    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_IFrec2, block_send, &data_send);

    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_IFrec3, block_send, &data_send);
}
```

```
/******NUMERO DE INCREMENTOS******/
```

```
void CNF_NInc(unsigned long NInc,byte block_send,word data_send)
```

```
{
    unsigned char regnulo = 0, reg88 = 0,reg89 = 0;
    unsigned char V_CNF_NInc1[2];
    unsigned char V_CNF_NInc2[2];

    regnulo += (0x00FF0000 & NInc) >> 16;
    reg88 += (0x0000FF00 & NInc) >> 8;
    reg89 += (0x000000FF & NInc);
}
```

```

V_CNF_NInc1[0] = 0x88;
V_CNF_NInc2[0] = 0x89;
V_CNF_NInc1[1] = reg88;
V_CNF_NInc2[1] = reg89;

EI2C1_SendChar(0xA0);
EI2C1_SendBlock(&V_CNF_NInc1, block_send, &data_send);

EI2C1_SendChar(0xA0);
EI2C1_SendBlock(&V_CNF_NInc2, block_send, &data_send);
}

/*****MCLK*****/

void CNF_Mclk(byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_CNF_Mclk[] = {0x81,0x00};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_Mclk, block_send, &data_send);
}

/*****NUMERO DE OSCILACIONES*****/

void CNF_NOsc(byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_CNF_NOsc1[] = {0x8A,0x00};
    unsigned char V_CNF_NOsc2[] = {0x8B,0x96};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_NOsc1, block_send, &data_send);
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_NOsc2, block_send, &data_send);
}

/*****MODO STANDBY*****/

void CNT_Standby(byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_CNT_Standby[] = {0x80,0xB1};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNT_Standby, block_send, &data_send);
}

/*****INICIO*****/
void CNT_Inicio(byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_CNT_Inicio1[] = {0x80,0x11};

```

```

    unsigned char V_CNT_Inicio2[] = {0x80,0x21};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNT_Inicio1, block_send, &data_send);
    CNF_NOsc(block_send,data_send);
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNT_Inicio2, block_send, &data_send);
}

/*****INCREMENTE FRECUENCIA*****/
void CNF_AFrec(byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_CNF_AFrec[] = {0x80,0x31}
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_AFrec, block_send, &data_send);
}

/*****REPITA FRECUENCIA*****/
void CNF_RFrec(byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_CNF_RFrec[] = {0x80,0x41};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_CNF_RFrec, block_send, &data_send);
}

/*****FUNCION INICIALIZACION*****/
void CNF_Inicial(byte block_send,word data_send)
{
    CNF_Mclk(block_send,data_send);
    CNT_Standby(block_send,data_send);
    CNF_Reset(block_send,data_send);
    CNT_Inicio(block_send,data_send);
}

/*****RECEPCION DE DATOS*****/
unsigned char CNT_DReal(unsigned char real1,byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_real1[] = {0xB0,0x94};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_real1, block_send, &data_send);
    delay_ms(5);
    EI2C1_RecvChar(&real1);
    return (real1);
}

```

```

unsigned char CNT_DRea2(unsigned char rea2,byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_real2[] = {0xB0,0x95};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_real2, block_send, &data_send);
    delay_ms(5);
    EI2C1_RecvChar(&rea2);
    return (rea2);
}

unsigned char CNT_DImag1(unsigned char imag1,byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_imag1[] = {0xB0,0x96};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_imag1, block_send, &data_send);
    delay_ms(5);
    EI2C1_RecvChar(&imag1);
    return (imag1);
}

unsigned char CNT_DImag2(unsigned char imag2,byte block_send,word data_send)
{
    unsigned char V_imag2[] = {0xB0,0x97};
    EI2C1_SendChar(0xA0);
    EI2C1_SendBlock(&V_imag2, block_send, &data_send);
    delay_ms(5);
    EI2C1_RecvChar(&imag2);
    return (imag2);
}

```

- **CONTROL DEL AD5933**

```

CNF_Inicial(block_send,data_send);

while (okk_==FALSE)
    {
        ok_=FALSE;

        while (ok_==FALSE)
            {

                EI2C1_SendChar(0xB0);
                EI2C1_SendChar(0x8F);
                EI2C1_RecvChar(&reciv);
                reciv=(unsigned char)(reciv & (0x0F));

                if (reciv==0x02 | reciv==0x06)
                    {
                        ok_ = TRUE;
                    }

            }

        if (reciv==0x02)
            {
                rea1 = CNT_DRea1(rea1,block_send,data_send);
                rea2 = CNT_DRea2(rea2,block_send,data_send);
                imag1 = CNT_DImag1(imag1,block_send,data_send);
                imag2 = CNT_DImag2(imag2,block_send,data_send);
                V_real_todo[count_data] = rea2;
                V_real_todo[count_data] += (rea1 << 8);
                V_imag_todo[count_data] = imag2;
                V_imag_todo[count_data] += (imag1 << 8);
                magnitud_todo[count_data] =
                pow(pow((V_real_todo[count_data]),2)+
                pow((V_imag_todo[count_data]),2),(0.5));

                count_data++;
                CNF_AFrec(block_send,data_send);
                EI2C1_SendChar(0xB0);
                EI2C1_SendChar(0x8F);
                EI2C1_RecvChar(&reciv);
                reciv=(unsigned char)(reciv & (0x0F));
            }
    }

```

```

    else
    {
        if (reciv==0x06)
        {
            ok_ = TRUE;
            okk_ = TRUE;
        }
    }
}

```

- **SISTEMA DE CONMUTACIÓN**

```

while (OK_cal==FALSE)
{
    count_send=0;
    Error_sup=0;
    Error_inf=0;
    count_Error=0;

    /*****Inicialización para barrido de Frecuencia*****/
    CNF_FIni(90000,block_send,data_send);
    CNF_IFrec(1000,block_send,data_send);
    CNF_NInc(10,block_send,data_send);
    CNF_Inicial(block_send,data_send);
    /***** Recepción de datos *****/
    count_data = 0;
    okk_ =FALSE;
    while (okk_==FALSE)
    {
        ok_ =FALSE;
        while (ok_==FALSE)
        {
            EI2C1_SendChar(0xB0);
            EI2C1_SendChar(0x8F);
            EI2C1_RecvChar(&reciv);
            reciv=(unsigned char)(reciv & (0x0F));
            if (reciv==0x02 | reciv==0x06)
            {
                ok_ = TRUE;
            }
        }
        Control del ad5933();
        for (count_send; count_send < count_data; count_send++)
    }
}

```

```

    {
        aux_fc = FC[sel];
        Impedancia[count_send]=1/(FC[sel]* magnitud_todo[count_send]);
    }
switch (sel)
{
    case 0: //RFB = 1M
    {
        for (count_send; count_send < count_data; count_send++)
        {
            Error_sup=V_nivel[0]-Impedancia[count_send];
            Error_inf=Impedancia[count_send]-V_nivel[1];
            if ((Error_sup<0) | (Error_inf < 0))
            {
                count_Error++;
            }
        }
        if (count_Error>3)
        {
            sel++;
            BIT_A2_PutVal(TRUE);
            BIT_A1_PutVal(FALSE);
            BIT_A0_PutVal(TRUE);
            OK_cal=FALSE;
        }
        else
        {
            OK_cal=TRUE;
            while (aux_cal < 10)
            {
                FC_opt[aux_cal] = FC_1M[aux_cal];
                aux_cal++;
            }
        }
    }
    break;
}
.
.
.
case 7: // RFB=100
break;
}

```

- **ENVIO DE DATOS AL PC**

```
for (count_send; count_send < count_data; count_send++)
{
    dig_real[5] = ' ';
    aux = (unsigned int) (magnitud_todo[count_send]/10);
    magnitud_todo[count_send] -= aux*10;
    dig_real[4] = magnitud_todo[count_send] + 48;
    magnitud_todo[count_send]= (unsigned int) (aux/10);
    aux -= magnitud_todo[count_send]*10;
    dig_real[3] = aux + 48;
    aux= (unsigned int) (magnitud_todo[count_send]/10);
    magnitud_todo[count_send] -= aux*10;
    dig_real[2] = magnitud_todo[count_send] + 48;
    magnitud_todo[count_send]= (unsigned int) (aux/10);
    aux -= magnitud_todo[count_send]*10;
    dig_real[1] = aux + 48;
    dig_real[0] = magnitud_todo[count_send]+48;

    ASI_SendBlock((byte*)&dig_real[0], sizeof(dig_real[0])*6 , &Received);
    delay_ms(2);//era10
}
```

ANEXO B. MANUAL DE USUARIO DEL MIMP08

Características Eléctricas:

Alimentación: dos baterías AAA recargables de 1.2V, y conexión al puerto USB (suministro de potencia por el puerto 5V, 100mA máx.).

Requerimientos del Sistema:

- Windows XP
- FT232RL drivers
- LabVIEW

DESCRIPCIÓN GENERAL

El MIMP08 es un medidor de espectro de impedancia eléctrica, caracterizado para medir un rango de impedancia desde 100Ω hasta 10MΩ. Puede obtener diferentes configuraciones de barrido que pueden oscilar entre 1kHz Y 100kHz.

DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL MIMP08

La figura 48 muestra un esquema de la vista frontal del MIMP08. La figura 49 muestra la vista superior y la forma de conexión con la muestra a medir o la probeta, y sus partes principales. Las dimensiones del MIMP08 son las siguientes: Largo: 8.5cm, Ancho: 5cm y Alto: 2cm.



Figura 48. Vista Frontal MIMP08

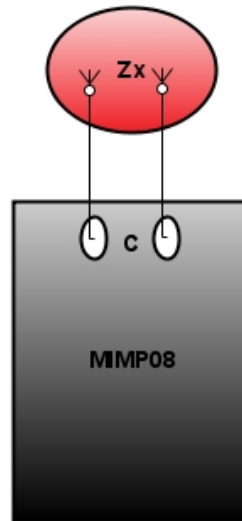


Figura 49. Vista Superior MIMP08

- A: Interruptor Encendido/Apagado**
- B: Puerto USB Tipo B**
- C: Pines para electrodos de medida**

MODO DE USO

Conecte el MIMP08 al PC por medio del puerto USB, si no reconoce el dispositivo debe instalar los controladores del FT232RL, los cuales se pueden descargar de www.ftdi.com

Una vez el PC ha reconocido el MIMP08, el usuario debe conectar la muestra (directamente o a través de la sonda o probeta adecuada para cada aplicación) a los pines mostrados en la figura 49.

Luego de encender el MIMP08, el usuario debe ejecutar el archivo MIMP08.vi que va a servir de interfaz entre el MIMP08 y el usuario. Con este programa el usuario va a tener control de tres variables en la comunicación; la primera variable son los comandos de configuración de barrido, la segunda es el la selección del puerto de comunicación asignado por el PC y la última es el tiempo de ejecución del programa.

Para la configuración del barrido, el usuario debe enviar comando por comando, según la lista de la tabla 1. Para enviar cada comando el usuario debe anteponer el carácter '*' y debe finalizar con el carácter ';'. Una vez el MIMP08 ha recibido un dato exitosamente envía al PC el mensaje *OKCER;, de lo contrario si el MIMP08 detecta errores en el envío del comando el usuario recibirá el mensaje *ERCER;.

Tabla 10. Lista de Comandos para configuración del MIMP08

COMANDO	DESCRIPCIÓN
*FIXXXXXX;	Configura el valor inicial del barrido de frecuencia.
*IFXXXXXX;	Configura el incremento de frecuencia.
*ITCNT;	Controla el inicio de la toma de datos.
*NIXXX;	Configura el número de incrementos de frecuencia. El máximo número de incrementos es de 511.
*NPXXX;	Configura el número de puntos para promediar los datos. El máximo número de puntos es 511.
*TPXXXXXX;	Configura la toma de datos en un punto de frecuencia.

El PC le asigna al MIMP08 un nombre de puerto de comunicación dependiendo del puerto USB que se está usando. El usuario debe seleccionar el nombre del puerto de acuerdo al asignado para MIMP08.

Para el tiempo de ejecución, el usuario debe seleccionar dos segundos cuando se envía datos de configuración. Cuando se envía el comando *ITCNT;, que indica el inicio de la toma de los datos, el MIMP08 tarda entre 15 y 20 segundos máximos para el envío de datos al PC y puedan ser visualizados por el usuario.