



Universidad del Cauca
Programa de Ingeniería en Automática Industrial
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

**Sistema electrónico para la determinación del coeficiente de
amortiguamiento relativo deseado para un geófono**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero en Automática Industrial**

Juan David Sanchez Mesa
Julián Andrés López Ibarra

Director: Mg. Fabio Hernán Realpe
Codirector: Vladimir Trujillo Arias

Popayán, 2019

**Sistema electrónico para la determinación del coeficiente de
amortiguamiento relativo deseado para un geófono**

**Juan David Sanchez Mesa
Julián Andrés López Ibarra**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Programa de Ingeniería en Automática Industrial
Popayán, Cauca
2019**

Resumen

El proyecto descrito en el presente documento está orientado a describir el procedimiento para la estimación de parámetros de un geófono electromecánico a partir de un sistema electrónico automático, el cual posee el desarrollo de una aplicación software para el procesamiento de datos, que son recolectados, posteriormente procesados y así determinar los parámetros fundamentales según las especificaciones de diseño requeridos. La prueba consiste en corroborar los parámetros fundamentales de un geófono dados por el fabricante, luego se modifica el coeficiente de amortiguamiento variando una resistencia, (y se estima de nuevo los coeficientes con el procedimiento descrito para verificar el comportamiento del sistema) esto es realizado para analizar la respuesta del sistema para diferentes valores del damping, por último, para validar el procedimiento de estimación de parámetros se realiza un análisis de ruido blanco en las muestras obtenidas.

Dedicatoria

El presente trabajo va dirigido como una expresión de gratitud a las personas que estuvieron presentes en nuestra formación desde todos los ámbitos, nos permitieron crecer y aportaron un pedacito a lo que hoy en día nos caracteriza como personas, gracias Dios por guiarnos en este hermoso camino que es la vida, por permitirnos ver lo justa y bonita que puede llegar a ser cuando se hacen las cosas bien y de corazón, gracias en especial a nuestras familias por su infinito amor y apoyo incondicional.

Índice general

Resumen	I
Dedicatoria	I
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Trabajos Relacionados	2
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.2. Objetivos Especificos	6
1.4. Resumen de la Propuesta	6
2. Marco Conceptual	7
2.1. Geófono	7
2.2. Definiciones	8
2.2.1. Sistema de Segundo Orden	8
2.2.2. Frecuencia Natural	11
2.2.3. Sistema Lineal	12

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	III
2.2.4. Transformada de Fourier	14
2.2.5. Modelos de Identificación	15
2.2.6. Ruido Blanco	17
2.3. Obtención de parámetros del geófono electromagnético	19
2.4. Identificación de los Parámetros de un Geófono	22
2.4.1. Estimación de los coeficientes de un modelo autoregresivo . . .	27
2.4.2. Determinación de R como función de ζ	28
3. Diseño Hardware y Software	33
3.1. Diseño e implementación hardware del sistema	33
3.1.1. Diseño Hardware	34
3.2. Selección de componentes del sistema	35
3.2.1. Implementación hardware del sistema	51
3.2.2. Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición	51
3.2.3. Diseño de circuito impreso de la tarjeta de adquisición	52
4. Diseño e implementación software del sistema	55
4.1. Programación tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059	56
4.2. Programación interfaz gráfica de usuario	58
4.3. Trasmisión de datos vía radio	60
4.4. Programación para la caracterización del geófono	62
4.5. Caracterización elemento sensor	64

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IV
5. Resultados y Conclusiones	72
5.1. Resultados	72
5.1.1. Coeficiente de amortiguamiento	73
5.1.2. Frecuencia natural	75
5.2. Conclusiones	92
5.3. Bibliografía	95
Bibliografía	95
5.4. Anexos	97
5.4.1. Anexo1	97
5.4.2. Anexo2	99
5.4.3. Anexo3	101
5.4.4. Anexo4	102
5.4.5. Anexo5	103
5.4.6. Anexo6	104
5.4.7. Anexo7	106
5.4.8. Anexo8	108
5.4.9. Anexo9	108
5.4.10. Anexo10	110
5.4.11. Anexo11	111
5.4.12. Anexo12	120
5.4.13. Anexo13	127
5.4.14. Anexo14	130

Índice de figuras

2.1. Representación en el plano complejo del sistema de segundo orden. Extraída de [20].	9
2.2. Respuesta en el tiempo de un sistema de segundo orden. Extraída de [20].	10
2.3. Polos complejos y conjugados de un sistema de segundo orden. Extraída de [21].	11
2.4. Representación de un modelo lineal general. Extraída de [22].	12
2.5. Sistema lineal multivariable. Extraída de [22].	13
2.6. Estructura general de los modelos discretos lineales. Extraída de [17].	15
2.7. Correlación de Residuos Considerando Ruido Blanco. Extraída de [23]	18
2.8. Circuito usado para el ajuste de un geófono (Método Willmore). Fuente Propia	20
2.9. Modelo interno del Geofono	23
2.10. Modelo electrico del geófono.Fuente Propia	24
3.1. Diagrama en bloques del sistema. Fuente Propia	34
3.2. Diagrama en bloques tarjeta de adquisición de datos. Fuente Propia. .	35
3.3. Geófono SM-24. Tomado del datasheet del fabricante.	40

<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	VI
3.4. Tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059. Fuente www.cypress.com	46
3.5. Procesador Lattepanda. Fuente www.lattepanda.com	47
3.6. Módulo Gprs SIM800L. Fuente www.simcom.ee	49
3.7. Foto conexión conversor Serie-USB y HC12. Fuente propia	50
3.8. Carcasa para protección. Fuente www.electricidadbajocoste.com	50
3.9. Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición. Fuente propia.	52
3.10. Caras anterior y posterior de tarjeta de adquisición. Fuente propia.	53
3.11. Capa de componentes y vista 3D de la tarjeta de adquisición. Fuente propia.	54
4.1. Bloques incluidos para el desarrollo y programación de la Tarjeta CY8CKIT-059. Fuente Propia.	57
4.2. Diagrama de Flujo del algoritmo implementado en la tarjeta CY8CKIT-059.	58
4.3. Panel de Usuario para la obtención de datos del geófono.	59
4.4. Diagrama de flujo para la representación del código implementado en el envío de datos del geófono	60
4.5. Bloques incluidos para el desarrollo y funcionamiento del Módulo Gprs.	61
4.6. Diagrama de Flujo para la representación del código implementado en el envío de datos vía Gprs.	62
4.7. Diagrama de Flujo para la representación del código implementado en la obtención de la frecuencia natural del circuito abierto y el coeficiente de amortiguamiento electromagnético	63
4.8. Diagrama de Flujo para la representación del código implementado en el análisis de las pruebas con resistencia variable modificando el coeficiente de amortiguamiento electromagnético.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

VII

4.9. Sistema electrónico para el desarrollo del proyecto. Fuente propia. . .	65
4.10. Circuito para excitación del geófono. Fuente propia.	66
4.11. Respuesta del Geófono 1 a la excitación del circuito de la Figura 4.10. Fuente Propia.	67
4.12. Respuesta del Geófono 2 a la excitación del circuito de la Figura 4.10. Fuente Propia.	67
4.13. Respuesta del Geófono 3 a la excitación del circuito de la Figura 4.10. Fuente Propia.	68
4.14. Circuito para caracterización con resistencia de carga variable. Fuente propia.	69
4.15. Respuesta del Damping del Geófono 1 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.	70
4.16. Respuesta del Damping del Geófono 2 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.	70
4.17. Respuesta del Damping del Geófono 3 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.	71
5.1. Coeficiente de amortiguamiento obtenido para el Geófono 1 tomando 100 pruebas. Fuente propia.	73
5.2. Coeficiente de Amortiguamiento obtenido para el Geófono 2 tomando 100 pruebas. Fuente propia.	74
5.3. Coeficiente de Amortiguamiento obtenido para el Geófono 3 tomando 100 pruebas. Fuente propia.	74
5.4. Frecuencia Natural obtenida para el Geófono 1 tomando 100 pruebas. Fuente propia.	75
5.5. Frecuencia Natural obtenida para el Geófono 2 tomando 100 pruebas. Fuente propia.	75

5.6. Frecuencia Natural obtenida para el Geófono 3 tomando 100 pruebas. Fuente Propia.	76
5.7. Damping obtenido para el Geófono 1 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.	77
5.8. Damping obtenido para el Geófono 2 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.	78
5.9. Damping obtenido para el Geófono 3 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.	78
5.10. Geófono 1, Frecuencia Natural en función de la resistencia variable. Fuente Propia.	79
5.11. Geófono 2, Frecuencia Natural en función de la resistencia variable. Fuente Propia.	79
5.12. Geófono 3, Frecuencia Natural en función de la resistencia variable. Fuente Propia.	80
5.13. Porcentaje de Precisión del Geófono 1 en función de la resistencia variable. Fuente Propia.	80
5.14. Porcentaje de Precisión del Geófono 2 en función de la resistencia variable. Fuente Propia.	81
5.15. Porcentaje de Precisión del Geófono 3 en función de la resistencia variable. Fuente Propia.	81
5.16. Resultado del Damping del Geófono aplicando 10 muestras. Fuente Propia.	82
5.17. Valor de la Media de Resistencia para un Damping de 0.707 aplicando 10 muestras. Fuente Propia.	83
5.18. Gráfica de la mejor autocorrelación de Residuos para el Geófono 1 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

5.19. Gráfica de la mejor autocorrelación de Residuos para el Geófono 2 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.	85
5.20. Gráfica de la mejor autocorrelación de Residuos para el Geófono 3 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.	85
5.21. Gráfica de la peor autocorrelación de Residuos para el Geófono 1 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.	86
5.22. Gráfica de la peor autocorrelación de Residuos para el Geófono 2 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.	87
5.23. Gráfica de la peor autocorrelación de Residuos para el Geófono 3 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.	87
5.24. Gráfica del índice de desempeño en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 1. Fuente Propia.	88
5.25. Gráfica del índice de desempeño en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 2. Fuente Propia.	89
5.26. Gráfica del índice de desempeño en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 3. Fuente Propia.	89
5.27. Gráfica del Damping y la Frecuencia Natural en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 1. Fuente Propia.	90
5.28. Gráfica del Damping y la Frecuencia Natural en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 2. Fuente Propia.	91
5.29. Gráfica del Damping y la Frecuencia Natural en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 3. Fuente Propia.	91
5.30. Gráfica de Sensibilidad en función de la Frecuencia. Fuente Datasheet SM-24	98
5.31. Gráfica de la Fase de Retardo en función de la Frecuencia. Fuente Datasheet SM-24	99

ÍNDICE DE FIGURAS

X

5.32. Diagrama de símbolos Conversor Análogo. Fuente www.cypress.com	99
5.33. Diagrama de símbolos Transmisor Receptor Asíncrono Universal (UART). Fuente www.cypress.com	101
5.34. Diagrama de símbolos Interfaz Periférica Serial (SPI). Fuente www.cypress.com	102
5.35. Diagrama de símbolos Temporizador. Fuente www.cypress.com	103
5.36. Diagrama de Buffer de Lectura (Labview). Fuente propia.	108
5.37. Gráfico de forma de onda (Labview). Fuente www.ni.com	109
5.38. Diagrama de Bloques (Interfaz de Usuario). Fuente Propia	110
5.39. Bloques de Comunicación para el desarrollo y funcionamiento del Módulo Gprs. Fuente Propia.	111
5.40. Configuración del Módulo ADC para el Código Gprs. Fuente Propia.	115
5.41. Bloques de Comunicación para el desarrollo y funcionamiento del Módulo Gprs. Fuente Propia.	116
5.42. Configuración del Módulo ADC para el Código Gprs. Fuente Propia.	117
5.43. Pines de Conexión del Módulo ADC para el Código Gprs. Fuente Propia.	119
5.44. Correlación de Residuos para el Geófono aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.	123

Índice de tablas

2.1. Relación entre el modelo general y los casos especiales. Extraída de [17].	16
3.1. Relación parámetro-peso sensores geófonos.	36
3.2. Características geófonos.	37
3.3. Resultado evaluación sensor geófono	39
3.4. Características tarjetas de desarrollo	42
3.5. Relevancia de parámetros de selección tarjeta de desarrollo.	44
3.6. Resultado evaluación tarjetas de desarrollo	46
3.7. Relación parámetro - % relevancia, módulos de comunicación GPRS .	48
3.8. Características módulos de comunicación GPRS	48
3.9. Resultados evaluación módulos de comunicación GPRS	49
3.10. Resumen Elementos Seleccionados	51
4.1. Características elemento sensor	65
5.1. Valor del ajuste para el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia natural de los 3 Geófonos.	77

ÍNDICE DE TABLAS

XII

5.2. Tablas Rutas de archivos. Fuente www.ni.com 107

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Una de las características esenciales de un geófono es el coeficiente de amortiguamiento relativo, el cual es importante para efectos de métodos sísmicos debido a que en muchas de las aplicaciones de sistemas geofísicos es importante establecer dicho coeficiente para poder encontrar una banda de respuesta de comportamiento lineal, de ahí el hecho de desarrollar un procedimiento el cual permita de una manera sencilla encontrar el coeficiente de amortiguamiento relativo del sistema electromecánico como lo es el geófono.

Al conocer los parámetros del geófono, se podrá utilizar todo su ancho de banda de trabajo ante variaciones en los componentes de frecuencia, según la señal de velocidad asociada a la vibración que se somete, además es factible obtener una respuesta lineal aprovechando el mayor rango dinámico de frecuencias.

Por otro lado, en [2] se expresa como el ajuste realizado, es fundamental para mantener el comportamiento deseado del geófono y mantener un ancho de banda lineal, con un damping de 0.7%, ya que algunas variables ambientales como la presión y la temperatura, modifican las propiedades dinámicas del sensor, lo que conlleva a realizar procedimientos que permitan mantener las características esenciales del geófono.

En la actualidad muchos de los sensores usados para sismica son colocados en campo abierto y se hace imposible llevar acabo ajustes periódicos debido a su ubicación. Los métodos utilizados para realizar el ajuste de los geófonos necesitan de estructuras que son difíciles de acercar a los dispositivos, como por ejemplo: las mesas vibratoras [3], generadores de señales [5], fuentes de audio [10], etc. En este contexto el presente trabajo está orientado a describir un procedimiento para la estimación de parámetros de un geófono electromecánico a partir de un sistema electrónico automático, así la obtención de dichos parámetros permitirá el ajuste de dicho sistema de manera eficiente, autónoma, sin necesidad de acudir a equipos especializados para la determinación de sus parámetros.

1.2. Trabajos Relacionados

En los geófonos electromagnéticos es importante determinar o magnificar la sensibilidad a la velocidad de la función del periodo, esto se hace teniendo en cuenta el modelo físico del geófono. De igual manera para realizar el ajuste se debe conocer dicho modelo, sin embargo, no es posible realizarlo si no se conocen los parámetros como es el amortiguamiento relativo, la frecuencia natural del sistema y el modelo dinámico del sistema. Para esto se utilizan modelos matemáticos experimentales con el fin de identificar el modelo correspondiente a dicho geófono. Lo que se plantea en este trabajo es una metodología donde se aplique un modelo de identificación de tal manera que calcule de forma automática los coeficientes que hacen parte del modelo del geófono electromagnético.

Esto puede hacerse inyectando una FEM (Fuerza electromotriz) sinusoidal en el circuito del sismógrafo y midiendo su respuesta como una función del período de señal [7] o aplicando una señal de paso o de impulso analizando la respuesta [6]. El primer método requiere un generador de señal que puede producir señales de muy baja frecuencia, y el segundo requiere un ordenador analógico o digital. Ambos son adecuados para el uso de observatorios, pero son inadecuados para el uso en campo de operación.

Con la misma rapidez funciona el método presentado por [4] que realiza el cálculo para señalar el damping en cualquier valor de periodo y amortiguamiento natural. La determinación del coeficiente de amortiguamiento del geófono en el caso oscilatorio para valores de amortiguación suficientemente inferiores a los críticos viene dada por la relación entre dos amplitudes consecutivas de oscilación y no implica mayor dificultad.

También es posible la modificación de las características de un sismógrafo por el uso de filtros o por la aplicación de retroalimentación negativa [8]. Ambos métodos proporcionan la misma señal básica a las capacidades de ruido, y cada uno tiene sus ventajas particulares. La ventaja principal del instrumento de realimentación es su flexibilidad y la posibilidad de linealidad sobre un rango dinámico mayor. La aplicación de retroalimentación eléctrica a un geófono requiere la creación de terminales de entrada eléctricos normalmente no existentes. Al incorporar el geófono en un puente de Maxwell equilibrado, los terminales de entrada pueden ser simulados y la retroalimentación introducida a través del puente [8]. Con el uso de dicha retroalimentación negativa, es posible controlar individualmente la masa efectiva, el muelle y las constantes de amortiguación de un geófono, dando como resultado que un instrumento pueda simular geófonos con diferentes propiedades mecánicas.

En el mismo sentido, ha sido empleada una metodología para determinar funciones exactas de respuesta de instrumentos para geófonos, de la Red de periodos largos con ganancia alta (HGLP), en la cual las grabaciones de los impulsos diarios de ajuste transitorio proporcionan un historial detallado de las respuestas variables en el tiempo de las estaciones HGLP [9]. Cuando la función de transferencia de desplazamiento del instrumento está disponible, el conocimiento de la masa del sismómetro, la constante de la bobina y la corriente de ajuste permiten la predicción de la forma y amplitud de la señal de ajuste por simple integración de la función de transferencia. En teoría, la inversa de esta afirmación también es verdadera, pero aparecen problemas en la práctica, ya que el ruido en las grabaciones contamina la función de respuesta del instrumento, función que fue recuperada mediante la diferenciación directa del pulso de ajuste. La función de transferencia desconocida del sistema del geófono se describe en primer lugar por el producto de las respuestas nominales de sus componentes mecánicos y electromagnéticos.

Las variables ambientales como presión y temperatura, juegan un papel importante en la respuesta de los geófonos debido a que modifican el comportamiento dinámico del instrumento [2]. Se han realizado ajustes por medio de este método, en donde se pudo demostrar que, a partir de la impedancia, es posible describir todos los parámetros de respuesta excepto para la masa móvil. El sensor de referencia se puede fabricar con una masa de bobina móvil previamente medida, para que se puedan determinar todos los parámetros del geófono [2]. Alternativamente, el sensor de referencia puede ajustarse utilizando un método de reciprocidad que utiliza tres sensores de vibración, al igual que se ha descrito un método para evaluar la masa móvil del geófono para realizar el ajuste, aunque esta se tiene que realizar en el lugar de trabajo con el método de impedancia.

El análisis sísmico de alta precisión puede extraer información sutil de registros sísmicos, pero requiere el conocimiento de los parámetros de respuesta en el lugar exacto donde se ubicarán los sensores [12], lo que se realiza de esta forma ya que la respuesta del geófono se especifica a temperatura ambiente, sin embargo, varía con la orientación respecto a la gravedad, la temperatura y el envejecimiento. Los cambios debidos a la temperatura y a la inclinación pueden superar los límites de tolerancia, por lo que es necesario realizar el ajuste en el lugar de trabajo para conocer la respuesta exacta.

En consecuencia, se realizaron metodologías para suprimir algunas de las dificultades dichas con anterioridad, una de ellas es la expuesta en [10] en donde se desarrolla una nueva metodología para el ajuste de geófonos basados en fuentes de audio, donde un altavoz de baja frecuencia adecuado reproduce un barrido de frecuencias, estas a su vez son detectadas por el geófono y luego es grabado por un sismógrafo. A continuación, la grabación se transforma en el espacio de frecuencia y se compara con una respuesta de frecuencia de referencia. Aunque este procedimiento no se destina a ajustes rigurosos, es una alternativa económica y rápida a los métodos comunes de ajuste (mesa vibrante y corriente de ajuste) destinados a la detección de geófonos anómalos. [10] Este estudio presenta los resultados de la aplicación de la metodología propuesta a dos tipos diferentes de geófonos de componentes verticales. La respuesta de frecuencia de cada geófono en particular está limitada dentro del 20 % de la respuesta media para las bajas frecuencias consideradas. Se

pueden obtener mejores resultados tomando un mayor número de mediciones para cada geófono y controlando cuidadosamente su inclinación.

No obstante, algunos dispositivos domésticos para ajuste son grandes, de baja precisión y alto consumo de energía, de tal modo que no son aptos para exteriores, además, los dispositivos para ajuste en el extranjero tienen un valor económico alto y sus desempeños no son estables; por estas limitaciones no es posible realizar ajustes de alto rendimiento y bajo costo, por ende algunos no realizan eficazmente la función principal de probar los parámetros de funcionamiento del geófono tal como resistencia de la corriente directa, frecuencia natural, coeficiente de amortiguamiento, sensibilidad, distorsión, entre otros. Por esta razón en [11] se diseña un ajustador de relación de alto rendimiento y bajo costo, basado en matrices de puertas programables por usuario. Algunos experimentos de prueba se cumplen y los resultados muestran que este método portátil de ajuste es de alta precisión, baja potencia y su actualización y mantenimiento son más factibles.

¿Cómo obtener el coeficiente de amortiguamiento relativo deseado mediante el ajuste de una resistencia de carga?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Proponer una técnica para la estimación del coeficiente de amortiguamiento relativo mediante el ajuste de una resistencia de carga.

1.3.2. Objetivos Especificos

- Especificar el procedimiento experimental requerido para realizar la estimación de los parámetros de frecuencia natural y coeficiente de amortiguamiento relativo para un geófono electromagnético.
- Definir la instrumentación necesaria para desarrollar la prueba para la estimación de los parámetros.
- Validar el procedimiento de estimación de parámetros propuesto con una muestra de geófonos electromagnéticos, aplicando una prueba de blancura de ruido de residuos.

1.4. Resumen de la Propuesta

El proyecto descrito en el presente documento está orientado en la estimación de parámetros de un geófono electromecánico que permita encontrar su coeficiente de amortiguamiento y frecuencia natural a partir de la respuesta temporal del mismo, además de la aplicación software y hardware para el procesamiento y análisis de datos que son recolectados.

En los siguientes capítulos se presenta el proceso de diseño, implementación y validación del sistema, así como los resultados obtenidos durante toda la fase de desarrollo. Se inicia con un capítulo dedicado al planteamiento del problema y marco teórico, posteriormente se encuentra un capítulo de diseño e implementación del hardware y el software, para finalizar se tratarán los resultados, conclusiones y trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco Conceptual

Este capítulo presenta la teoría necesaria para el desarrollo de los capítulos posteriores. En la sección 2.1 se presenta una descripción del geófono, funcionamiento general y recepción de datos. En la sección 2.2 se definen los conceptos básicos asociados al sistema, técnicas de identificación y procesamiento de señales. En la sección 2.3 se define la importancia de la obtención de parámetros del geófono electromagnético y de qué forma se va a realizar.

2.1. Geófono

El geófono es la unidad en contacto directo con la superficie terrestre, que convierte el movimiento de la Tierra en señales eléctricas. Funcionan según los mismos principios que un sistema de segundo orden, como el que se emplea en [1] para el registro de aceleración estática (aceleración o valor G) y aceleración dinámica (aceleración centrífuga o lineal), con el objetivo de hacerle un seguimiento a los movimientos terrestres, los geófonos están equipados con amplificadores y registros electrónicos.

Ahora bien, según los diversos tipos de geófonos, el electromagnético [13] es el más sencillo y el más empleado teniendo en cuenta que la mayoría son utilizados para la prospección sísmica a partir de la superficie terrestre firme; Se constituye de una bobina y de un imán. El primero, está fijado rígidamente a la superficie terrestre,

de tal manera que ambos se moverán en respuesta a los movimientos sísmicos, El segundo, es el elemento inerte y cuelga sujetado por un resorte en un soporte fijo.

El voltaje correspondiente a esta fuerza electromotriz es proporcional a la velocidad del movimiento. Por consiguiente, en la superficie terrestre firme se detecta el movimiento de las partículas generado por una fuente energética que relaciona la velocidad de las mismas con el tiempo. Las señales se introducen en un sistema instrumental, el cual entrega la información geológica del subsuelo, basado en los datos detectados y corregidos generando el sistema de medición.

2.2. Definiciones

2.2.1. Sistema de Segundo Orden

Los sistemas descritos por ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes son de gran importancia práctica debido a que muchos sistemas físicos se pueden modelar mediante ecuaciones como éstas y también porque los sistemas de este tipo a menudo se pueden construir de manera adecuada.

El Sistema de Segundo Orden es muy importante para el diseño de controladores ya que habitualmente la mayor parte de los Sistemas pueden ser aproximados a un Sistema de orden dos. La Función de Transferencia de un Sistema de Segundo Orden está definida como se presenta a continuación:

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.1)$$

De esta manera denominamos ω_n a la Frecuencia Natural y ζ al Coeficiente de Amortiguamiento.

Si consideremos polos complejos conjugados ($0 < \zeta < 1$), la respuesta en el tiempo para una entrada escalón está representada de la siguiente manera:

$$y(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \left[\omega_n \left(\sqrt{1-\zeta^2} \right) t + \theta \right] \quad (2.2)$$

Donde el término $\zeta\omega_n$ es la parte Real de los polos complejos y $\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ es la parte Imaginaria.

La Figura 2.1 muestra la representación en el plano complejo de un Sistema de Segundo Orden. Por simplicidad, solo uno de los polos complejos se muestra en la Figura.

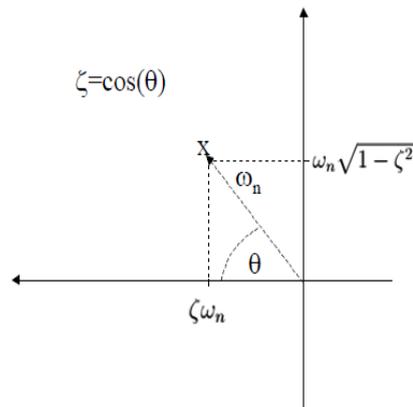


Figura 2.1: Representación en el plano complejo del sistema de segundo orden. Extraída de [20].

La frecuencia natural ω_n es la distancia que existe entre el origen al polo y el coeficiente de amortiguamiento es el coseno del ángulo mostrado en la Figura 2.1.

- Cuando $\zeta = 0$ polos imaginarios puros, sistema críticamente estable y respuesta oscilatoria.
- Cuando $\zeta = 1$ polos reales de multiplicidad 2, sistema críticamente amortiguado.
- Cuando $\zeta \geq 1$ polos puramente reales diferentes, sistema sobreamortiguado.
- Cuando $0 < \zeta < 1$ polos complejos conjugados, sistema subamortiguado.

En la Figura 2.2 se muestra la respuesta en el tiempo del sistema de segundo orden.

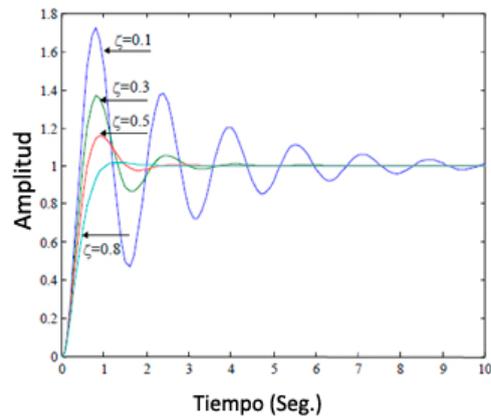


Figura 2.2: Respuesta en el tiempo de un sistema de segundo orden. Extraída de [20].

Cuando el coeficiente de amortiguamiento es cero o cercano a cero el sistema es altamente oscilatorio con una respuesta poco adecuada en un sistema de control. Cuando el coeficiente de amortiguamiento es cercano a uno la respuesta es sobreamortiguada y lenta, también se considera poco apropiada para ser utilizada en algunos sistemas de control debido a que el sistema no será robusto ante las variaciones de los parámetros de la planta o el actuador, además la frecuencia natural no será igual al ancho de banda del sistema, lo que implica que no se puede aprovechar el mayor rango dinámico.[20]

En general el coeficiente de amortiguamiento de un sistema debería diseñarse con valores entre 0.5 a 0.8, un buen parámetro de diseño es escoger un coeficiente de amortiguamiento relativo de 0.707, aquí el ángulo θ de la Figura 2.1 es aproximadamente 45° , con esto se obtiene un comportamiento del sistema ante variaciones en los parámetros de la planta y del actuador más robusto.

De lo anterior podemos decir que el sistema de segundo orden tiene dos parámetros de diseño, la frecuencia natural que está relacionada con la velocidad de respuesta y el coeficiente de amortiguamiento que está relacionado con la forma de onda de la respuesta.

2.2.2. Frecuencia Natural

En los sistemas de segundo orden simples los parámetros son tres: la ganancia estática k , el coeficiente de amortiguamiento ζ , y la frecuencia natural no amortiguada ω_n .

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.3)$$

La frecuencia natural ω_n , corresponde a una velocidad angular constante y sus dimensiones son radianes/segundo. Su interpretación en el dominio complejo es la distancia entre el origen de coordenadas y los polos.

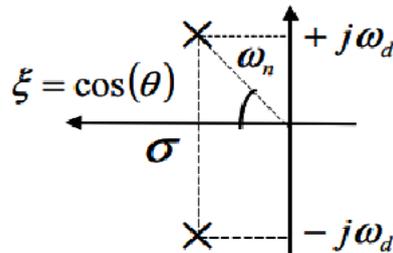


Figura 2.3: Polos complejos y conjugados de un sistema de segundo orden. Extraída de [21].

La frecuencia natural ω_n , será la hipotenusa del triángulo rectángulo formado por la constante de amortiguamiento σ , y la frecuencia de amortiguamiento ω_d :

$$\omega_n^2 = \sigma^2 + \omega_d^2, \quad 0 \leq |\zeta| \leq 1 \quad (2.4)$$

La frecuencia natural es entonces un indicador de la rapidez de la respuesta de un sistema, además es la frecuencia a la que un sistema mecánico seguirá vibrando después de que se quita la señal de excitación.

2.2.3. Sistema Lineal

El modelo lineal general de un sistema puede ser descrito de la siguiente manera:

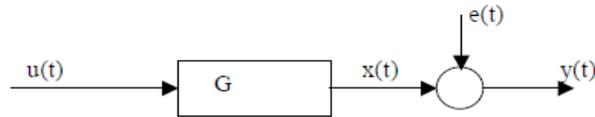


Figura 2.4: Representación de un modelo lineal general. Extraída de [22].

$$y=Gu+He \quad (2.5)$$

La salida medida \mathbf{Y} es debida a la entrada medida \mathbf{U} y al ruido \mathbf{e} . Donde \mathbf{G} denota las propiedades dinámicas del sistema, es decir, cómo la salida se forma desde la entrada. Para sistemas lineales se llama función de transferencia entre la entrada y la salida. \mathbf{H} refiere las propiedades del ruido y se le llama también modelo del ruido, y describe como está formada la perturbación en la salida.

Analizando la respuesta de un sistema, un sistema es lineal si la salida sigue fielmente los cambios producidos en la entrada. En la mayoría de los sistemas de control lineales, la salida debe seguir la misma forma de la entrada, pero en los casos que la salida no verifique la misma forma de la entrada, para ser considerado un sistema lineal la salida deberá reflejar los mismos cambios generados en la entrada [4]. De la linealidad del sistema se desprenden dos propiedades importantes, el principio de escalamiento y el principio de superposición:

- a) Si las entradas son multiplicadas por una constante, las salidas también son multiplicadas por la misma constante.
- b) Los sistemas lineales se caracterizan por el hecho de que se puede aplicar el principio de superposición.

Principio de superposición:

Si un sistema como el mostrado en la Figura 2.5, posee más de una variable de entrada se puede obtener la salida total del sistema como la suma de las salidas parciales, que resultan de aplicar cada entrada por separado, haciendo las demás entradas cero.

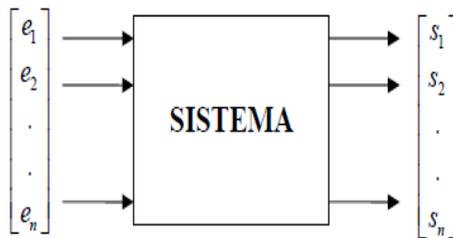


Figura 2.5: Sistema lineal multivariable. Extraída de [22].

$$S_{Total} = S_1 + S_2 + \dots + S_n$$

$$S_{Total} = [FT_1]_{e_2, \dots, e_n=0} * e_1 + [FT_2]_{e_1, \dots, e_n=0} * e_2 + \dots + [FT_n]_{e_1, \dots, e_{n-1}=0} * e_n$$

Dicho de otra forma: Si el sistema es excitado por más de una entrada actuando a la vez, por ejemplo, $e_1(t)$ y $e_2(t)$, siendo $S_1(t)$ la respuesta a la función excitadora $e_1(t)$ anulando $e_2(t)$, y $S_2(t)$ la respuesta a la función excitadora $e_2(t)$ anulando $e_1(t)$. La respuesta total del sistema $S(t)$ a la suma de las dos señales de entrada ($e_1(t) + e_2(t)$) actuando simultáneamente, es igual a la suma de las respuestas individuales a las señales de entrada actuando por separado es decir tomando una entrada a la vez ($S_1(t)+S_2(t)$).

$$E(t) = e_1(t) + e_2(t) \quad \text{Entrada Total}$$

$$S_1(t) = f[e_1(t)]_{e_2=0} = [FT_1]_{e_2=0} * e_1 \quad \text{Salida Parcial 1}$$

Donde $[FT_1]_{e_2=0}$ *Función de Transferencia parcial 1 actuando $e_1(t)$ y anulando $e_2(t)$*

$$S_2(t) = f[e_2(t)]_{e_1=0} = [FT_2]_{e_1=0} * e_2 \quad \text{Salida Parcial 2}$$

Donde $[FT_2]_{e_1=0}$ *Función de Transferencia parcial 2 actuando $e_2(t)$ y anulando $e_1(t)$*

2.2.4. Transformada de Fourier

En señales la transformada de fourier contiene todas las frecuencias del tiempo durante el cual existió la señal, así en la transformada de fourier se obtiene un solo espectro de frecuencias para toda la función. La transformada de fourier, es entonces una transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia, podemos decir que conocer la transformada de fourier de una señal equivale a conocer dicha señal, ya que al aplicar la transformada inversa recuperamos toda la información. [15]

Las series de fourier y la transformada de fourier resultan útiles para estos fines ya que permiten ver la distribución de frecuencias de la señal, esto discretiza la señal permitiendo que se almacenen digitalmente los valores de frecuencias para cada tiempo determinado, luego mediante un DAC (siglas de Digital-to-Analog Converter, conversor digital a analógico en inglés) se leen estos datos y se logra reproducir la señal original. [14]

Usando la transformada de fourier en los datos adquiridos en la prueba de circuito abierto (etapa uno) se obtienen los valores correspondientes a la frecuencia natural del geófono, esto es realizado para analizar los datos en función de la frecuencia.

2.2.5. Modelos de Identificación

Se denomina identificación a la técnica de construir un modelo a partir de las variables medidas del proceso: entradas o variables de control, salidas o variables controladas y, posiblemente, perturbaciones. [17]

La identificación de sistemas basada en modelos lineales es una alternativa para identificar cualquier tipo de proceso real. Se trabaja sobre el análisis de procesamiento discreto y en el área de identificación de sistemas. [18] Los modelos presentados a continuación son paramétricos, esto quiere decir que se asume que son capaces de describir el verdadero comportamiento de un proceso con un número finito de parámetros. Las ecuaciones diferenciales o en diferencias son ejemplos de este tipo de modelos. En ocasiones los parámetros tienen una relación directa con cantidades físicas del proceso, Ej., masa, volumen, longitud, etc.

En la Figura 2.6 se presenta la estructura general de los modelos discretos lineales.

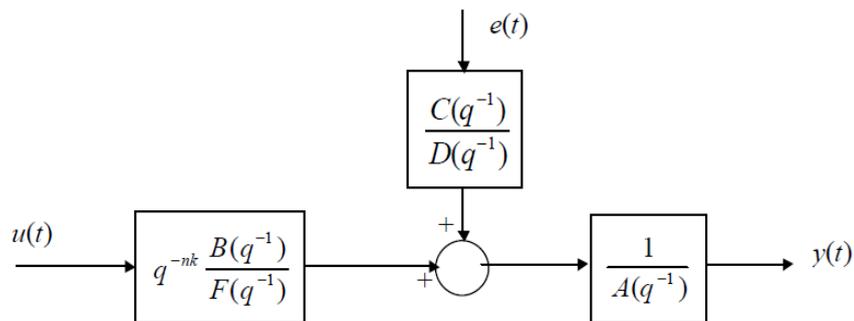


Figura 2.6: Estructura general de los modelos discretos lineales. Extraída de [17].

A partir de la estructura general de un modelo lineal se pueden derivar los modelos específicos por simplificación. En la siguiente tabla se presentan algunos de los modelos.

Polinomios Utilizados de la Figura 2.6	Nombre de la estructura del modelo
B	FIR
AB	ARX
ABC	ARMAX

Tabla 2.1: Relación entre el modelo general y los casos especiales. Extraída de [17].

Los métodos de estimación paramétricos tienen por objetivo estimar los parámetros de los polinomios: A, B, C, D y/o F según el modelo considerado, de forma que el error de predicción sea mínimo. [17]

En este trabajo se utiliza el método de estimación por mínimos cuadrados (LS), el cual estima modelos de estructura ARX. Este método es la técnica básica de identificación paramétrica, es simple si el modelo tiene la propiedad de ser lineal en sus parámetros, así la estimación de los parámetros por este método puede ser calculado analíticamente. [19]

Representación polinomial de la función de transferencia.

Una forma útil de representar G y H es en funciones racionales de q^{-1} . El modelo paramétrico ARX (Auto-Regressive eXogen) corresponde a:

$$G(q) = q^{-nk} \frac{B(q)}{A(q)} \quad H(q) = \frac{1}{A(q)} \quad (2.6)$$

donde B y A son polinomios en el operador de retraso q^{-1} .

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1} \quad (2.7)$$

Los términos na y nb dan cuenta de los órdenes de los polinomios A(q) y B(q) respectivamente y nk es el número de retrasos de la entrada a la salida. [19] Usualmente se escribe el modelo de la siguiente forma:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + e(t) \quad (2.8)$$

De manera explícita el modelo ARX se expresa según:

$$y(t) + a_1y(t - 1) + \dots + y(t - na) = b_1u(t - nk) + b_2u(t - nk - 1) + \dots + u(t - nk - nb + 1) \quad (2.9)$$

Esto da lugar a un sistema de ecuaciones donde las incógnitas a y b serán los coeficientes de la función de transferencia discreta y que se obtienen según mínimos cuadrados.

Mínimos Cuadrados: Un método basado en la minimización de la suma de los cuadrados del error, dicho método minimiza la suma de los cuadrados de la parte derecha menos la parte izquierda con respecto a los coeficientes a y b. Para esto se usa la función `arx` del Matlab. [19]

Este método de estimación paramétrica tiene como objetivo minimizar la suma de los cuadrados de los errores de predicción a partir de modelos lineales con respecto a sus parámetros. La ecuación (2.10) muestra una representación discreta de un sistema dinámico de orden n:

$$y(k) = \Phi(k)^T \theta + e(k) \quad (2.10)$$

Se debe tener presente que todo proceso de medición tiene asociado un componente de ruido, el cual se representa adicionando a la ecuación (2.10) una señal estocástica $e(k)$, que representa un proceso de ruido blanco con media cero.

2.2.6. Ruido Blanco

Además de las resistencias térmicas, existen muchos otros tipos de fuentes de ruido que son gaussianas y tienen una densidad espectral plana sobre un amplio rango de frecuencias, similar a un espectro con todos los componentes de frecuencia en igual proporción, a este tipo de ruido se le conoce como ruido blanco, haciendo analogía a la luz blanca.

El ruido blanco es un modelo conveniente y bastante exacto en sistemas de comunicaciones (señales) y la suposición de un modelo Gaussiano permite que para las aplicaciones en comunicaciones (señales), pueda invocarse las propiedades antes mencionadas. Entonces la densidad espectral del ruido blanco está dada por:

$$G(f) = \frac{N_o}{2} \quad (2.11)$$

Donde N_o representa una densidad constante en la notación estándar. La constante $\frac{1}{2}$ se incluye para indicar que la mitad de la potencia está asociada con las frecuencias positivas y la otra mitad con las frecuencias negativas. Alternativamente N_o representa la densidad espectral unilateral. Ahora, puesto que la densidad espectral es conocida, la función de autocorrelación es obtenida directamente mediante Fourier:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{N_o}{2}\right) e^{j2\pi f\tau} df = \left(\frac{N_o}{2}\right) \delta(\tau) \quad (2.12)$$

De la expresión se puede observar que, de esta manera, cualquier par de muestras de una señal de ruido blanco gaussiano son no correlacionadas y estadísticamente independientes.

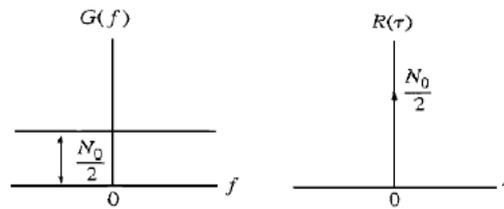


Figura 2.7: Correlación de Residuos Considerando Ruido Blanco. Extraída de [23]

2.3. Obtención de parámetros del geófono electromagnético

Dentro de la literatura referida, se encuentran diversos métodos de ajuste y la mayor parte de los procedimientos desarrollados se basan en la respuesta del sistema frente a una excitación externa inducida. En el método Willmore desarrollado en la década de los 50 se lleva a cabo el ajuste de un sismógrafo electromagnético observando las deflexiones mediante un galvanómetro, cuando se introduce una señal eléctrica a través de un circuito de acoplamiento adecuado. En el método Willmore para calcular la sensibilidad a la velocidad necesitamos conocer la masa del sismómetro, la resistencia de transferencia de la red, y las sensibilidades actuales, periodos libres y Coeficientes de amortiguamiento del sismómetro y galvanómetro. Se puede suponer que la masa del sismómetro y todas las resistencias del circuito se mantienen constantes, y solo necesita ser medido una vez. [7] En cualquier ajuste repetido solo necesitamos determinar $\alpha_s, T_s, \lambda_s, \alpha_g, T_g$ y λ_g . Donde:

λ_g y λ_s son los coeficientes de amortiguamiento del galvanómetro y el sismómetro en el circuito.

T_g y T_s son los periodos libres del galvanómetro y el sismómetro en segundos.

α_g y α_s son las sensibilidades actuales de galvanómetro y el sismómetro en cms / amp.

R_g y R_s son las resistencias del circuito del galvanómetro y del sismómetro en ohmios.

δ_g y δ_s son los coeficientes de amortiguamiento de circuito abierto del galvanómetro y sismómetro.

Esto se puede hacer usando el circuito de prueba que se muestra en la Figura 2.8.

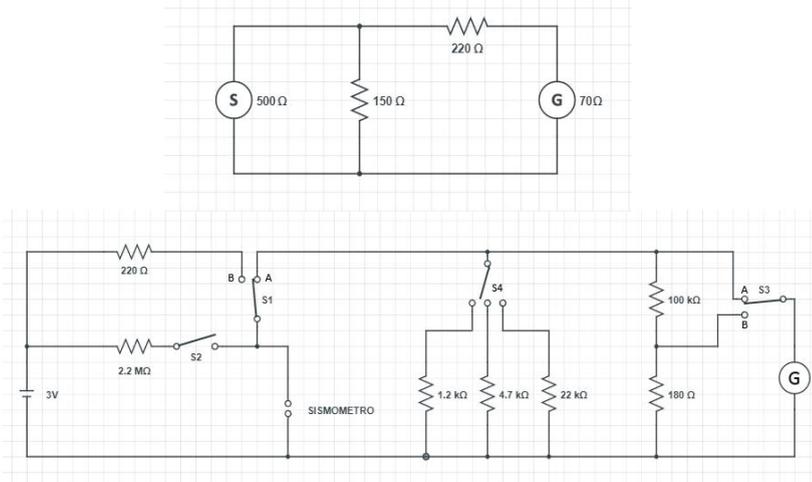


Figura 2.8: Circuito usado para el ajuste de un geófono (Método Willmore). Fuente Propia

Para medir los parámetros del galvanómetro, el sismómetro está desenchufado, los interruptores S_1 y S_3 están en las posiciones A. La grabadora se pone en marcha, y un paso de corriente aplicado al circuito del galvanómetro cerrando S_2 . Esto se hace para tres resistencias diferentes del circuito del galvanómetro seleccionadas por S_4 . Las resistencias del circuito son todas menores que la resistencia de amortiguamiento crítica del galvanómetro, por lo que el coeficiente y el período de amortiguamiento para cada valor de la resistencia del circuito se pueden medir fácilmente en el registro. [7]

El período libre del galvanómetro se encuentra trazando el período de las oscilaciones contra $(1 - \lambda_g^2)^{-\frac{1}{2}}$ y tomando la pendiente. El coeficiente de amortiguamiento se encuentra mediante el trazado de λ_g en contra $\frac{1}{R_g}$ y extrapolando al valor de $\frac{1}{R_g}$ en el funcionamiento del circuito. Si se requiere la reacción del galvanómetro δ_g también se determina a partir de este gráfico. La sensibilidad de la corriente se encuentra midiendo el cambio en la posición de reposo del galvanómetro, y calculando la corriente del galvanómetro a partir de la tensión de la batería y las resistencias del circuito. [7] Los parámetros del sismómetro se encuentran enchufando el sismómetro, abriendo el interruptor S_2 y el interruptor S_3 en posición B. Cuando S_1 se cambia a B se pasa una corriente a través de la bobina del sismómetro que desvía la masa. S_1

se devuelve a la posición A y se registran las oscilaciones de la masa del sismómetro con el galvanómetro.

En este circuito, el galvanómetro se amortigua críticamente y se acopla muy libremente al sismómetro. El hecho de que el período del galvanómetro sea solo una cuarta parte del período del sismómetro garantiza que los transitorios del galvanómetro se puedan ignorar después del primer giro de la masa. Los períodos y los coeficientes de amortiguamiento se miden para cada valor de la resistencia del circuito, el período libre y el coeficiente de amortiguamiento en el circuito operando, de ser necesario δ_s determinado como antes. La sensibilidad actual del sismómetro se determina a partir de la pendiente de la gráfica de λ_s en contra $\frac{1}{Rg}$. [7]

En [8] es una versión especialmente diseñada del puente de Maxwell se utiliza para este propósito, el geófono al igual que el galvanómetro son conectados a un brazo a través de la salida. El puente está equilibrado cuando el geófono está sujeto; cuando el geófono se suelta el galvanómetro comienza a oscilar, produce una amplitud igual a la que sería producida por una aceleración de Tierra proporcional a la corriente del puente.

En [5] la constante de proporcionalidad se encuentra inyectando un voltaje inducido (F.E.M) a través del brazo de relación del puente. Mediante la realización de los experimentos de sustitución en su forma más completa, es posible determinar la masa, la rigidez de la suspensión y la constante de amortiguamiento del sismómetro, incluyendo o excluyendo los efectos de la reacción del galvanómetro.

Para entender el comportamiento de un geófono electromagnético modelado como un sistema oscilante, es de suma importancia tener en cuenta sus reglas de funcionamiento y parámetros. El ajuste de un geófono permite determinar estos parámetros, además de ser modificados a conveniencia por medio de elementos externos como resistencias de carga.

En el movimiento o fuerza dinámica, la vibración se transforma en una señal eléctrica por medio de un detector de vibración transductor. La señal de salida de tensión (voltaje) de un transductor debe ser registrada de forma correcta, para esto se utiliza un instrumento de conversión de señal al valor requerido. La salida del instrumento de conversión de señales, se puede presentar en una pantalla de visualización para una previa inspección.

La modificación de los parámetros, permite ubicar al geófono en un rango de trabajo determinado a la necesidad del estudio a realizar y las condiciones del fenómeno a medir.

Para estimar los parámetros de un geófono electromagnético tales como, resistencia, frecuencia natural, sensibilidad, distorsión y especialmente el coeficiente de amortiguamiento; actualmente se realizan métodos manuales que involucran dispositivos grandes para ajuste, de baja precisión y alto consumo de energía, de tal modo que no son aptos para un análisis paramétrico ágil y automático, además, que son métodos que involucran artefactos con un valor económico alto y sus desempeños no son estables; por estas limitaciones no es posible realizar ajustes de alto rendimiento y bajo costo, asimismo algunos no realizan eficazmente la función principal de probar los parámetros del funcionamiento del geófono antes descritos.

Por esta razón en este trabajo se diseña un sistema que garantice la obtención de los parámetros necesarios del geófono electromagnético de forma económica y automatizada. El diseño del sistema se dará a conocer en los siguientes capítulos que se dividirán en diseño e implementación hardware y diseño e implementación software.

2.4. Identificación de los Parámetros de un Geófono

La figura (2.9) representa la estructura interna de un geófono convencional utilizado como un sismógrafo, la entrada externa $u(t)$ o excitación produce un movimiento vertical el cual genera un desplazamiento interno en función de x , esto produce una diferencia de potencial a la salida como respuesta a la excitación cuya amplitud dependerá de las constantes del resorte y el coeficiente de amortiguamiento.

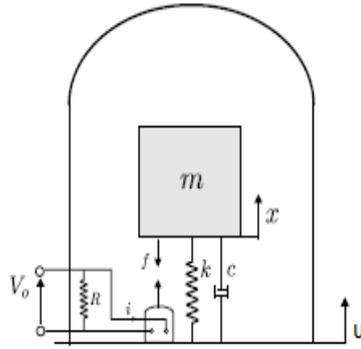


Figura 2.9: Modelo interno del Geofono

El modelo electromecánico equivalente de la figura 2.9 se puede escribir como (2.13).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m\ddot{u} - BlI \quad (2.13)$$

Donde:

m=Masa

c=Coefficiente de amortiguamiento

k=Constante del resorte

B=Densidad de flujo de campo magnetico

l=Longitud del hilo inductor

I=Corriente eléctrica

u=Desplazamiento interno

La constante de generación que define el voltaje inducido en la bobina como consecuencia de los cambios de posición se define como:

$$Eg = Bl\dot{x} \quad (2.14)$$

Si el geófono no se mueve $u(t) \equiv 0$, lo que implica $u'(t) \equiv 0$ y $u''(t) \equiv 0$. En tal caso el nuevo modelo sería:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -BlI \quad (2.15)$$

$$Eg = Bl\dot{x} \quad (2.16)$$

Muchos modelos eléctricos equivalentes han aparecido como representación de los geófonos. [2] recopila cuatro de sus equivalencia eléctricas como la combinación de resistencias e inductores, el modelo eléctrico comúnmente utilizado se observa en la figura (2.10) cuya ecuación puede ser descrita mediante la ley de Ohm (2.17) [8] .

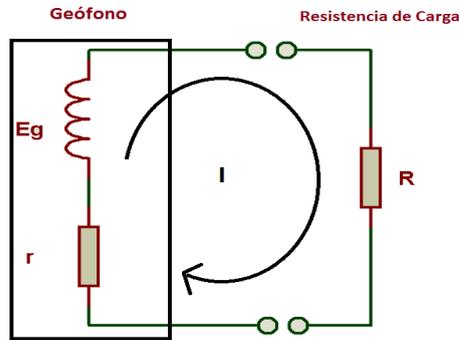


Figura 2.10: Modelo electrico del geófono.Fuente Propia

$$I = \frac{Eg}{r + R} \quad (2.17)$$

Donde:

Eg =Constante de generación, propia del geofono

r =resistencia interna del inductor, propia del geofono

R =resistencia de carga, externa y variable

de (2.16) se obtiene:

$$I = \frac{Bl\dot{x}}{r + R} \quad (2.18)$$

de esta manera la ecuacion (2.15) se convierte en:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -Bl \left[\frac{Bl\dot{x}}{r + R} \right] \quad (2.19)$$

reordenando:

$$m\ddot{x} + \left[c + \frac{B^2 l^2}{r + R} \right] \dot{x} + kx = 0 \quad (2.20)$$

Despues dividimos por la masa

$$\ddot{x} + \left[\frac{c}{m} + \frac{B^2 l^2}{(r + R)m} \right] \dot{x} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (2.21)$$

La ecuación (2.21) representa el modelo matemático del geófono. Este coincide con el modelo característico para un sistema de segundo orden expresado como (2.22).

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x \quad (2.22)$$

Los polos de un sistema subamortiguado de segundo orden de tiempo continuo están dados por:

$$s = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.23)$$

Se sabe que si se realiza la transformación $s = j\omega$ en la función de transferencia $H(s)$ de un sistema de tiempo continuo, se obtiene la función de respuesta en frecuencia del sistema $H(j\omega)$. Ahora se extenderá esta técnica a los sistemas de tiempo discreto y se mostrará que al reemplazar z por $z = e^{j\omega h}$ en la función de transferencia $H(z)$ se obtiene la función de respuesta en frecuencia del procesador de tiempo discreto correspondiente $z \leftrightarrow e^{j\omega h} \quad H(z) \leftrightarrow H(e^{j\omega h})$ donde h es el periodo de muestreo.

Sus equivalentes en tiempo discreto se obtienen aplicando la transformada Z :

$$z = e^{sh}$$

Donde:

s=Los polos del sistema continuo

h= Periodo de muestreo

$$\begin{aligned} z &= e^{[-\zeta\omega n \pm j\omega n \sqrt{1-\zeta^2}]h} \\ z &= e^{-\zeta\omega nh} \cdot e^{\pm(j\omega n \sqrt{1-\zeta^2})h} \\ z &= r e^{j\theta} \quad (2.24) \end{aligned}$$

De las variables r y θ son una representación polar de los polos discretos, que muestran la respuesta al impulso del sistema de segundo orden, estas ecuaciones se pueden expresar como (2.25) para r y (2.26) para θ .

$$r = e^{-\zeta\omega nh} \quad (2.25)$$

$$\theta = \pm\omega n \sqrt{1-\zeta^2}.h \quad (2.26)$$

Las expresiones (2.25) y (2.26) permiten determinar la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguamiento para un sistema discreto de segundo orden. Despejando ωn de (2.26) y ζ de (2.25) así:

$$\omega n = \frac{\theta}{\sqrt{1-\zeta^2}.h} \quad (2.27)$$

y

$$r = e^{\frac{-\zeta\theta h}{\sqrt{1-\zeta^2}.h}}$$

$$\ln(r) = \frac{-\zeta\theta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$(\ln(r))^2 = \frac{\zeta^2\theta^2}{1-\zeta^2} \quad (2.27)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{(\ln(r))^2}{\theta^2 + (\ln(r))^2}} \quad (2.28)$$

2.4.1. Estimación de los coeficientes de un modelo autoregresivo

De aquí las expresiones (2.27) y (2.28) representan la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguamiento para un sistema discreto de segundo orden. Ahora se hace necesario partir de la descripción para un modelo auto regresivo para estimar los coeficientes polares (2.29).

$$\hat{y}(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) \quad (2.29)$$

$$J(a_1, a_2) = \frac{1}{N} \sum_{k=3}^N [y(k) - \hat{y}(k)]^2$$

$$J(a_1, a_2) = \frac{1}{N} \sum_{k=3}^N [y(k) - (-a_1y(k-1) - a_2y(k-2))]^2$$

$$J(a_1, a_2) = \frac{1}{N} \sum_{k=3}^N [y(k) + a_1y(k-1) + a_2y(k-2)]^2$$

$$\hat{y}(k) = \underbrace{[-y(k-1) - y(k-2)]}_{\varphi^T(k-1)} \underbrace{\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}}_{\theta} \quad (2.30)$$

asi

$$\hat{y}(k) = \varphi^T(k-1).\theta \quad (2.31)$$

La ecuación (2.30) se puede optimizar si:

$$\min_{\theta \in R^2} \frac{1}{N} \sum_{k=3}^N [y(k) - \varphi^T(k-1)\theta]^2 \quad (2.32)$$

Donde:

$y(k)$ =valor medido

$\varphi^T(k-1)\theta$ = valor predicho

Derivando con respecto a θ e igualando a cero se obtiene:

$$\theta = \left[\sum_{k=3}^N \varphi(k-1) \cdot \varphi^T(k-1) \right]^{-1} \left[\sum_{k=3}^N \varphi(k-1)y(k) \right] \quad (2.33)$$

O de manera matricial (2.33) se puede expresar como:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \left(\sum_{k=3}^N \begin{bmatrix} y^2(k-1) & y(k-1)y(k-2) \\ y(k-1)y(k-2) & y^2(k-2) \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \left(\sum_{k=3}^N \begin{bmatrix} -y(k)y(k-1) \\ -y(k)y(k-2) \end{bmatrix} \right) \quad (2.34)$$

De la ecuación (2.34) a_1 y a_2 son los coeficientes r y θ o polos del modelo ARX.

2.4.2. Determinación de R como función de ζ

Para determinar el valor de la resistencia de carga, la cual permite modificar el valor de coeficiente de amortiguamiento debemos empezar por comparar las ecuaciones (2.21) y (2.22), de aquí podemos definir (2.35) y (2.36).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.35)$$

Donde:

ω_n =frecuencia natural del sistema

$$2\zeta\omega_n = \frac{c}{m} + \frac{B^2 l^2}{(r+R)m} \quad (2.36)$$

Si despejamos ζ de (2.36) obtenemos:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega n} + \frac{B^2 l^2}{2m\omega n(r + R)} \quad (2.37)$$

Se definen:

$$\zeta_o \cong \frac{c}{2m\omega n} \quad (2.38)$$

$$S_o \cong Bl \quad (2.39)$$

Obteniendo:

$$\zeta = \zeta_o + \frac{S_o^2}{2m\omega n(r + R)} \quad (2.40)$$

Donde:

ζ_o =damping natural del sistema

S_o =constante de generacion electromotriz propia del geófono

Para simplificar la notación se define la siguiente función:

$$\alpha(R) \cong \frac{1}{2m\omega n(r + R)} \quad (2.41)$$

Reemplazando (2.38), (2.39) y (2.41) en (2.37) obtenemos:

$$\zeta = \zeta_o + \alpha(R)S_o^2 \quad (2.42)$$

La ecuación anterior muestra la relación entre el coeficiente de amortiguamiento y la resistencia externa conectada al geófono, la cual será utilizada para calcular el damping deseado. Por otro lado la expresión (2.42) nos muestra una ecuación lineal como función de la resistencia de carga que puede ser estimada al conocer dos puntos de la recta ($\zeta(R1), \alpha(R1)$) y ($\zeta(R2), \alpha(R2)$).

de (2.42) obtenemos:

$$\begin{aligned} \zeta(R1) &= \zeta_o + \alpha(R1)S_o^2 \\ \zeta(R2) &= \zeta_o + \alpha(R2)S_o^2 \end{aligned}$$

La ecuación (2.42) puede ser representada matricialmente como.

$$A^{-1} = \frac{1}{\alpha(R2) - \alpha(R1)} \begin{bmatrix} \alpha(R2) & -\alpha(R1) \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Despejando

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \zeta o \\ So^2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{\alpha(R2) - \alpha(R1)} \begin{bmatrix} \alpha(R2) & -1 \\ -\alpha(R1) & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \delta(R1) \\ \delta(R2) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \zeta o \\ So^2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{\alpha(R2) - \alpha(R1)} \begin{bmatrix} \alpha(R2) & -\alpha(R1) \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(R1) \\ \delta(R2) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \zeta o \\ So^2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{\alpha(R2) - \alpha(R1)} \begin{bmatrix} \alpha(R2)\delta(R1) - \alpha(R1)\delta(R2) \\ -\delta(R1) + \delta(R2) \end{bmatrix} \quad (2.43) \end{aligned}$$

La ecuación (2.43) permitiría calcular de manera directa el valor del coeficiente de generación electromotriz propio del geófono así como el coeficiente de amortiguamiento a la frecuencia natural. Esta ecuación (2.43) tiene una baja exactitud debido a que solo se aprovecha un pequeño rango de la función que proporciona la prueba para el cálculo de la resistencia de carga. Para tener una medida más exacta y aprovechar todo el espectro de la prueba se utiliza una **pseudoinversa** . Redefiniendo la ecuación (2.43) se tiene:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \alpha(R1) \\ 1 & \alpha(R2) \\ \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \\ 1 & \alpha(RN) \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \zeta o \\ So^2 \end{bmatrix}}_{\theta} = \underbrace{\begin{bmatrix} \zeta(R1) \\ \zeta(R2) \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \zeta(RN) \end{bmatrix}}_b \quad (2.44)$$

la ecuación (2.44) puede escribirse de manera general como:

$$A\theta=b \quad (2.45)$$

Despejando de (2.45) θ obtenemos:

$$\theta = (A^T.A)^{-1}.A^T.b \quad (2.46)$$

$$A^T.A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \bullet & \bullet & \bullet & 1 \\ \alpha(R1) & \alpha(R2) & \bullet & \bullet & \bullet & \alpha(RN) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \alpha(R1) \\ 1 & \alpha(R2) \\ \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \\ 1 & \alpha(RN) \end{bmatrix}$$

$$A^T.A = \begin{bmatrix} N & \sum_{j=1}^N \alpha(Rj) \\ \sum_{j=1}^N \alpha(Rj) & \sum_{j=1}^N \alpha^2(Rj) \end{bmatrix}$$

Decimos que:

$$Det(A^T.A) = N \sum_{j=1}^N \alpha^2(Rj) - \left(\sum_{j=1}^N \alpha(Rj) \right)^2$$

Entonces

$$A^T.A = \frac{1}{Det(A^T.A)} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N \alpha^2(Rj) & - \sum_{j=1}^N \alpha(Rj) \\ - \sum_{j=1}^N \alpha(Rj) & N \end{bmatrix}$$

asi:

$$\begin{bmatrix} \delta o \\ S o^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{Det(A^T.A)} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N \alpha^2(Rj) & - \sum_{j=1}^N \alpha(Rj) \\ - \sum_{j=1}^N \alpha(Rj) & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N \zeta(Rj) \\ \sum_{j=1}^N \alpha(Rj)\zeta(Rj) \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

De la ecuación (2.42) se despeja R teniendo una expresión para calcular la resistencia de carga necesaria para alcanzar un ζ así.

$$\zeta^d = \zeta_o + \alpha(R)So^2 \quad (2.48)$$

$$\alpha(R) = \frac{\zeta^d - \zeta_o}{So^2}$$

$$\frac{1}{2m\omega n(r + R)} = \frac{\zeta^d - \zeta_o}{So^2}$$

Escrito de otra forma:

$$2rm\omega n + 2Rm\omega n = \frac{So^2}{\zeta^d - \zeta_o}$$

$$2Rm\omega n = \frac{So^2}{\zeta^d - \zeta_o} - 2rm\omega n$$

Finalmente la expresión de R es:

$$R = \frac{So^2}{(\zeta^d - \zeta_o)2m\omega n} - r \quad (2.49)$$

Donde:

ζ^d = coeficiente de amortiguación deseado

La resistencia en la expresión (2.49) se puede calcular solo si se conoce los valores de la frecuencia natural del sistema, el damping a la frecuencia natural del sistema y la constante de generación electromotriz, para obtener esto valores debemos identificar los parámetros del geófono a partir de la respuesta del sistema frente a una entrada conocida.

Capítulo 3

Diseño Hardware y Software

3.1. Diseño e implementación hardware del sistema

En el presente capítulo se expone el proceso de diseño, selección e implementación a nivel hardware del sistema para censado de señales, adquisición, procesamiento y transmisión de datos.

En la Figura 3.1 se observa un diagrama del sistema propuesto, el cual está compuesto por un receptor de información (Tarjeta de Adquisición Psoc), análisis (Laptop) y el sensor (Geófono).

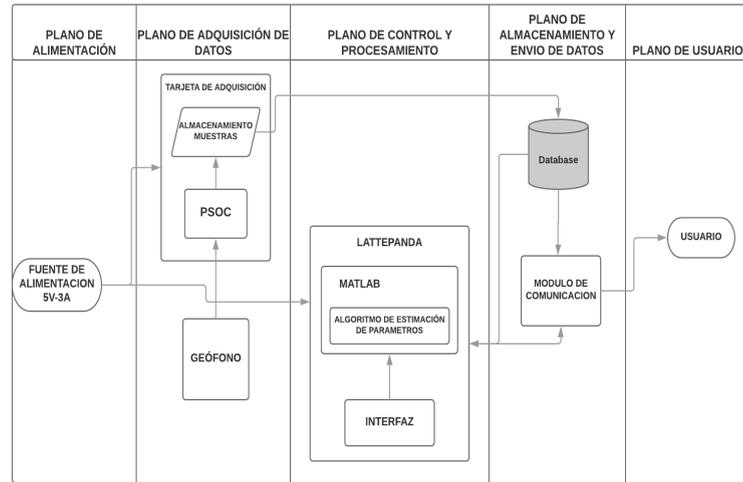


Figura 3.1: Diagrama en bloques del sistema. Fuente Propia

Los temas relacionados con implementación y desarrollo de software se tratarán a detalle en el capítulo 4.

3.1.1. Diseño Hardware

En esta sección se describe el proceso de diseño y elaboración del módulo (tarjeta) principal del sistema, donde se realizan los procesos de censado de señales, adquisición, procesamiento y transmisión de datos. La etapa de diseño es muy importante, debido a que dichos módulos deben tener la capacidad de adquirir los datos generados por un geófono, analizarlos, procesarlos y enviarlos al receptor de información, sin que se pierdan datos en este procedimiento. A continuación, se describen las etapas que conforman el dispositivo y los diseños realizados en cada una de ellas.

En la Figura 3.2 se observa el diagrama en bloques del dispositivo (Tarjeta de Adquisición de Datos).

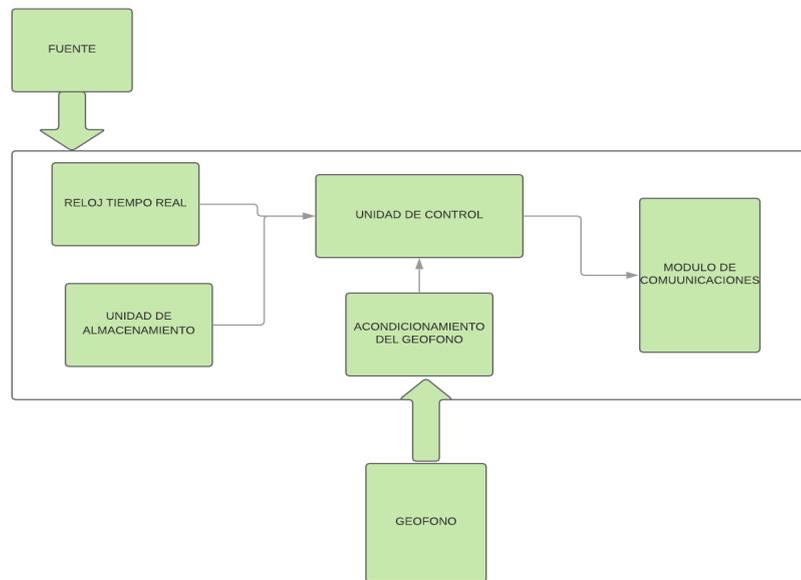


Figura 3.2: Diagrama en bloques tarjeta de adquisición de datos. Fuente Propia.

A continuación, se describe cada uno de los bloques del sistema:

- Censado de señales: elemento encargado de detectar las vibraciones del suelo donde se realiza el estudio.
- Adquisición y procesamiento: corresponde al hardware necesario para obtener una respuesta lineal y aprovechar todo el rango de frecuencias del sistema y es el encargado de contener un algoritmo de procesamiento de señales, gestión de comunicación, adquisición, almacenamiento y posterior transmisión.
- Trasmisión de datos: son los componentes encargados de dirigir la información procesada al usuario.

3.2. Selección de componentes del sistema

El diseño del sistema inicia con la selección de los dispositivos necesarios para este, se dividen en 3 categorías principales: Sensores (geófono, sensor de temperatura y humedad), Procesamiento de Datos (Psoc, Lattepanda) y Transmisión de Datos

(GPRS, HC12). Posteriormente se encuentra descrito el proceso de selección de los elementos del sistema de cada categoría.

- **Sensor**

El proceso de diseño inicia con la selección del elemento geófono, para lo cual se debe tener en cuenta que la Tierra es como un filtro pasa-bajo, ya que las bajas frecuencias son menos atenuadas que las altas. Se utilizan bajas frecuencias del orden de los 10 Hz y altas de 250 Hz. Adicionalmente se analizan otras características importantes, tales como: valor inferior a 292.000COP(100USD) con el fin de mantener el sistema desarrollado funcional a un bajo costo y sensibilidad que permita capturar datos de buena calidad.

Por lo anterior se seleccionan los parámetros que se listan a continuación:

- Frecuencia Natural: Valor dado por el fabricante, el cual debe estar en el rango de frecuencia de los estudios de prospección sísmica, entre 10Hz y 250Hz.
- Precio: valor investigado en tiendas de electrónica. Valor sugerido inferior a 292.000COP(100USD).
- Sensibilidad: valor dado por el fabricante en V/m/sec.

Luego se determinan los porcentajes de relevancia de cada parámetro según la importancia que presentan en el desarrollo del proyecto como se observa en la Tabla 3.1.

#	Parámetro	Relevancia (%)
P1	Frecuencia natural máxima	40
P2	Precio	35
P3	Sensibilidad	25
Total		100

Tabla 3.1: Relación parámetro-peso sensores geófonos.

Los ponderados establecidos para las características de los geófonos se realizaron mediante la opinión o juicio de expertos.

En la Tabla 3.2 se observan los valores de cada parámetro según el sensor evaluado.

Modelo del dispositivo	Frecuencia natural máxima [Hz]	Precio [COP]	Sensibilidad [V/m/sec]
GD-32CT	240	185.000	27.5
SM-24	240	175.000	28.8
SN7C-40Series	300	287.000	31.0

Tabla 3.2: Características geófonos.

Para realizar la selección de los principales dispositivos que componen el sistema del geófono se define una figura de mérito, donde se le asigna un porcentaje de relevancia a cada parámetro, según la importancia que el mismo tenga dentro del sistema, de modo que, aplicando una ecuación de valor, se seleccione el dispositivo más adecuado para el proyecto.

$$ValPar_x = VPre_l_x \left(\frac{ValPE_x}{MVal} \right) \quad (3.1)$$

donde:

$ValPar_x$: corresponde al valor que obtiene el parámetro evaluado.

$VPre_l_x$: corresponde al valor del porcentaje de relevancia asignado al parámetro evaluado.

$MVal$: corresponde al mejor valor que puede tomar el parámetro evaluado.

$ValPE_x$: corresponde al valor del parámetro evaluado.

En el caso de los parámetros correspondientes a costos la relación es inversa a la presentada en la ecuación anterior (el valor ideal es el más bajo entre las opciones disponibles), debido a que el valor más bajo es el mejor para esta característica, la ecuación para evaluar parámetros relacionados con costos se muestra a continuación:

$$ValPar_x = VPre_l_x \left(\frac{MVal}{ValPE_x} \right) \quad (3.2)$$

El valor total de la evaluación de una tecnología está dado por la sumatoria de las puntuaciones que obtiene cada parámetro, como se observa en la siguiente ecuación:

$$EvalTec = \sum VPRel_x \left(\frac{valPE_x}{MVal} \right) \quad (3.3)$$

Donde:

EvalTec : corresponde a la puntuación total obtenida de la evaluación de los parámetros de una tecnología.

A continuación, se procede a aplicar las Ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3 con el fin de obtener la evaluación de cada geófono.

■ Evaluación geófono GD-32CT

- Frecuencia natural máxima

$$ValPar_1 = 40\left(\frac{240}{300}\right) = 32$$

- Precio

$$ValPar_2 = 35\left(\frac{175}{185}\right) = 33.10$$

- Sensibilidad

$$ValPar_3 = 25\left(\frac{27.5}{31.0}\right) = 22.17$$

Resultado de evaluación sensor GD-32CT

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 87.27$$

■ Evaluación geófono SM-24

- Frecuencia natural máxima

$$ValPar_1 = 40\left(\frac{240}{300}\right) = 32$$

- Precio

$$ValPar_2 = 35\left(\frac{175}{175}\right) = 35$$

- Sensibilidad

$$ValPar_3 = 25\left(\frac{28.8}{31.0}\right) = 23.22$$

Resultado de evaluación sensor SM-24

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 90.22$$

■ Evaluación geófono SN7C-40Series

- Frecuencia natural máxima

$$ValPar_1 = 40\left(\frac{300}{300}\right) = 40$$

- Precio

$$ValPar_2 = 35\left(\frac{175}{287}\right) = 21.34$$

- Sensibilidad

$$ValPar_3 = 25\left(\frac{31.0}{31.0}\right) = 25$$

Resultado de evaluación sensor SN7C-40Series

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 86.34$$

Se consignan los resultados obtenidos en la siguiente tabla.

Referencia	GD-32CT	SM-24	SN7C-40Series
Valor evaluación	87.27	90.22	86.34

Tabla 3.3: Resultado evaluación sensor geófono

Según los resultados de la figura de mérito aplicada se obtiene que el sensor más adecuado para el desarrollo del proyecto es el geófono SM-24.

En la Figura 3.3 se observa el interior del geófono SM-24, donde se aprecia la bobina móvil del mismo



Figura 3.3: Geófono SM-24. Tomado del datasheet del fabricante.

Procesamiento de datos

■ Selección de componentes de los módulos de adquisición y Procesamiento de datos

Una vez seleccionado el sensor se procede con el diseño del sistema de adquisición, procesamiento de datos y ajuste. Los cuales se encargarán de capturar las señales entregadas por los sensores, procesarlas y transmitir las respuestas a la LattePanda. Se establecen las siguientes características como base para iniciar el diseño y desarrollo del sistema:

- **Convertor análogo digital (ADC):** uno de los aspectos más importantes en el diseño es contar con una alta resolución de adquisición ya que el fabricante del elemento sensor (geófono) recomienda que la adquisición se realice a 16bits, esto con el fin de no perder información en el proceso.
- **Comunicación vía radio frecuencia con un PC:** se requiere que el sistema se comunique de forma inalámbrica con un PC con el fin de transmitir los datos obtenidos de un geófono.
- **Costo de componentes del sistema:** dar prioridad a elementos que bajo características similares de trabajo presenten los menores costos a nivel comercial.

- **Capacidad de procesamiento acorde con las tareas a desarrollar:** la tarjeta de adquisición del sistema deberá ejecutar múltiples tareas tales como: sincronización en la toma de datos, operaciones de adquisición en cortos periodos de tiempo (2ms aproximadamente, de modo que se obtengan todos los datos generados por los sensores y no se pierda información en el proceso) y gestión de almacenamiento de datos; por lo tanto se requiere que la velocidad y capacidad de procesamiento sean eficientes ante los diferentes requerimientos del sistema.
- Capacidad para almacenar el registro de datos del geófono en el tiempo, más de 60.000 datos, sin riesgo a perder una parte de ellos, para que se procesen los datos y reenvíen al dispositivo los ajustes necesarios para un óptimo funcionamiento.

El software seleccionado para el manejo del módulo de procesamiento de datos es Matlab y Labview, ya que son muy versátiles e integran varias herramientas útiles para el análisis gráfico de datos, además es el software con el que tanto docentes como estudiantes están familiarizados en proyectos de desarrollo e investigación.

Para realizar la implementación de la etapa de control del sistema, se realizó un proceso de investigación de tecnologías afines con el presente proyecto, ya sea por la información disponible, por sus costos o las rápidas curvas de aprendizaje, a continuación, se listan las más relevantes:

- Arduino Uno, de la familia Arduino y compañía Arduino.
- CY8CKIT-059 de la familia PSoC 5LP y compañía Cypress Semiconductors.
- Pinguino PIC® PIC32MX220F032D de la compañía Olimex.

En la Tabla 3.4 se encuentran las características más relevantes de cada tarjeta de desarrollo para el presente proyecto.

Característica	Pinguino	Arduino Uno	CY8CKIT-059
	PIC32MX220F032D	Atmel Atmega328	PSoC® 5LP
Procesador	MIPS32® M4K?	AVR	ARM Cortex-M3
Arquitectura procesador	32 bits	8 bits	32 bits
Memoria de programa (KB)	32	32	256
SRAM (KB)	8	2	64
Convertor ADC	10 bits	10 bits	Delta Sigma de 24bits
Rango de voltaje de operación (V)	2.3 - 3.6V	1.8 - 5.5 V	1.71 - 5.5 V
Costo componentes externos (USD)	15,95	15,95	1.00
Costo tarjeta de desarrollo (USD)	14,82	21,49	10,00

Tabla 3.4: Características tarjetas de desarrollo

Debido a que el fabricante del elemento sensor (geófono), recomienda que la adquisición de las señales se realice a 16 bits, es necesario tener en cuenta que dos de las tarjetas de desarrollo investigadas tienen convertidores ADC de 10 bits por lo que es necesario adicionar un convertor ADC externo con el fin de cumplir con el requerimiento de adquisición de las señales.

Adicionalmente cabe resaltar que es necesario que el convertor ADC permita la adquisición de señales en forma diferencial, de modo que capture valores tanto positivos como negativos, ya que ese es el formato en el que los entrega el geófono, en el caso de las tarjetas de desarrollo Pinguino y Arduino Uno es necesario que el ADC externo presente esa característica o de lo contrario se debe incluir en el diseño un amplificador operacional sumador con el fin de aumentar un nivel de offset para realizar el acondicionamiento de la señal.

El costo aproximado de un convertor ADC de 16bits con entrada diferencial es de 14.95 USD, el cual corresponde a la referencia ADS1115 de la empresa Adafruit.

Por su parte la tarjeta CY8CKIT-059 de Cypress cuenta con un conversor ADC Delta Sigma de 24 bits con entrada diferencial por lo que de ser seleccionada esta opción no es necesario un conversor externo.

A continuación, se describen los parámetros más importantes a tener en cuenta para la selección de la tecnología a implementar en el módulo de control del sistema de geófonos:

1. Costo de la tarjeta de desarrollo: Valor comercial de la tarjeta de desarrollo.
2. Costo componentes externos: Costo de componentes adicionales a la tarjeta de desarrollo para el acondicionamiento de las señales entregadas por un geófono.
3. Arquitectura-procesador: Aspecto importante, da la eficiencia al momento de procesar la información, valor entre 8bits y 32bits entregado por el fabricante del procesador.
4. Memoria SRAM (KB): Es necesario considerar una buena capacidad para almacenar información en la adquisición de datos.
5. Resolución de conversor ADC: La resolución del ADC es uno de los aspectos más importantes en el diseño, ya que el fabricante del geófono recomienda que la adquisición de las señales sea a 16bits.

El porcentaje de importancia asignado a cada parámetro está dado por la relevancia del parámetro evaluado en relación al proyecto, en la Tabla 3.5 se observa la relación parámetro/relevancia. Los ponderados establecidos para las características del módulo de adquisición y procesamiento de datos se realizaron mediante la opinión o juicio de expertos.

#	Parámetro	Relevancia (%)
P1	Costo de la tarjeta de desarrollo	25
P2	Costo componentes externos	15
P3	Arquitectura procesador	15
P4	Memoria SRAM (KB)	15
P5	Resolución de conversor ADC	30
Total		100

Tabla 3.5: Relevancia de parámetros de selección tarjeta de desarrollo.

A continuación, se procede a aplicar las Ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3 con el fin de obtener la evaluación de cada tecnología.

■ Evaluación tarjeta de desarrollo Pingüino

- Costo de la tarjeta de desarrollo

$$ValPar_1 = 25\left(\frac{10}{14.82}\right) = 16.9$$

- Costo componentes externos

$$ValPar_2 = 15\left(\frac{1}{15.95}\right) = 0.9$$

- Arquitectura procesador

$$ValPar_3 = 15\left(\frac{32}{32}\right) = 15$$

- Memoria SRAM (KB)

$$ValPar_4 = 15\left(\frac{8}{64}\right) = 1.9$$

- Resolución de conversor ADC

$$ValPar_5 = 30\left(\frac{10}{24}\right) = 12.5$$

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 47.2$$

■ Evaluación tarjeta CY8CKIT-059

- Costo de la tarjeta de desarrollo

$$ValPar_1 = 25\left(\frac{10}{10}\right) = 25$$

- Costo componentes externos

$$ValPar_2 = 15\left(\frac{1}{1}\right) = 15$$

- Arquitectura procesador

$$ValPar_3 = 15\left(\frac{32}{32}\right) = 15$$

- Memoria SRAM (KB)

$$ValPar_4 = 15\left(\frac{64}{64}\right) = 15$$

- Resolución de conversor ADC

$$ValPar_5 = 30\left(\frac{24}{24}\right) = 30$$

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 100$$

■ Evaluación tarjeta de desarrollo Arduino

- Costo de la tarjeta de desarrollo

$$ValPar_1 = 25\left(\frac{10}{21.49}\right) = 11.16$$

- Costo componentes externos

$$ValPar_2 = 15\left(\frac{1}{15.95}\right) = 0.9$$

- Arquitectura procesador

$$ValPar_3 = 15\left(\frac{8}{32}\right) = 3.8$$

- Memoria SRAM (KB)

$$ValPar_4 = 15\left(\frac{2}{64}\right) = 0.5$$

- Resolución de conversor ADC

$$ValPar_5 = 30\left(\frac{10}{24}\right) = 12.5$$

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 29.3$$

Se consignan los resultados obtenidos en la siguiente tabla.

Parámetro	Pingüino	Arduino Uno	CY8CKIT-059
Procesador	PIC32MX220F032D	Atmel Atmega328	PSoC® 5LP
Valor evaluación	47.2	29.3	100

Tabla 3.6: Resultado evaluación tarjetas de desarrollo

Según los resultados de la figura de mérito aplicada se obtiene que la tecnología más adecuada para el desarrollo del proyecto es la tarjeta CY8CKIT-059 de la empresa Cypress.



Figura 3.4: Tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059. Fuente www.cypress.com

Para la etapa de procesamiento de datos se realiza la estimación del modelo auto-regresivo y la determinación de R como función de ζ con la ayuda de un software matemático matricial, por lo cual se efectúa un proceso de investigación de tecnologías que soporten dicho software matemático y procese gran cantidad de datos. Teniendo en cuenta estas necesidades, se opta por el siguiente dispositivo:

- Procesador LattePanda

Este dispositivo cumple con las características necesarias a diferencia de otros mini-ordenadores, ya que posee memoria integrada, 2Gb de RAM, mejor conectividad, un mejor procesador y un sistema operativo como Windows 10 que es capaz de ejecutar el software matemático que se emplea para el procesamiento de datos.

También es compatible con prácticamente cualquier dispositivo que se requiera conectar, desde mandos de control, otros sensores, webcams, pantallas táctiles, etc. Para trabajos futuros.



Figura 3.5: Procesador LattePanda. Fuente www.lattepanda.com

- Alimentación

Teniendo en cuenta que el sistema de control y procesamiento necesita 5v a 3A, es necesario que el sistema sea alimentado y que permita largos tiempos de trabajo, por lo cual se elige un adaptador genérico, con estas características.

Transmisión de datos

- Módulo GPRS

Siguiendo con el diseño del módulo de transmisión, es necesario el servicio general de paquetes vía radio (GPRS), que se configura y controla por vía UART usando comandos AT enviados desde el controlador. Ideal para el sistema remoto, comunicación recursiva y envío de información a puntos de control (mensajes de texto a celulares e información a una página web).

Se fijan unos parámetros de selección importantes para el proyecto, para lo cual se debe tener en cuenta lo siguiente: el sistema debe tener amplia cobertura de señal y manejar mínimo un estándar de segunda generación (2G), para que se pueda utilizar cualquier operador de servicio telefónico inalámbrico y así tener el sistema siempre en línea. Además, debe tener un soporte de transmisión de alta velocidad, y un bajo consumo de energía como los anteriores dispositivos.

Los ponderados establecidos para las características del módulo de transmisión de datos (módulo GPRS) se realizaron mediante la opinión o juicio de expertos.

Por lo anterior se seleccionan los parámetros que se listan a continuación:

- Cobertura: Valor entregado por el fabricante con el estándar de comunicación.
- Velocidad de transmisión: Valor entregado por el fabricante en Kbps
- Consumo de corriente: Valor entregado por el fabricante en mA
- Precio: Valor investigado en tiendas de electrónica.

#	Parámetro	Relevancia (%)
P1	Cobertura	25
P2	Velocidad de transmisión	30
P3	Consumo de energía	15
P4	Precio	30
Total		100

Tabla 3.7: Relación parámetro - % relevancia, módulos de comunicación GPRS

En la Tabla 3.8 se observan los valores de cada parámetro según la tecnología evaluada.

Referencia dispositivo	Cobertura [generación]	Velocidad de transmisión [Kbps]	Consumo de corriente máx [mA]	Precio [COP]
Mini A6	2	100	3	30.000
SIM800L	2	115.2	0.7	32.000
SIM900A	2	100	5	90.000

Tabla 3.8: Características módulos de comunicación GPRS

Posteriormente se aplican las formulas 3.1, 3.2 y 3.3 para determinar cuál es la tecnología más adecuada para implementar en el proyecto, de lo cual se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 3.9. En el caso del parámetro correspondiente a consumo de energía se utiliza la ecuación 3.2.

Parámetro	Mini A6	SIM800L	SIM900A
Cobertura	25	25	25
Velocidad de transmisión	26.04	30	26.04
Consumo de energía	3.5	15	2.1
Precio	30	28.12	10
Total	84.54	98.12	63.14

Tabla 3.9: Resultados evaluación módulos de comunicación GPRS

Del análisis de los resultados obtenidos se determina que el módulo más adecuado para implementar en el proyecto es el dispositivo SIM800L. En la figura 3.6 se observa una imagen del dispositivo GPRS SIM800L.

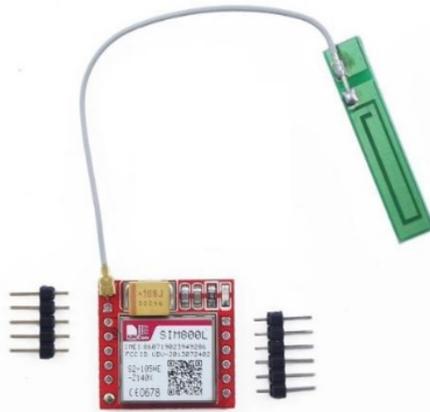


Figura 3.6: Módulo Gprs SIM800L. Fuente www.simcom.ee

Comunicación con Tarjeta Lattepanada

Para establecer la comunicación inalámbrica con la tarjeta Lattepanada es necesario emplear un dispositivo de comunicación como el seleccionado en la etapa de comunicación de la tarjeta de adquisición, de modo que se emplea un dispositivo HC12, el cual se conecta con la tarjeta Lattepanada a través de una interfaz USB que permite tanto el intercambio de datos como la configuración del módulo de comunicación. La interfaz empleada en el proyecto es un convertor Serie-USB (TTL) ya que es un elemento económico y de fácil obtención a nivel comercial. En la figura 3.7 se observa una imagen de la conexión del dispositivo HC12 y el convertor Serie-USB.

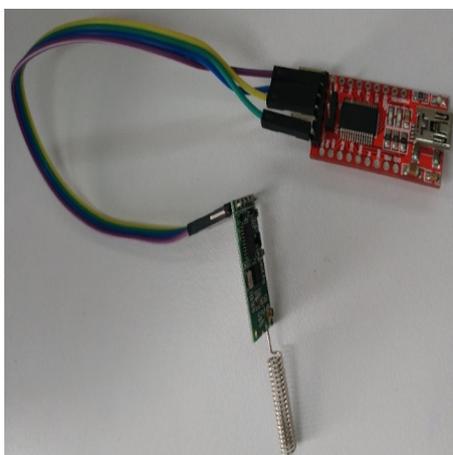


Figura 3.7: Foto conexión conversor Serie-USB y HC12. Fuente propia

En el proceso de toma de datos es necesario contar con un buen recubrimiento de los dispositivos por lo cual lo más recomendable es que la tarjeta de adquisición y la tarjeta Lattepanda estén bien protegidos, con el objetivo de que los datos obtenidos sean de buena calidad. Para esto se diseña una carcasa donde se organicen estos dispositivos, sus principales características son la resistencia y la impermeabilidad. En la Figura 3.8 se observa la carcasa empleada en el presente proyecto.



Figura 3.8: Carcasa para protección. Fuente www.electricidadbajocoste.com

Hasta este punto se han seleccionado los elementos sensores, los elementos de adquisición, procesamiento, ajuste y transmisión de datos, estos son los elementos que hacen parte de los módulos del sistema. En los siguientes capítulos se tratarán los temas de modelado matemático y caracterización del sensor.

Resumen de selección de los elementos software.

Referencia del dispositivo	Tipo de elemento	Porcentaje de evaluación
SM-24	Sensor	90.22
CY8CKIT-059	Procesador	100
SIM800L	Módulo GPRS	98.12
HC12	Conversor Serial-USB	100
LATTEPANDA	Procesador	100

Tabla 3.10: Resumen Elementos Seleccionados

3.2.1. Implementación hardware del sistema

En esta sección se encuentra el diseño electrónico de los bloques que conforman el sistema. Para el diseño de los esquemáticos como para los circuitos impresos PCB, se utiliza la herramienta CadSoft Eagle 5.9.0 versión de evaluación. En el diseño se tuvo en cuenta las reglas que da el fabricante de tarjetas de circuito impreso, en relación a los anchos y distancias entre pistas y dimensiones de pads. A continuación se presenta el diseño esquemático y el diseño del circuito impreso de la tarjeta de adquisición.

3.2.2. Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición

En esta sección se presenta el resultado del diseño de la tarjeta de adquisición el cual se desarrolló con la herramienta CAD CadSoft Eagle. En la Figura 3.9 se observa el diseño esquemático obtenido, donde se encuentra cada etapa descrita en la sección Diseño Hardware.

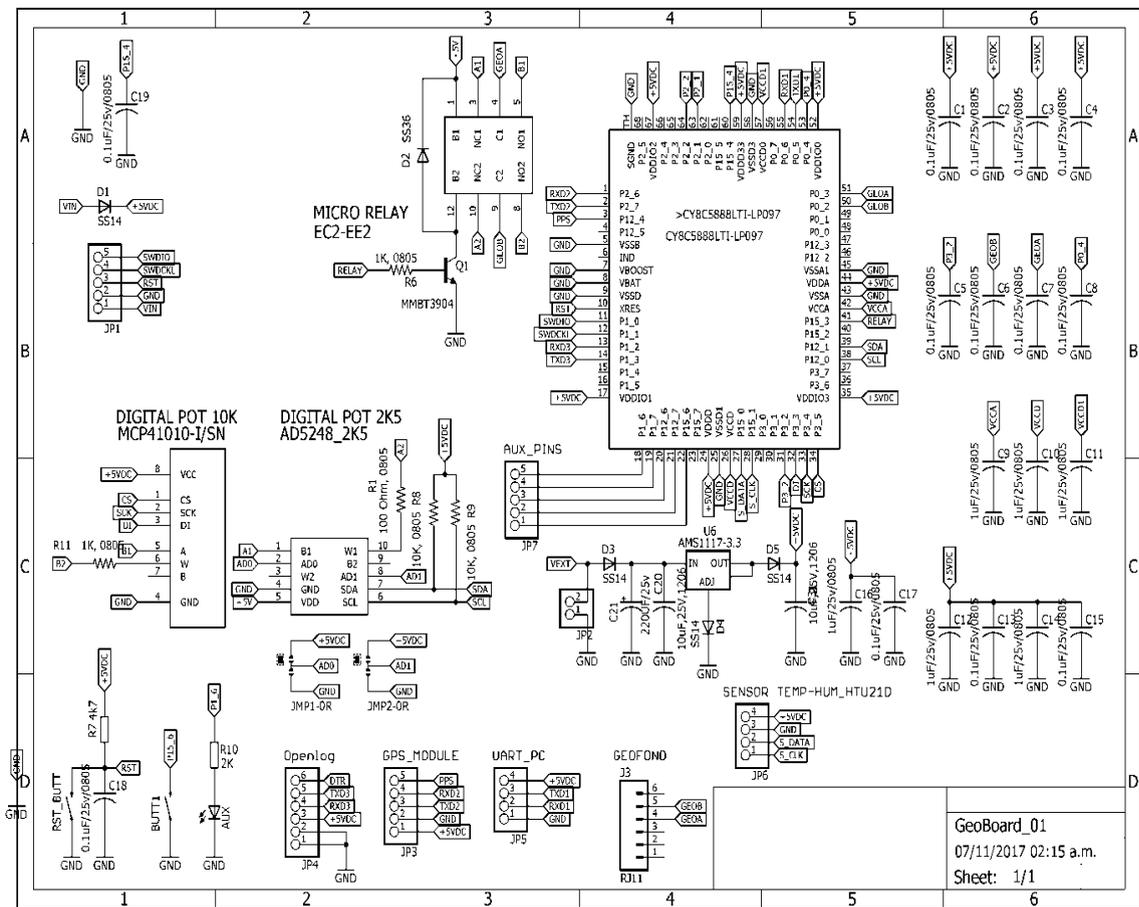


Figura 3.9: Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición. Fuente propia.

3.2.3. Diseño de circuito impreso de la tarjeta de adquisición

El diseño del circuito impreso PCB de la tarjeta de adquisición se obtiene del diseño esquemático presentado anteriormente y un proceso de ruteo manual. El diseño impreso contiene los componentes necesarios para el funcionamiento de la tarjeta de adquisición. En esta sección se presentan imágenes de las caras top, bottom y máscara de componentes.

En la Figura 3.10 se observa la capa top en la parte superior de la imagen (en color rojo) y la capa bottom en la parte inferior de la imagen (en color azul) del diseño del circuito impreso de la tarjeta de adquisición.

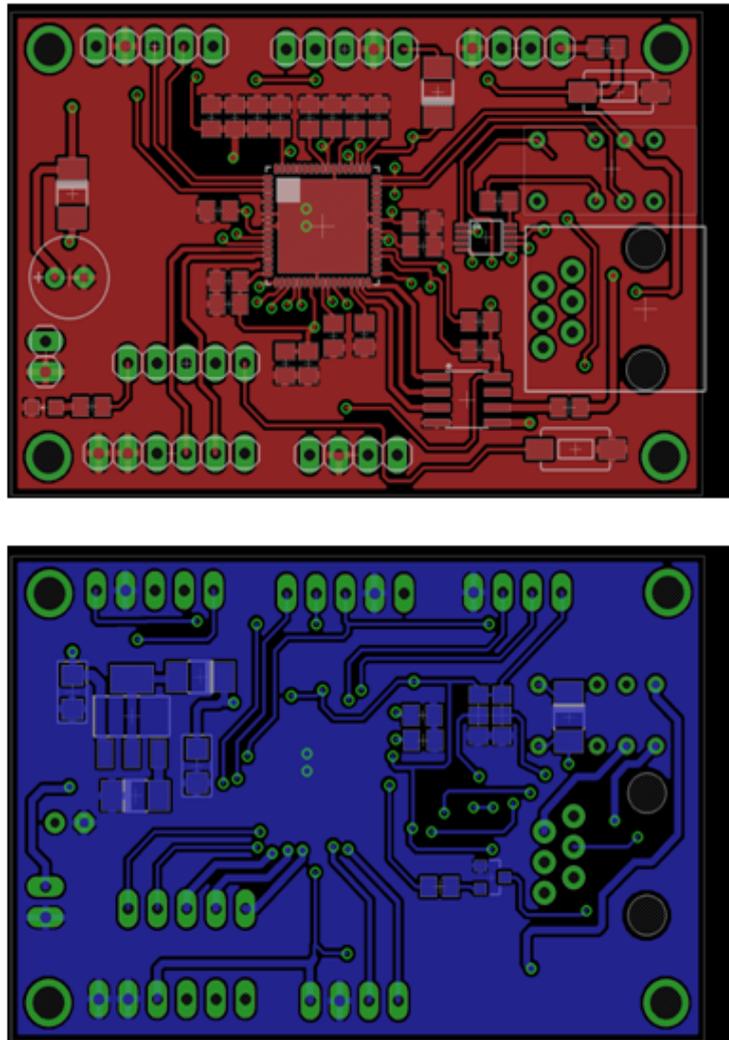


Figura 3.10: Caras anterior y posterior de tarjeta de adquisición. Fuente propia.

En la Figura 3.11 se observa la capa de componentes del diseño del circuito impreso PCB y la imagen en 3 dimensiones de la tarjeta.

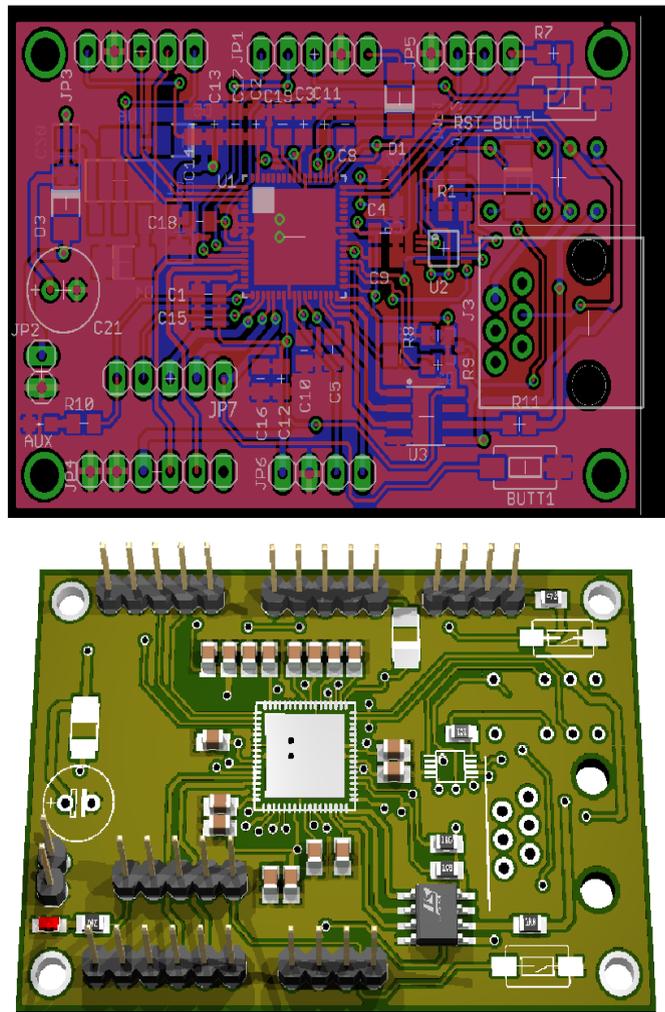


Figura 3.11: Capa de componentes y vista 3D de la tarjeta de adquisición. Fuente propia.

Una vez se tiene fabricada la tarjeta de adquisición que hace parte del sistema del geófono, se realiza el proceso de ensamble, donde son soldados los componentes y montados los módulos que hacen parte de la tarjeta, la cual finalmente es ubicada dentro de la carcasa diseñada anteriormente para protegerla de factores que puedan deteriorarla.

Capítulo 4

Diseño e implementación software del sistema

En el presente capítulo se presenta de manera resumida una descripción de los programas implementados en el desarrollo del sistema. Se trabajaron dos entornos, el primero para la programación de las tarjetas de desarrollo que hacen parte del bloque de control de la tarjeta de adquisición, la cual se programa con el Entorno de diseño integrado (IDE) PSoC® Creator, la licencia que brinda el fabricante es gratuita.

Así mismo se desarrolló una interfaz gráfica para configurar, almacenar y procesar los datos generados por el sistema de geófonos. La plataforma seleccionada fue Labview versión estudiantil ya que brinda un entorno de desarrollo con el cual tanto estudiantes como docentes se encuentran familiarizados, además es amigable con el usuario.

Finalmente se realiza el código de análisis matemático en la plataforma Matlab en la cual se realizará las operaciones matriciales y el análisis de los datos obtenidos.

A continuación, se encuentra la descripción de la implementación del código de la tarjeta de adquisición, posteriormente se encontrará la implementación de la interfaz gráfica y el código de análisis de los datos en Matlab.

4.1. Programación tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059

En la siguiente sección se presenta la programación de la tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059 de la empresa Cypress con el IDE PSoC Creator del mismo fabricante.

El proceso de programación inicia seleccionando los bloques necesarios para el proyecto, los cuales son:

- Convertidor ADC Delta Sigma. Descripción de configuración completa en Anexo 2.
- Módulo de comunicación UART. Descripción de configuración completa en Anexo 3.
- Interfaz Periférica Serial (SPI) Maestra. Descripción de configuración completa en Anexo 4.
- Temporizador (Timer). Descripción de configuración completa en Anexo 5

Se adiciona cada bloque al proyecto como se observa en la Figura 4.1.

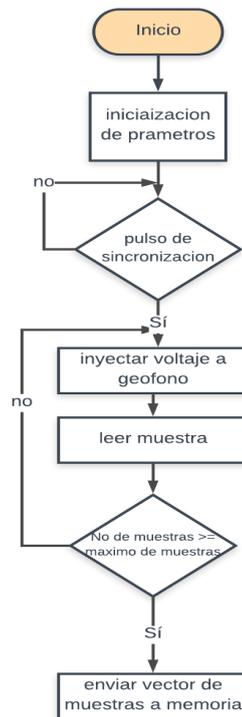


Figura 4.2: Diagrama de Flujo del algoritmo implementado en la tarjeta CY8CKIT-059.

4.2. Programación interfaz gráfica de usuario

En la siguiente sección se presenta la programación de la interfaz gráfica de obtención de datos desarrollada con el software Labview versión estudiantil.

El diseño de la interfaz de usuario para la obtención de datos se compone de tres secciones:

- Ruta de archivo: controla la ubicación de las pruebas en la memoria del procesador (Lattepanda). Ver Anexo 7.
- Buffer de lectura: muestra los datos que se obtienen de las pruebas. Ver Anexo 8.

- Osciloscopio: visualiza los datos obtenidos de los geófonos. Ver anexo 9.

En la Figura 4.3 se visualiza el panel de usuario.

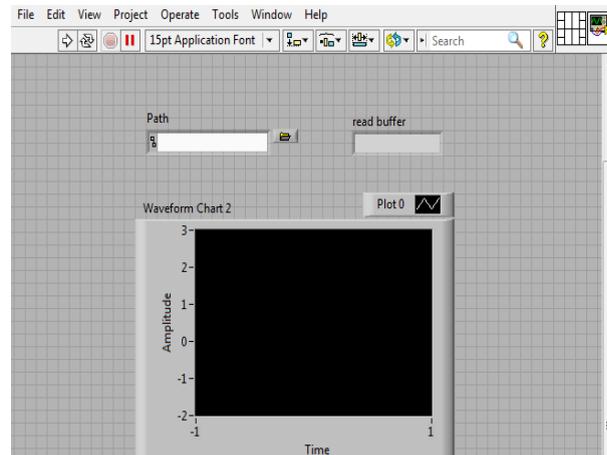


Figura 4.3: Panel de Usuario para la obtención de datos del geófono.

Para el envío de datos se implementa el diagrama de Flujo de la Figura 4.4, donde se representa el código implementado en el desarrollo de la interfaz gráfica. Ver anexo 10.

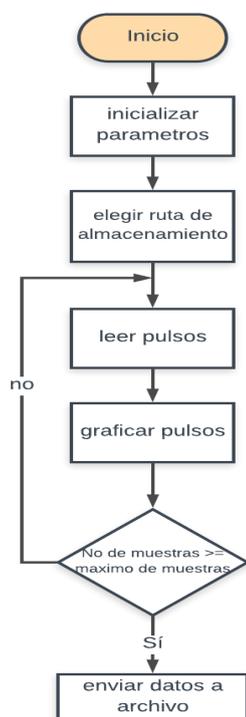


Figura 4.4: Diagrama de flujo para la representación del código implementado en el envío de datos del geófono

4.3. Trasmisión de datos vía radio

En la siguiente sección se presenta la programación de la tarjeta de desarrollo SM800L de la empresa SYMCOM empleando PSoC Creator para su funcionamiento.

El proceso de programación inicia seleccionando los bloques necesarios para el proyecto, los cuales son:

- Módulo de comunicación UART (Comunicación PC). Descripción de configuración completa en Anexo 11.
- Módulo de comunicación UART (GPRS). Descripción de configuración completa en Anexo 11.

- Configuración Conversor ADC (Lectura de Datos del Geófono). Descripción de configuración completa en Anexo 11.

Se adiciona cada bloque al proyecto como se observa en la Figura 4.5.

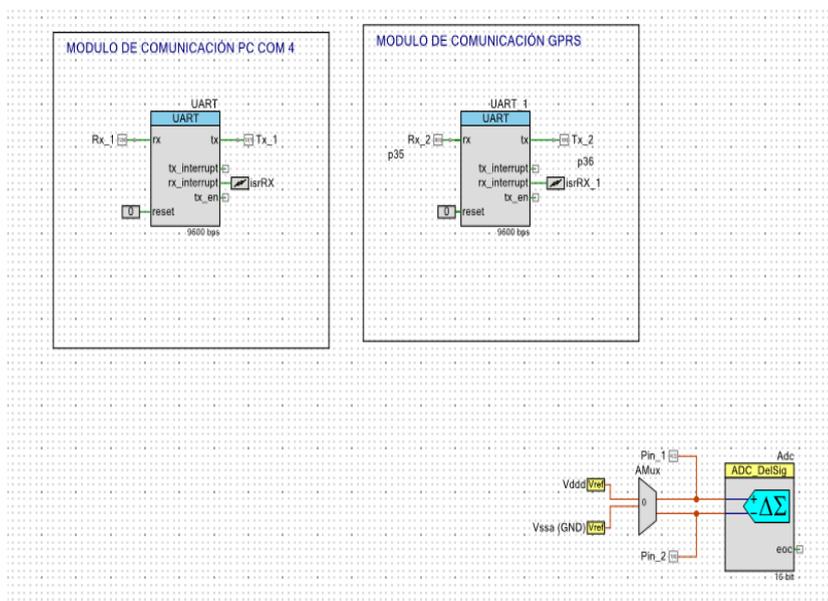


Figura 4.5: Bloques incluidos para el desarrollo y funcionamiento del Módulo Gprs.

Finalmente se desarrolla la codificación del programa que realiza la adquisición, almacenamiento, transmisión de los datos a un PC y de igual manera al servidor donde serán albergados estos datos para su posterior lectura. En la Figura 4.6 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo implementado. En el Anexo 15 se encuentra el código completo de la tarjeta de adquisición.

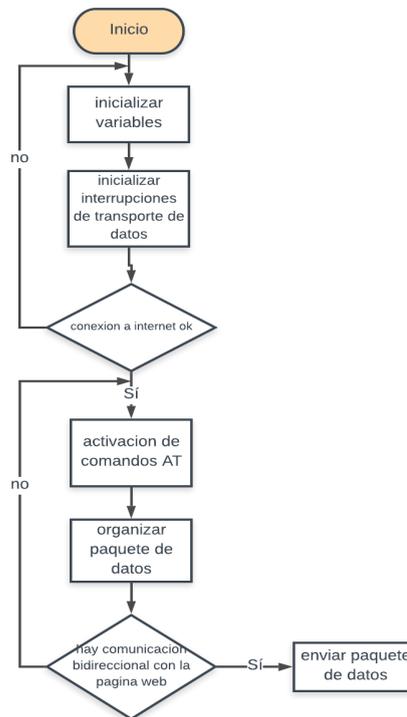


Figura 4.6: Diagrama de Flujo para la representación del código implementado en el envío de datos vía Gprs.

4.4. Programación para la caracterización del geófono

En la siguiente sección se presenta de manera resumida la programación del código en Matlab. Se divide en dos secciones, la primera sección es utilizada para la obtención de la frecuencia natural del circuito abierto, y la segunda sección realizada para el análisis variando el coeficiente de amortiguamiento obtenido. En la figura 4.7 se observa el diagrama de flujo de su funcionamiento. El código completo está en el anexo 16.

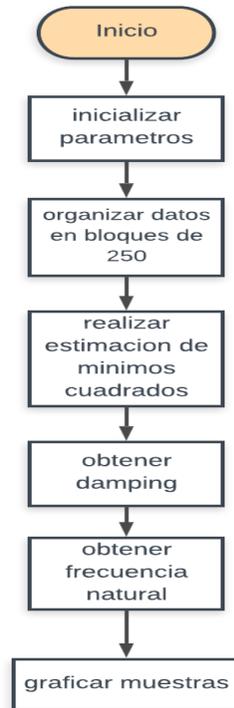


Figura 4.7: Diagrama de Flujo para la representación del código implementado en la obtención de la frecuencia natural del circuito abierto y el coeficiente de amortiguamiento electromagnético

La segunda parte consiste en el análisis de las pruebas con resistencia variable donde se modifica el coeficiente de amortiguamiento electromecánico. Ver anexo 17.



Figura 4.8: Diagrama de Flujo para la representación del código implementado en el análisis de las pruebas con resistencia variable modificando el coeficiente de amortiguamiento electromagnético.

4.5. Caracterización elemento sensor

Las pruebas realizadas para la caracterización del geófono, los datos adquiridos para el procesamiento y la presentación de resultados en el capítulo 5 son desarrollados con el sistema electrónico de la Figura 4.9, las pruebas se realizan en condiciones casi ideales tratando de garantizar que perturbaciones presentes en el ambiente no afecten de forma significativa las mediciones en las pruebas desarrolladas. Algunas de las condiciones empleadas incluyen que las pruebas se realicen en una mesa de madera maciza para que vibraciones que se encuentran en el ambiente no afecten en gran medida los datos, además la hora de desarrollo de estas mediciones se inicia a la madrugada cuando los pasos de personas, animales, movimiento de vehículos, entre otros, no estén tan presentes y no afecten de igual forma las mediciones, otra

consideración es evitar que aparatos electrónicos cercanos afecten los componentes de frecuencia del sistema, así que se evitan estos dispositivos en el espacio donde se desarrolla la prueba.

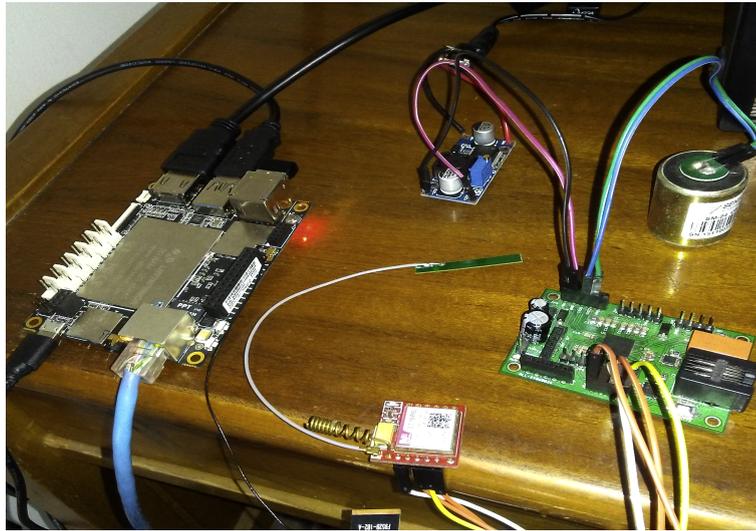


Figura 4.9: Sistema electrónico para la realización de pruebas, adquisición y procesamiento de datos. Fuente propia.

La caracterización es una parte importante del diseño ya que permite verificar el funcionamiento y comportamiento del elemento sensor primario que para el presente proyecto es el geófono SM-24. En la Tabla 4.1 se muestra los valores característicos del SM-24. Ver Anexo 1.

Frecuencia natural	10Hz
Amortiguación circuito abierto (típico)	0.25
Resistencia de derivación para el ajuste de amortiguación	1,339 Ω
Amortiguación con ajuste de derivación	0.6
Tolerancia de ajuste de derivación	+5 %,-0 %
Sensibilidad	28.8V/m/s(0.73V/in/s)
Resistencia de bobina estándar	375 Ω

Tabla 4.1: Características elemento sensor

El primer paso consiste en corroborar dos parámetros fundamentales de la Tabla 4.1, los cuales son la frecuencia natural en circuito abierto, también llamada resistencia infinita y el coeficiente de amortiguamiento electromecánico o damping, para esto se hace uso de un circuito como el mostrado en la Figura 4.10, el cual debe excitar al geófono con una función impulso de tal manera que la polarización del electroimán produzca una elevación de la masa por un instante de tiempo, luego al despolarizar el electroimán, el campo desaparece dejando suelta la masa, generando una diferencia de potencial la cual mostrará el comportamiento dinámico del sistema al ser visualizado mediante el sistema de adquisición.

El circuito de la Figura 4.10 se encuentra inmerso en la tarjeta de adquisición diseñada para este proyecto, la cual se presenta en el numeral 3.2.3. (Diseño de circuito impreso de la tarjeta de adquisición).

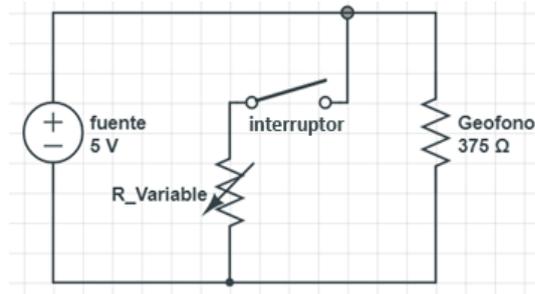


Figura 4.10: Circuito para excitación del geófono. Fuente propia.

Luego de implementar la prueba en el circuito descrito anteriormente para los tres geófonos, se obtuvo el comportamiento dinámico de cada geófono con un porcentaje de precisión entre 89.66 % y 96.46 %, mostrados en las figuras 4.11, 4.12, 4.13.

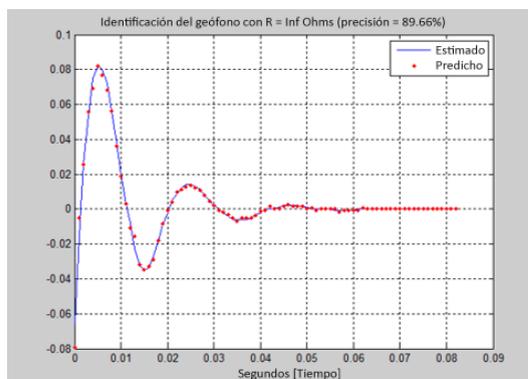


Figura 4.11: Respuesta del Geófono 1 a la excitación del circuito de la Figura 4.10. Fuente Propia.

Para el Geófono 1 apreciamos el comportamiento dinámico en circuito abierto que corresponde a un sistema subamortiguado de segundo orden, obteniendo un damping natural de 0.2625 a partir de la identificación del modelo matemático.

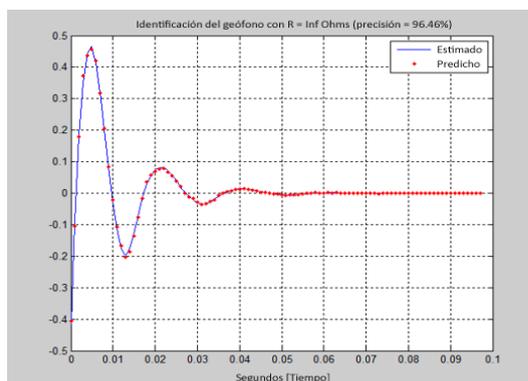


Figura 4.12: Respuesta del Geófono 2 a la excitación del circuito de la Figura 4.10. Fuente Propia.

Para el Geófono 2 apreciamos el comportamiento dinámico en circuito abierto que corresponde a un sistema subamortiguado de segundo orden, obteniendo un damping natural de 0.2618 a partir de la identificación del modelo matemático.

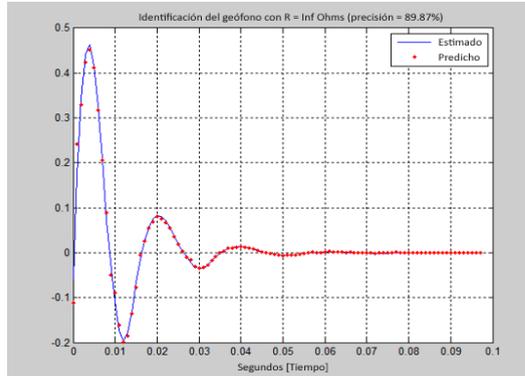


Figura 4.13: Respuesta del Geófono 3 a la excitación del circuito de la Figura 4.10. Fuente Propia.

Para el Geófono 3 de la apreciamos el comportamiento dinámico en circuito abierto que corresponde a un sistema subamortiguado de segundo orden, obteniendo un damping natural de 0.2815 a partir de la identificación del modelo matemático.

Ahora de acuerdo a la información obtenida se observa que el damping del sistema depende exclusivamente del decaimiento logarítmico, por tanto, al aplicar la Ecuación 2.28 de la identificación del modelo matemático, se obtiene el damping natural de cada geófono así:

GEÓFONO 1: 0.2625

GEÓFONO 2: 0.2618

GEÓFONO 3: 0.2815

Para la obtención de los valores correspondientes a la frecuencia natural del geófono se aplica la transformada de Fourier a los mismos datos utilizados para el cálculo del damping, esto se realiza para analizar los datos en función de la frecuencia. Las 100 pruebas de frecuencias de los geófonos nos entregan los valores en radianes y se deben convertir a Hz, de la siguiente forma:

$$Frecuencia(Hz) = \frac{frecuencia(rad)}{2\pi} \quad (4.1)$$

GEÓFONO 1:

$$Frecuencia(Hz) = \frac{65.32}{2\pi}$$

$$Frecuencia(Hz) = 10.37$$

GEÓFONO 2:

$$Frecuencia(Hz) = \frac{64.93}{2\pi}$$

$$Frecuencia(Hz) = 10.33$$

GEÓFONO 3:

$$Frecuencia(Hz) = \frac{60.20}{2\pi}$$

$$Frecuencia(Hz) = 9.58$$

El siguiente paso para la caracterización es cerrar el switch del circuito de caracterización del sistema, ver Figura 4.14, y colocar una resistencia de carga variable que oscila entre 25 y 10.000 ohms, aunque solo se tiene en cuenta los valores intermedios de ese rango ya que los valores de los extremos presentan inconvenientes de convergencia en el modelo ARX aplicado, lo anterior debido a que encontrábamos valores extremos de frecuencias negativas o infinitas.

En la Figura 4.14 se observa el circuito para caracterización del geófono con resistencia de carga variable.

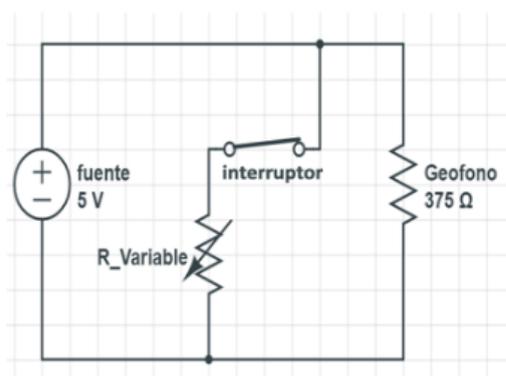


Figura 4.14: Circuito para caracterización con resistencia de carga variable. Fuente propia.

En las figuras 4.15, 4.16, 4.17 se puede observar que el damping varía en el rango de resistencias de los tres geófonos.

GEÓFONO 1:

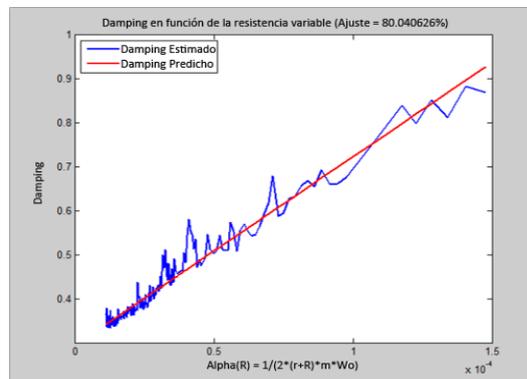


Figura 4.15: Respuesta del Damping del Geófono 1 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.

GEÓFONO 2:

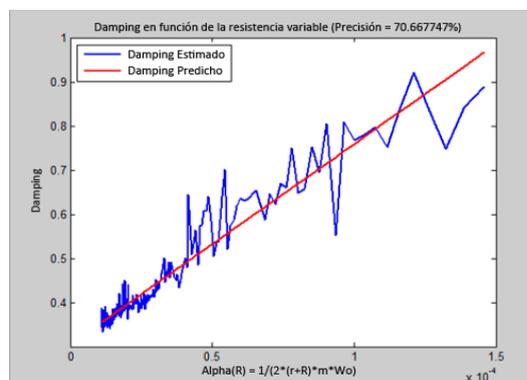


Figura 4.16: Respuesta del Damping del Geófono 2 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.

GEÓFONO 3:

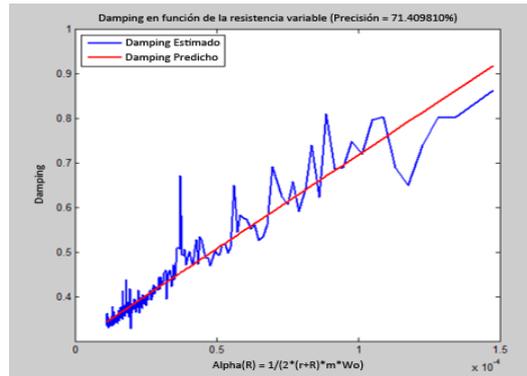


Figura 4.17: Respuesta del Damping del Geófono 3 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.

A partir de la prueba realizada en el circuito de la Figura 4.14 Para los Geófonos 1,2 y 3 de las Figuras 4.15-4.16-4.17 observamos el comportamiento del geófono modificando el coeficiente de amortiguamiento con un porcentaje de identificación mayor al 70 %, lo cual implica que el seguimiento de la respuesta es adecuado.

Capítulo 5

Resultados y Conclusiones

5.1. Resultados

En el proyecto se adquirieron datos para 3 geófonos en dos diferentes etapas, la primera etapa consistió en corroborar los parámetros más importantes del geófono, que son el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia natural en circuito abierto con un tiempo de muestreo igual a 20ms, cada grupo de datos contiene 100 muestras.

En las gráficas 4.11, 4.12, 4.13. se puede apreciar que el comportamiento dinámico del geófono corresponde a un sistema subamortiguado de segundo orden ya que es la respuesta característica frente a la entrada de un escalón unitario, con una diferencia de potencial de 5 volts en un intervalo de 20ms, esto implica que el valor del damping electromecánico debe estar entre 0 y 1.

Los resultados se presentan realizando un análisis de ajuste entre los valores dados por el fabricante y los valores obtenidos. Para el desarrollo de este criterio se implementa una función que mide el porcentaje entre estos valores. Dicha función recibe tres datos y se basa en la siguiente ecuación:

$$Ajuste = 100 * \left(1 - \frac{\|v - \hat{v}\|}{\|v - \bar{v}\|}\right) \quad (5.1)$$

Donde:

v : es el valor obtenido ya sea de frecuencia o de damping

\hat{v} : es el valor dado por el fabricante

$\|v\|$: es la norma del valor medido

\bar{v} : es la media de los valores obtenidos

En la ecuación 5.1 el valor de delta (Δ) = $\left(\frac{\|v-\hat{v}\|}{\|v-\bar{v}\|}\right)$ cuanto más próximo sea a cero, mayor será el porcentaje de ajuste entre los datos.

Para la primera etapa se obtuvo los siguientes datos de las 100 pruebas para el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia natural.

5.1.1. Coeficiente de amortiguamiento

GEÓFONO 1:

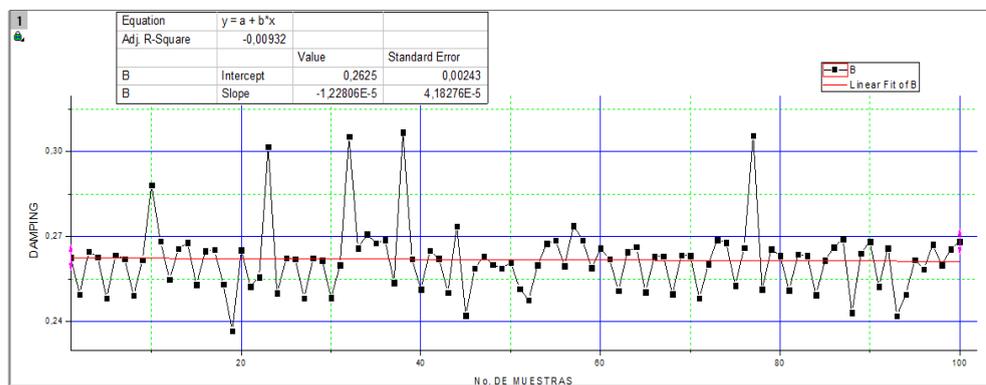


Figura 5.1: Coeficiente de amortiguamiento obtenido para el Geófono 1 tomando 100 pruebas. Fuente propia.

GEÓFONO 2:

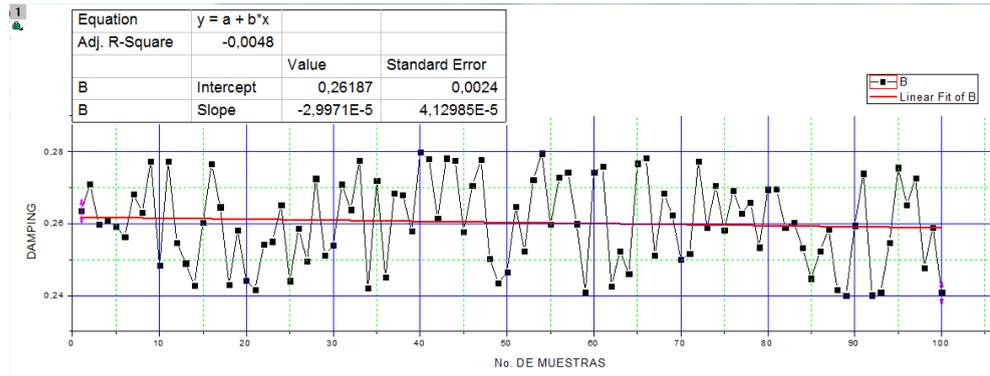


Figura 5.2: Coeficiente de Amortiguamiento obtenido para el Geófono 2 tomando 100 pruebas. Fuente propia.

GEÓFONO 3:

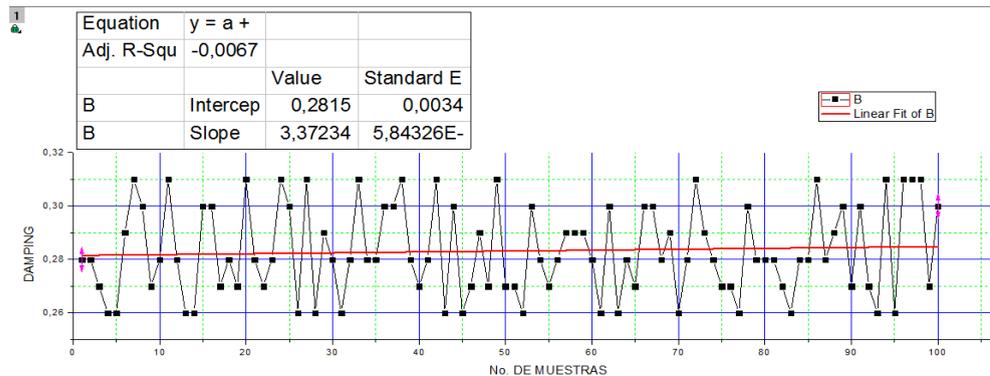


Figura 5.3: Coeficiente de Amortiguamiento obtenido para el Geófono 3 tomando 100 pruebas. Fuente propia.

De acuerdo a las características dadas por el fabricante del geófono, ver Tabla 4.1, el valor del damping en circuito abierto debe ser de 0.25 con un porcentaje de error del 5% lo cual concuerda con los datos obtenidos en el experimento desarrollado para los geófonos 1,2 y 3 de las Figuras 5.1-5.3 ya que están dentro de los parámetros del fabricante.

5.1.2. Frecuencia natural

GEÓFONO 1:

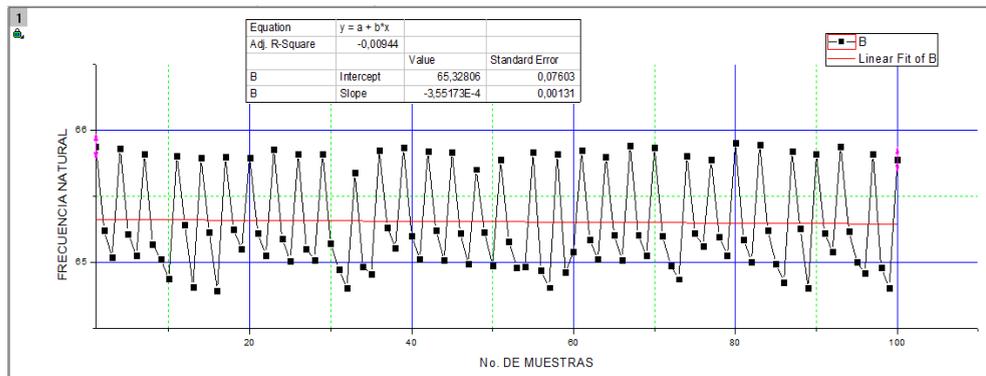


Figura 5.4: Frecuencia Natural obtenida para el Geófono 1 tomando 100 pruebas. Fuente propia.

GEÓFONO 2:

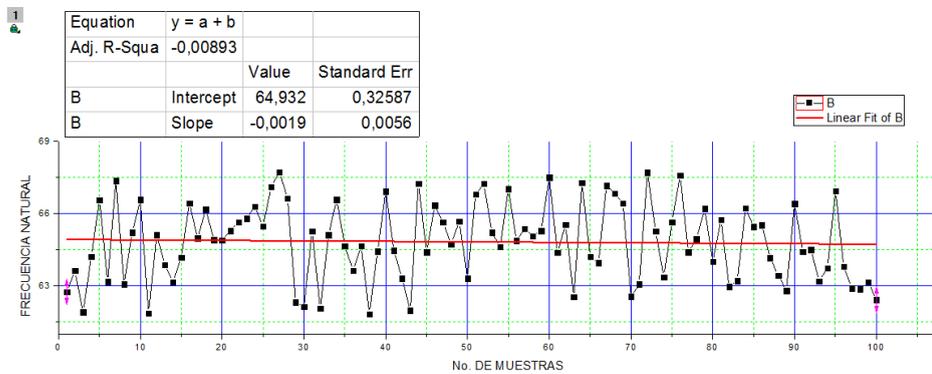


Figura 5.5: Frecuencia Natural obtenida para el Geófono 2 tomando 100 pruebas. Fuente propia.

GEÓFONO 3:

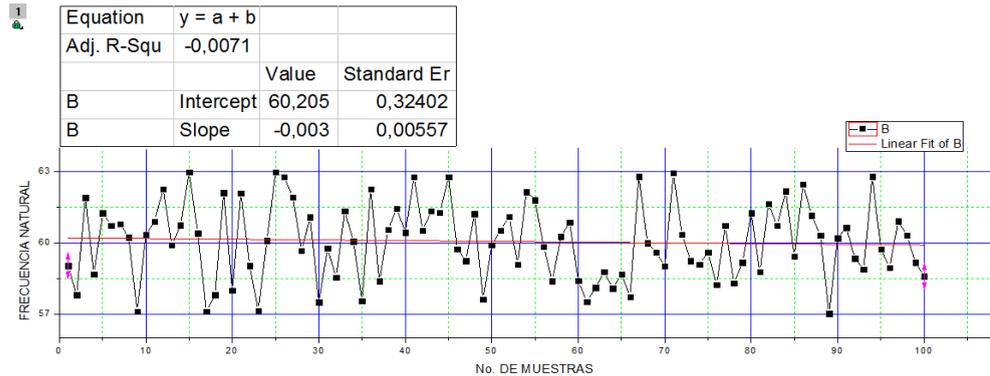


Figura 5.6: Frecuencia Natural obtenida para el Geófono 3 tomando 100 pruebas. Fuente Propia.

De acuerdo a las características dadas por el fabricante del geófono, ver Tabla 4.1, el valor de la frecuencia Natural en circuito abierto debe ser de 10Hz con un porcentaje de error del 5%. Podemos observar que el valor de frecuencia concuerda con el valor esperado de la hoja característica (ver anexo 1) mostrando una frecuencia de oscilación natural de 10Hz y que está dentro de los parámetros del fabricante. La línea de tendencia (línea roja), presenta la tendencia del conjunto de datos obtenidos, la media y la pendiente se calculan utilizando una regresión lineal la cual nos muestra para el damping valores de la media iguales a 0.2625, 0.2618 y 0.2815 y para la frecuencia natural valores iguales a 65.32 rad, 64.93 rad y 60.20 rad.

Utilizando la ecuación 5.1 del análisis de ajuste obtenemos los siguientes resultados:

Geófono 1	$100 * \left(1 - \frac{\ 0.262-0.260\ }{\ 0.262-0.268\ }\right)$ $delta (\Delta) = 0.33$	$100 * \left(1 - \frac{\ 10.37-10.00\ }{\ 10.37-10.10\ }\right)$ $delta (\Delta) = 1.37$
Geófono 2	$100 * \left(1 - \frac{\ 0.261-0.260\ }{\ 0.261-0.268\ }\right)$ $delta (\Delta) = 0.14$	$100 * \left(1 - \frac{\ 10.33-10.00\ }{\ 10.33-10.10\ }\right)$ $delta (\Delta) = 1.43$
Geófono 3	$100 * \left(1 - \frac{\ 0.281-0.260\ }{\ 0.281-0.268\ }\right)$ $delta (\Delta) = 1.61$	$100 * \left(1 - \frac{\ 9.58-10.00\ }{\ 9.58-10.10\ }\right)$ $delta (\Delta) = 0.80$

Tabla 5.1: Valor del ajuste para el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia natural de los 3 Geófonos.

Al ver los resultados nos damos cuenta que los valores de delta (Δ) son muy cercanos a cero, esto quiere decir que los datos obtenidos en las pruebas, comparadas con los datos de la tabla 4.1, son muy similares y que la obtención de los parámetros se ajusta al modelo matemático que se planteó.

Segunda etapa

Para la segunda etapa se analizaron de nuevo estos dos parámetros esenciales, pero en este caso se obtuvo colocando una resistencia de carga variable que modificara la respuesta del sistema. Esta resistencia modifica el coeficiente de amortiguamiento electromecánico o damping y afecta la respuesta del sistema frente a la misma entrada de tipo escalón. Esto se puede observar en las Figuras 5.7-5.9 para los geófonos 1,2 y 3 respectivamente.

GEÓFONO 1:

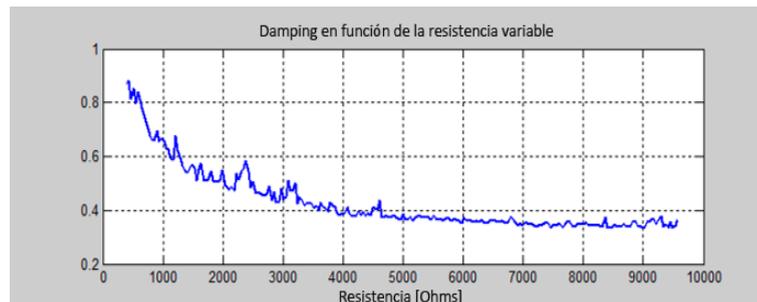


Figura 5.7: Damping obtenido para el Geófono 1 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.

GEÓFONO 2:

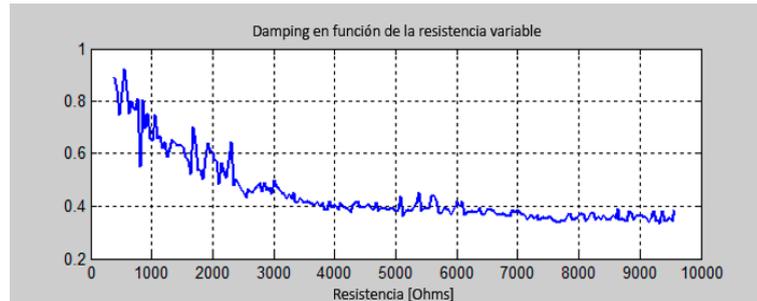


Figura 5.8: Damping obtenido para el Geófono 2 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.

GEÓFONO 3:

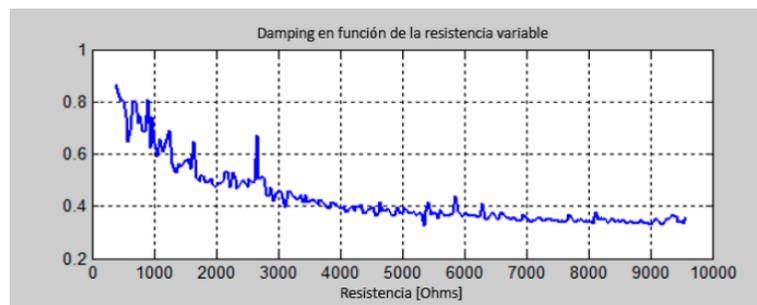


Figura 5.9: Damping obtenido para el Geófono 3 en función de la Resistencia Variable. Fuente Propia.

La relación entre el damping y la resistencia variable de carga presenta este comportamiento porque normalmente la dinámica de los sistemas del mundo real tiene relaciones no lineales pero las aproximaciones que se hacen por diseño o por facilidad de manipulación matemática es lineal.

De acuerdo a (*Jens Havskov, Institute of Solid Earth Physics University of Bergen Norway ecuación 2.40*) y según vemos en las figuras 5.7, 5.8 y 5.9, cuando aumenta la resistencia o tiende a infinito, el damping disminuye o tiende a cero, esto quiere decir y teniendo en cuenta el circuito de la figura 4.14, que la resistencia variable se comporta como un circuito abierto y el sistema de segundo orden responde con un movimiento subamortiguado.

De forma contraria actuaría si la resistencia disminuye o tiende a cero, ya que el damping en este caso aumenta tendiendo a 1 y en el circuito de la figura 4.14 la resistencia variable se comportaría como un corto, provocando un movimiento críticamente amortiguado de la señal.

GEÓFONO 1:

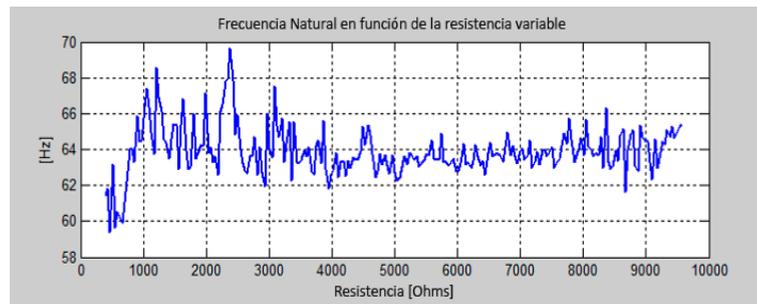


Figura 5.10: Geófono 1, Frecuencia Natural en función de la resistencia variable. Fuente Propia.

GEÓFONO 2:

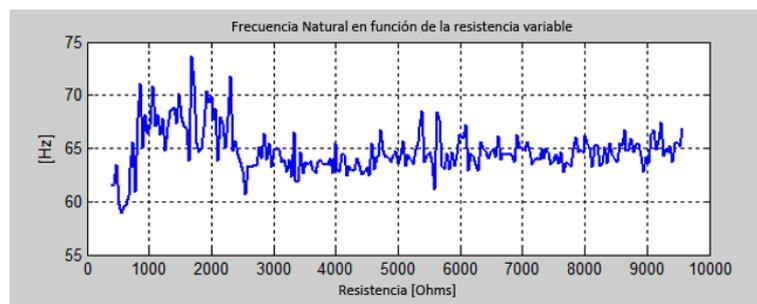


Figura 5.11: Geófono 2, Frecuencia Natural en función de la resistencia variable. Fuente Propia.

GEÓFONO 3:

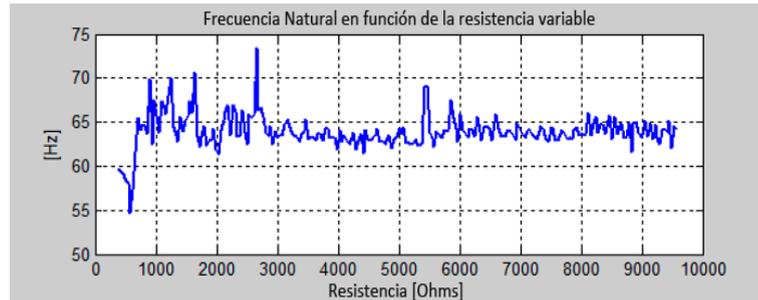


Figura 5.12: Geófono 3, Frecuencia Natural en función de la resistencia variable. Fuente Propia.

Se tiene como respuesta un corrimiento en función de la frecuencia natural del sistema, con lo que se concluye que la resistencia de carga produce una modificación de la respuesta del sistema lo cual tiene concordancia con la funcionalidad de un amortiguador y es la de atenuar la energía del sistema.

En las figuras 5.13, 5.14, 5.15 se observa el porcentaje de precisión de cada una de las muestras

GEÓFONO 1:

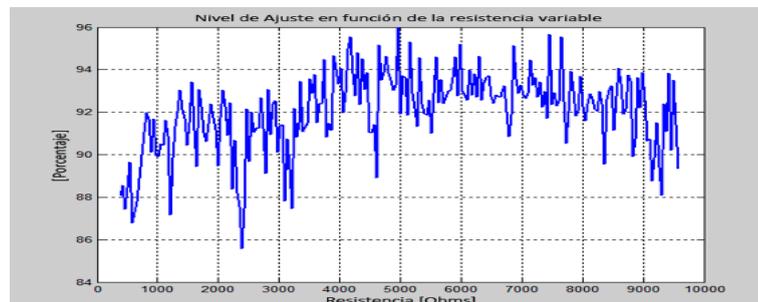


Figura 5.13: Porcentaje de Precisión del Geófono 1 en función de la resistencia variable. Fuente Propia.

GEÓFONO 2:

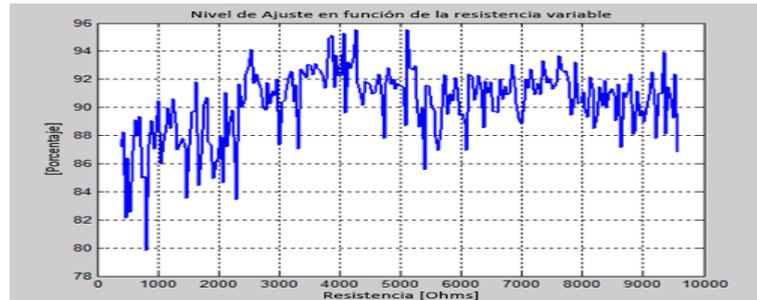


Figura 5.14: Porcentaje de Precisión del Geófono 2 en función de la resistencia variable. Fuente Propia.

GEÓFONO 3:

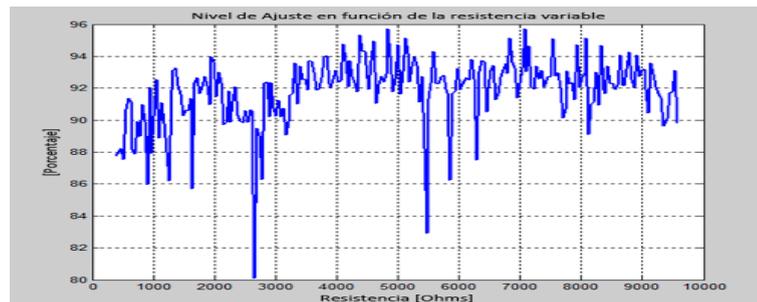


Figura 5.15: Porcentaje de Precisión del Geófono 3 en función de la resistencia variable. Fuente Propia.

Para los Geófonos 1,2 y 3 de las Figuras 5.13-5.15, observamos el comportamiento del geófono en función de la resistencia variable obteniendo como respuesta un porcentaje de precisión que tiene el algoritmo en la identificación, lo cual determina que tan próxima fue la identificación al modelo real del sistema. El modelo de identificación muestra que el ajuste a partir de la regresión lineal es adecuado, con valores que oscilan en promedio entre el 90 % y el 96 %.

Para el ajuste de amortiguación, En la tabla 4.1, el fabricante da un valor de referencia, una resistencia de derivación de 1339Ω , esto para obtener el correcto funcionamiento del geófono, donde se espera obtener un damping aproximado de 0.6. Al aplicar la ecuación 2.17 a 10 muestras se obtiene los siguientes datos en la figura 5.16:

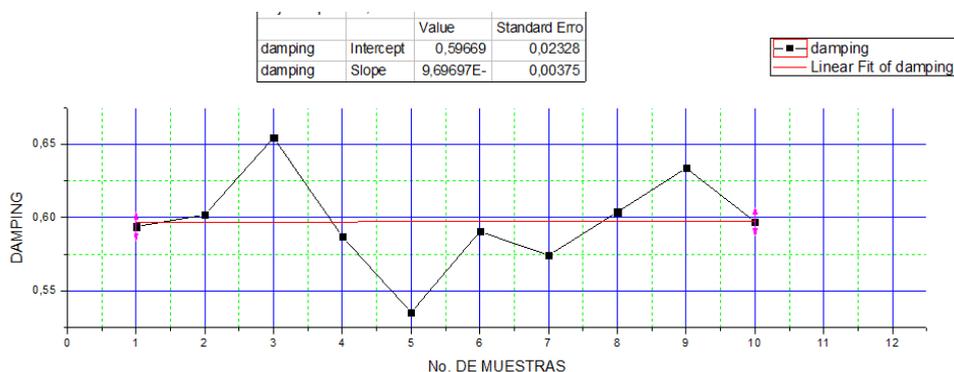


Figura 5.16: Resultado del Damping del Geófono aplicando 10 muestras. Fuente Propia.

La regresión lineal (línea roja) de la figura 5.16 entrega un valor de 0.5966 que es muy próximo al damping esperado de 0.6 con la resistencia de derivación de 1339Ω .

El análisis de las muestras nos proporciona un valor de resistencia, con el cual la respuesta del sistema de segundo orden tiene un damping del 0.707, de esta forma se obtiene una respuesta lineal y la posibilidad de aprovechar todo el rango de frecuencias dinámicas.

La figura 5.17, nos muestra los valores de resistencia adquiridos en 10 datos para obtener un damping de 0.707 aplicando la expresión 2.49. Al emplear la media de los valores se obtiene una resistencia de 758.21Ω .

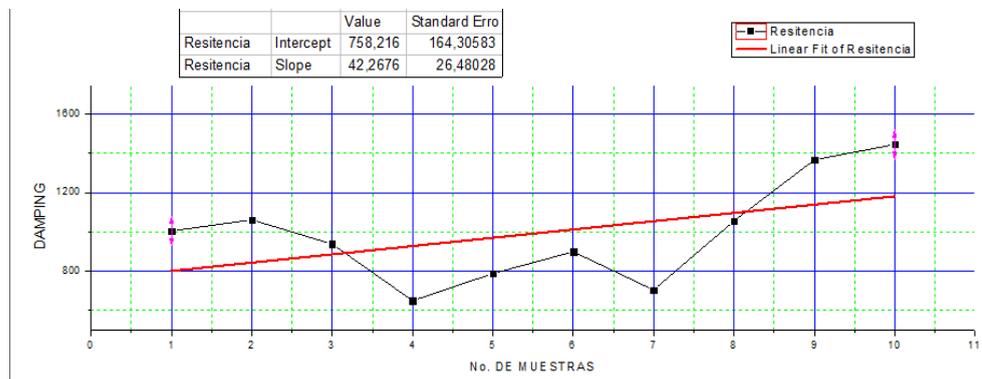


Figura 5.17: Valor de la Media de Resistencia para un Damping de 0.707 aplicando 10 muestras. Fuente Propia.

Para validar el procedimiento de estimación de parámetros propuesto con una muestra de geófonos electromagnéticos, en primera instancia se evaluó la calidad del modelo con el error de predicción.

Se puede decir que el modelo es bueno ya que el valor que se obtuvo del error de predicción es muy cercano a cero, esto se evidencia en la primera fase de la identificación de los geófonos. De acuerdo a esto, una medida adecuada de la calidad de un modelo es la suma de los cuadrados de los errores de predicción.

Una vez se analizó el error de predicción, se calcula en este caso la diferencia entre la señal de voltaje medida y la señal predicha, de acuerdo al método de identificación de mínimos cuadrados el cual se emplea. Posteriormente, se calcula por medio de Matlab (ver anexo 12) la matriz de covarianza del error de predicción.

Después se analiza el concepto de coeficiente de autocorrelación estadística, el cual indica si hay o no relaciones lineales entre las variables encontradas.

Correlación de los Residuos.

El modelo Arx es utilizado para hacer la estimación, dicho modelo contempla un error que en este caso es ruido blanco, la característica de este ruido blanco es que el coeficiente de correlación nos da uno cuando el intervalo de retraso es cero, si el modelo es muy parecido al real los valores de correlación deben estar dentro de los límites de confianza (franja amarilla), caso contrario, cuando los valores de correlación salen de esa franja amarilla la hipótesis se descarta.

Los Residuos son la diferencia entre los valores reales y los valores estimados, así cuando aproximamos el modelo a una recta y se quiere hacer una regresión lineal para ver cuál es la que mejor se ajusta, al hacerlo con mínimos cuadrados lo que se calcula es que la distancia entre los valores estimados y los valores reales sean lo mínimo posibles para que se vaya ajustando al modelo real, así ser más preciso.

Para ilustrar la blancura del ruido se utiliza el software de Matlab (ver Anexo 12), se hace uso de un código el cual encuentra la función de auto correlación del ruido. Ver figuras 5.18-5.23. Para las muestras obtenidas del Geófono uno, dos y tres se presenta dos gráficas, la mejor y peor prueba de autocorrelación respectivamente, en la primera parte se presenta la mejor prueba para los tres geófonos, en la segunda parte se presenta la peor prueba para los tres geófonos. Ver descripción completa Anexo 12.

Mejor prueba de autocorrelación.

GEÓFONO 1:

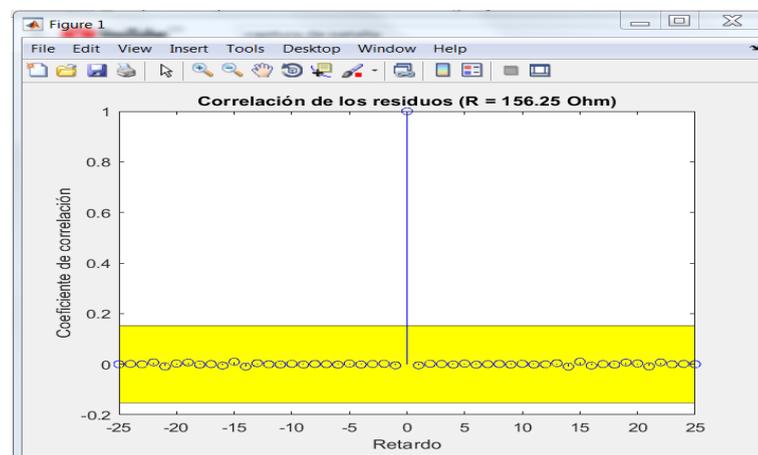


Figura 5.18: Gráfica de la mejor autocorrelación de Residuos para el Geófono 1 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.

GEÓFONO 2:

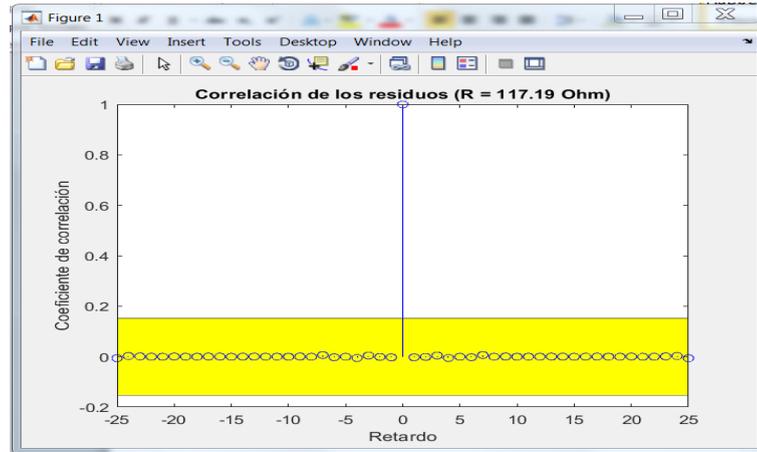


Figura 5.19: Gráfica de la mejor autocorrelación de Residuos para el Geófono 2 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.

GEÓFONO 3:

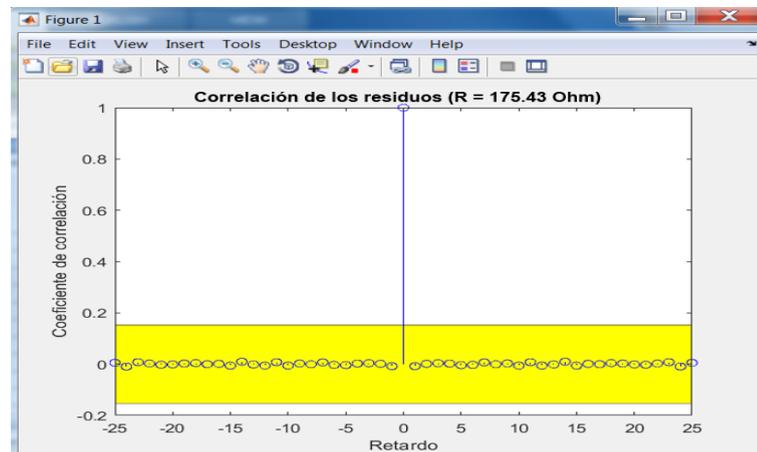


Figura 5.20: Gráfica de la mejor autocorrelación de Residuos para el Geófono 3 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.

Basado en estos resultados podemos concluir que los datos son una realización de un proceso con ruido blanco, la característica es que cuando se aplica ruido blanco el único valor de autocorrelación de la muestra fuera del intervalo de confianza ocurre en el intervalo cero como se espera para un proceso de ruido blanco, además

los valores de autocorrelación de la muestra se encuentran dentro de los límites de confianza que en este caso son del 99 %. También se determina que el mejor valor de resistencia de esta autocorrelación cumple con los parámetros de diseño, en este caso donde se obtiene un valor del Coeficiente de Amortiguamiento de 0.707. Para los tres geófonos se obtiene un valor de resistencia que cumple con las características deseadas:

GEÓFONO 1: $R = 156.25 \text{ Ohm}$

GEÓFONO 2: $R = 117.19 \text{ Ohm}$

GEÓFONO 3: $R = 175.43 \text{ Ohm}$

Peor prueba de autocorrelación.

GEÓFONO 1:

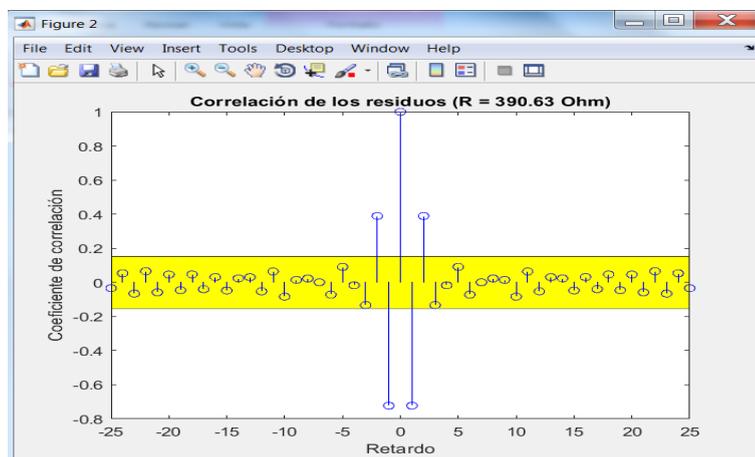


Figura 5.21: Gráfica de la peor autocorrelación de Residuos para el Geófono 1 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.

GEÓFONO 2:

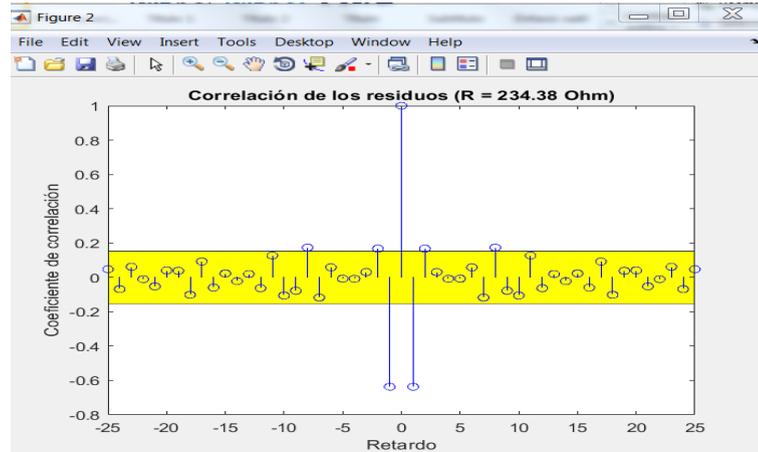


Figura 5.22: Gráfica de la peor autocorrelación de Residuos para el Geófono 2 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.

GEÓFONO 3:

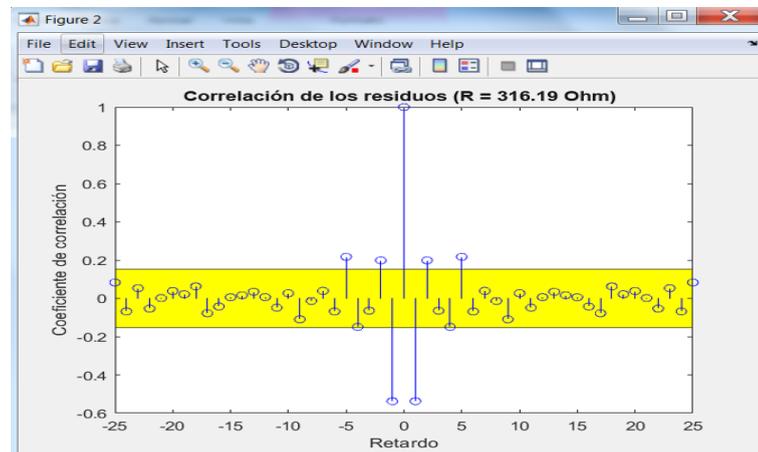


Figura 5.23: Gráfica de la peor autocorrelación de Residuos para el Geófono 3 aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.

En este caso, los valores de la autocorrelación superan claramente en muchos retardos los límites de confianza del 99% para una autocorrelación de ruido blanco. Aquí se puede rechazar la hipótesis de que los residuos son una secuencia de ruido blanco. También el coeficiente de amortiguamiento obtenido en función de la resistencia

de carga es diferente al valor deseado (0.707) lo que implica que el sistema ya no es lineal ni subamortiguado y que ese valor de resistencia no es adecuado para los requerimientos del Sistema. Para los tres geófonos se obtiene un valor de resistencia así:

GEÓFONO 1: $R = 390.63 \text{ Ohm}$

GEÓFONO 2: $R = 234.38 \text{ Ohm}$

GEÓFONO 3: $R = 316.19 \text{ Ohm}$

Ahora observamos los resultados del porcentaje de ajuste en función de los valores de la resistencia variable, en las Figuras 5.24-5.26 para los Geófonos 1,2 y 3 respectivamente.

GEÓFONO 1:

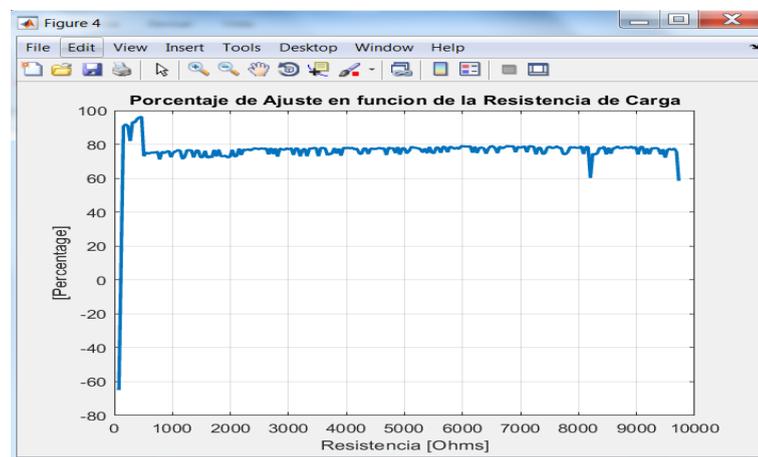


Figura 5.24: Gráfica del índice de desempeño en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 1. Fuente Propia.

GEÓFONO 2:

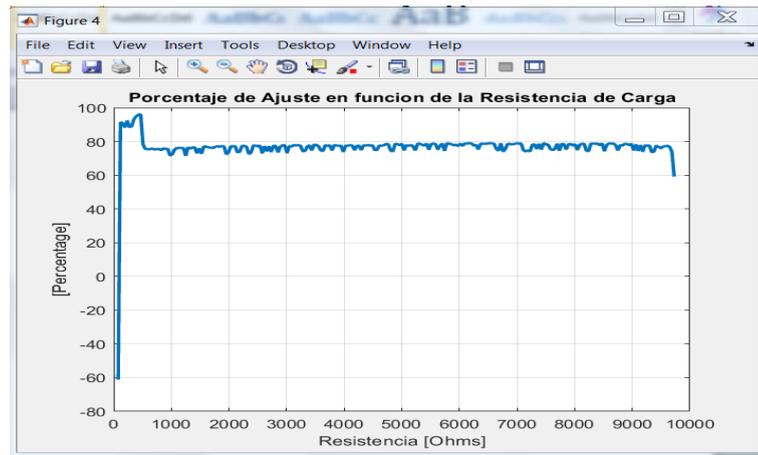


Figura 5.25: Gráfica del índice de desempeño en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 2. Fuente Propia.

GEÓFONO 3:

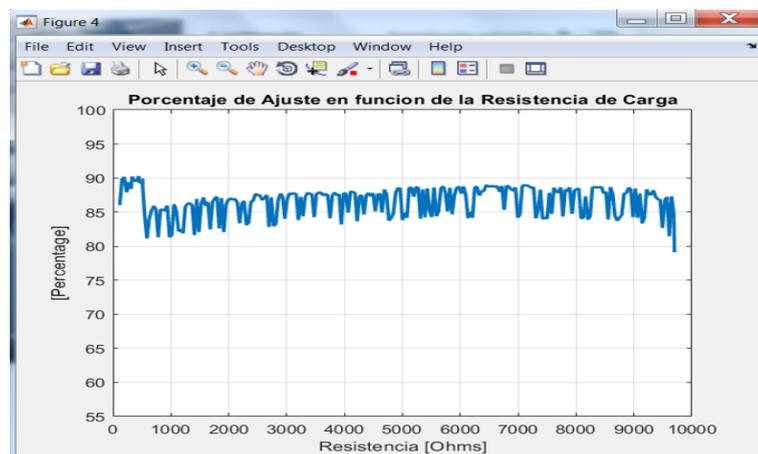


Figura 5.26: Gráfica del índice de desempeño en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 3. Fuente Propia.

Para las pruebas realizadas en los tres geófonos podemos observar que el porcentaje de ajuste en función de la resistencia de carga, considerando el ruido blanco está en promedio cercano al 80 % lo que implica que el sistema logra hacer un buen seguimiento en función de la resistencia variable y que los valores predichos y estimados

obtenidos de las muestras son muy cercanos, lo que conlleva que los residuos sean pequeños, esto nos permite tener los datos en consideración como un modelo correcto, pero teniendo en cuenta la mejor prueba de autocorrelación donde se determina el valor de resistencia que cumple con los parámetros de diseño, podemos observar que en este valor de resistencia el porcentaje de ajuste es cercano al 96 %, lo cual determina que el error es muy pequeño, cercano a cero, que los valores predichos y estimados del modelo son muy similares por lo que se corrobora que para este valor de resistencia se encuentra la mejor respuesta del sistema teniendo en cuenta el ruido blanco.

Posteriormente vemos los resultados del damping en función de la resistencia de carga y la frecuencia natural en función de la resistencia de carga, en las Figuras 5.27-5.29 para los Geófonos 1,2 y 3 respectivamente.

GEÓFONO 1:

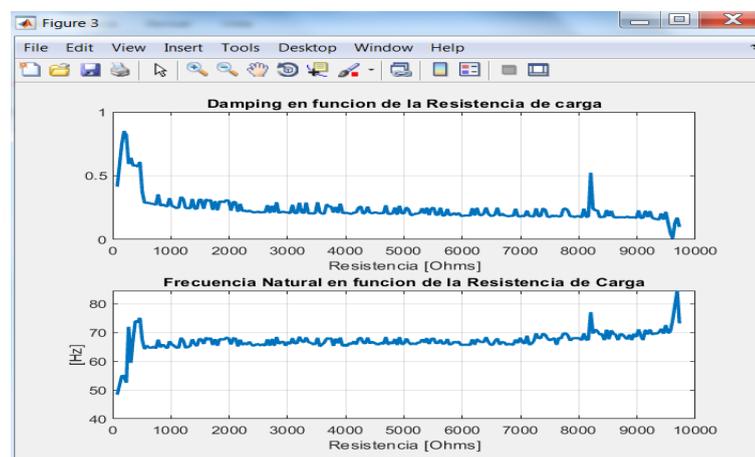


Figura 5.27: Gráfica del Damping y la Frecuencia Natural en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 1. Fuente Propia.

GEÓFONO 2:

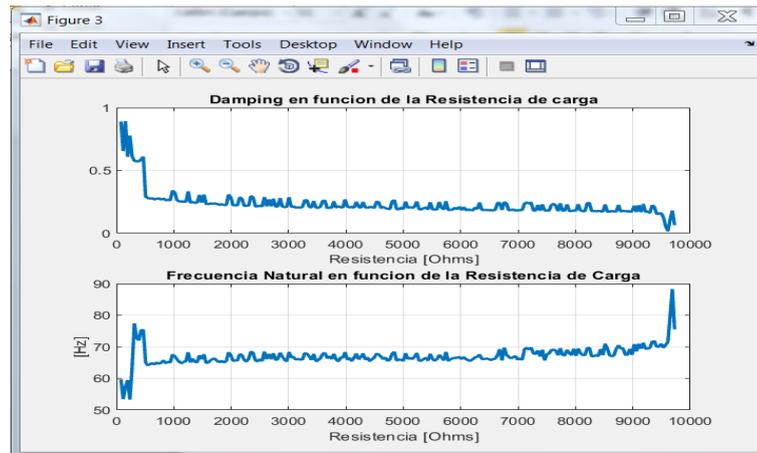


Figura 5.28: Gráfica del Damping y la Frecuencia Natural en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 2. Fuente Propia.

GEÓFONO 3:

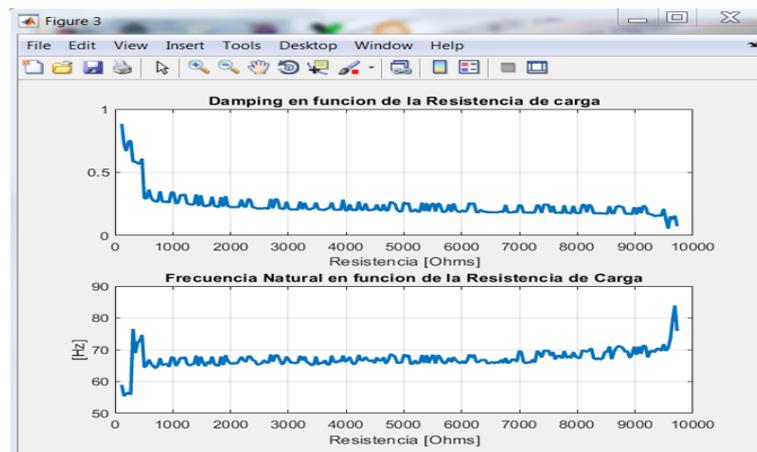


Figura 5.29: Gráfica del Damping y la Frecuencia Natural en función de la Resistencia de Carga Variable para el Geófono 3. Fuente Propia.

Como podemos ver en las pruebas realizadas para los tres geófonos y teniendo en consideración la mejor prueba de autocorrelación donde se determina el mejor valor de resistencia y teniendo en cuenta los parámetros de diseño vemos que en ese valor de resistencia se consigue un valor del damping de (0.707) esto con el fin de

obtener una respuesta lineal del sistema y un comportamiento subamortiguado del mismo, así en las muestras obtenidas para cada geófono el sistema determina el valor adecuado para cumplir con estos parámetros. Para los tres geófonos se obtiene un valor de resistencia que cumple con las características deseadas:

GEÓFONO 1: $R = 156.25 \text{ Ohm}$

GEÓFONO 2: $R = 117.19 \text{ Ohm}$

GEÓFONO 3: $R = 175.43 \text{ Ohm}$

Se observa que este índice de desempeño se encuentra siempre cercano al 80 % esto corrobora que los parámetros identificados con el método de mínimos cuadrados, en especial los inductivos presentan poca oscilación.

También se analiza que presentan menor oscilación de estado estacionario por lo que la varianza de los mismos siempre es menor con este método.

5.2. Conclusiones

1. Se modeló el sistema electrónico del geófono basado en una combinación de resistencias e inductores y para la representación física interna se añadieron ecuaciones suponiendo un sistema masa resorte amortiguado.
2. Se diseñó una tarjeta electrónica automatizada y de bajo costo, basada en la tecnología PSoC de la empresa Cypress, en la cual se implementa la adquisición de las medidas entregadas por un geófono (sensor), donde se gestiona el almacenamiento y transmisión de datos.
3. PSoC permite reducir de manera eficiente el uso del hardware ya que por su arquitectura es posible implementar diferentes funcionalidades con un solo integrado.
4. En esencia el modelo ARX que se implementó es óptimo en el sentido que minimiza la varianza de la diferencia entre la salida medida y la salida predicha, ya que es una técnica recursiva.

5. Se realizó la identificación de los parámetros principales de los geófonos mediante el método de mínimos cuadrados y se comprobó que este método al considerar componentes de ruido blanco obtiene una precisión admisible estimando el valor de los parámetros.
6. Se comprobó mediante los experimentos que el uso de un modelo con ruido blanco sirve para establecer en qué medida el sistema opera de la manera deseada a pesar de estas perturbaciones, además de evidenciar que los residuos asociados con los datos y el modelo dado, son independientes de la entrada y tienen, en este caso, características de ruido blanco.
7. La calidad de la identificación con datos reales depende en gran medida del tipo de sensores, tarjeta de adquisición de datos y cableado de los mismos debido al ruido que se puede generar por las conexiones cercanas de otros aparatos presentes en el medio ambiente.
8. Se determina con una prueba de autocorrelación de los residuos y teniendo en cuenta los parámetros de diseño del sistema en función de una resistencia variable que valor de resistencia cumple con dichas especificaciones y en qué punto se encuentra la menor dispersión de datos o que tan cercanos están los valores predichos y estimados del modelo, buscando el menor valor de esos residuos, así mismo considerando las características que tiene el ruido blanco poder cumplir con estas para posteriormente determinar ese valor de resistencia y corroborar que el sistema inyectado por una prueba de ruido blanco puede hacer un buen seguimiento de la respuesta garantizando que sea robusto ante variaciones o perturbaciones al mismo.
9. Finalmente se puede decir que se aumentó el conocimiento y se sentó una base teórica y práctica sobre los temas que se trataron en el presente trabajo de grado, ya que se apropiaron los elementos para la resolución de un problema particular generando resultados satisfactorios.

Trabajos Futuros

Un trabajo de investigación importante que se pueden plantear a partir de este trabajo de grado es el siguiente.

Un Sistema de control feedback, donde se pueda correr la respuesta de la frecuencia natural de 4.5Hz a 1Hz, de esta manera un geófono electromecánico puede trabajar como sensor de señales sísmicas, debido a que el censado de dichas señales va en un rango de frecuencias entre 1Hz y 200Hz. Como el geófono tiene una frecuencia natural de 10Hz las frecuencias menores a esta no se pueden leer y las que nos interesan son las más bajas, debido a esto lo que se necesita hacer es un lazo de control que pueda ajustar el sistema a un coeficiente de amortiguamiento de 0.707 y así correr la frecuencia de amortiguamiento relativo a 1Hz, lo que se conseguiría hacer con esto es un sistema sísmico logrando una red de alta fidelidad a un bajo costo sobre un ordenador portable como lo es la Lattepanda.

5.3. Bibliografía

- [1] Zanjani, P. N., Abraham, A. (2010, March). A method for calibrating micro electro mechanical systems accelerometer for use as a tilt and seismograph sensor. In Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2010 12th International Conference on (pp. 637-641). IEEE.
- [2] Kamata, M. (2004, November). High precision geophone calibration. In the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 17th International Acoustic Emission Symposium, Tokyo, Japan.
- [3] Carrillo, J., Bernal Ruíz, N. M., Porras, P. (2013). DESIGN EVALUATION OF A SMALL SHAKE TABLE FOR TESTS ON EARTHQUAKE-RESISTANT ENGINEERING. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(1), 89-105.
- [4] Morencos, J. (1966). The determination of seismometer damping. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 56(2), 383-392.
- [5] Willmore, P. L. (1959). The application of the Maxwell impedance bridge to the calibration of electromagnetic seismographs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 49(1), 99-114.
- [6] Espinosa, A. F., Sutton, G. H., Miller, H. J. (1962). A transient technique for seismograph calibration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 52(4), 767-779.
- [7] Barr, K. G. (1964). A rapid method for calibrating Willmore seismographs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 54(5A), 1473-1477.
- [8] Russell, R. D., Meldrum, R. D., Jensen, O. G. (1968). The Maxwell bridge as a circuit element in electromagnetic feedback seismographs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1621-1630.
- [9] Ekström, G., Nettles, M. (1997). Calibration of the HGLP seismograph network and centroid-moment tensor analysis of significant earthquakes of 1976. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 101(3-4), 219-243.

- [10] Gonzalez-Fernandez, A., Herrera-Juarez, V., Gradilla-Martinez, L. C. (2013, July). Simple calibration of geophones using an audio source. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International (pp. 1414-1417). IEEE.
- [11] Lv, C., Fan, D., Wei, A., Yin, Z. (2008, September). A design of geophone tester based on FPGA. In Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on (pp. 587-590). IEEE.
- [12] Asten, M. W. (1977). Theory and practice of geophone calibration in situ using a modified step method. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 15(4), 208-214.
- [13] Collette, C., Artoos, K., Guinchard, M., Janssens, S., Carmona Fernandez, P., Hauviller, C. (2011). Review of sensors for low frequency seismic vibration measurement (No. CERN-ATS-Note-2011-001 TECH).
- [14] C. Gasquet and P. Witomski, Fourier Analysis and Applications. Filtering, Numerical Computation, Wavelets Texts in Applied Mathematics 30 Springer 1999.
- [15] Señales y Sistemas I (Transformada de Fourier), Antonio Bonafonte. Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) Otoño de 2008.
- [16] Method of calibrating an electromagnetic seismograph. Patrick L. Willmore. October 1957
- [17] Introducción a la identificación de sistemas dinámicos, Materia Identificación (Universidad del Cauca)
- [18] Identificación con modelos discretos para sistemas lineales. Modelo matemático y aplicaciones, José Jairo Soriano. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Área de Control.
- [19] Métodos de Identificación dinámica. Pedro Arafet Padilla, Francisco Chang Mumañ. Facultad de Ingeniería Electrónica. Universidad de Oriente (Junio 2008)
- [20] Sistemas de Segundo Orden. Roberto Cárdenas Dobson. Departamento de Ingeniería Electrónica ? Universidad de Magallanes.
- [21] Señales y Sistemas. Richard Baraniuk. Rise University, Houston, Texas. (Septiembre 2006).
- [22] INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL Y MODELO MATEMÁTICO PARA SISTEMAS LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO. Mario Alberto Pérez. Analía Pérez Hidalgo. Universidad Nacional de San Juan.
- [23] TEORÍA DE TELECOMUNICACIONES I. Sistemas Analógicos. Víctor Fabián Miramá Pérez. Departamento de Telecomunicaciones. Universidad del Cauca.

5.4. Anexos

5.4.1. Anexo1

Geofono vertical SM-24

Transductor electromecánico, conocido como "geófono", transforma el movimiento de suelo (o las ondas sísmicas) en una señal eléctrica que puede ser leído fácilmente por un microcontrolador. Diseñado para ofrecer alto rendimiento, baja distorsión, este geófono vertical tiene una frecuencia natural de 10 Hz, una sensibilidad de 28,8 V / m / s, una distorsión típica de 0,03 % y un ancho de banda de 10 Hz a 240 kHz.

- Frecuencia
 - Frecuencia natural: 10 Hz
 - Tolerancia: 2,5
 - Máximo ángulo de inclinación respecto a determinados Fn: 10 °
 - Frecuencia típica espuria: >240 Hz
- Distorsión
 - Frecuencia de distorsión: 12 Hz
 - Distorsión típica: 0,03 %
- Damping
 - Circuito abierto (típico): 0.25
 - Resistencia de derivación para la calibración de amortiguación: 1339 ohmios
 - Amortiguación con calibración de derivación: 0,6
 - Con la tolerancia de calibración de derivación: + 5 % - 0 %
- Sensibilidad
 - Sensibilidad: 28,8 V / m / s

- Tolerancia: 2,5
 - RtBcfn: 6000 ohmios Hz - masa en movimiento: 11 g - excursión máxima de la bobina pp: 2 mm
- Resistencia de Bobina
 - Estándar: 375 ohmios
 - Tolerancia: + / - 2.5 %
- Las Características Físicas
 - Diámetro: 25,4 mm
 - Altura: 32 mm
 - Peso: 74 g
 - Temperatura de funcionamiento: -40 ° C a +100 ° C (-40 ° F a 212 ° F)

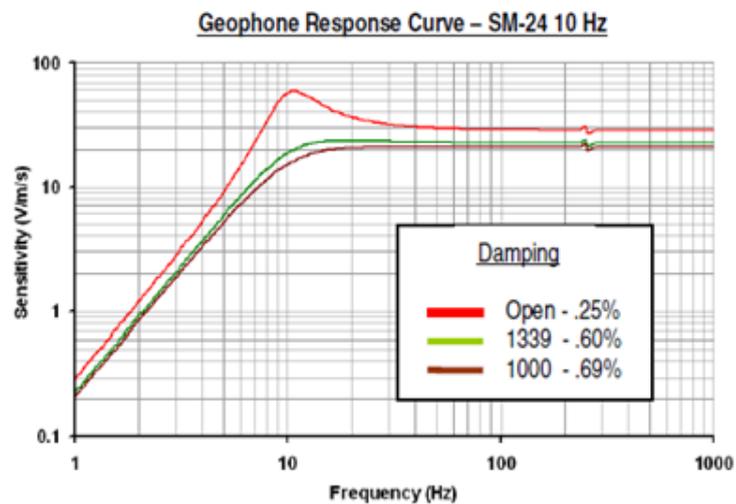


Figura 5.30: Gráfica de Sensibilidad en función de la Frecuencia. Fuente Datasheet SM-24

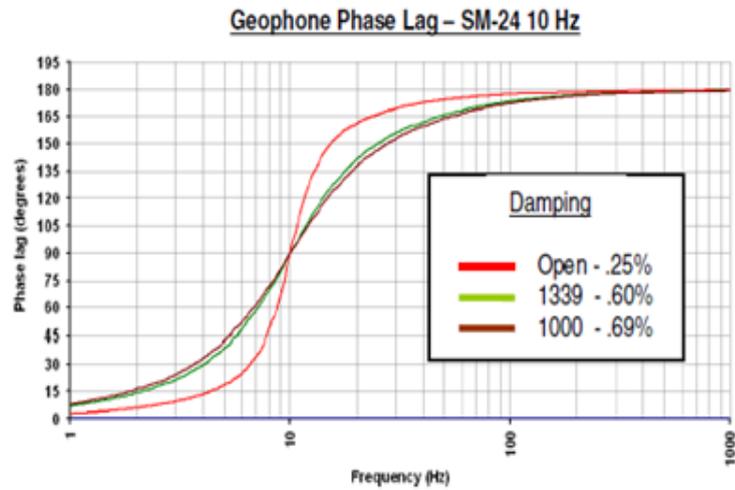


Figura 5.31: Gráfica de la Fase de Retardo en función de la Frecuencia. Fuente Datasheet SM-24

5.4.2. Anexo2

Convertor analógico a digital Delta Sigma (ADC_DelSig)

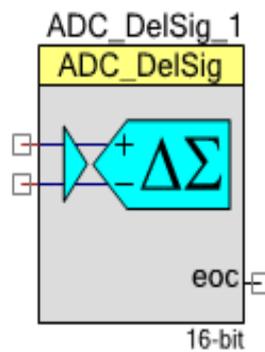


Figura 5.32: Diagrama de símbolos Convertor Analógico. Fuente www.cypress.com

Características

- Resoluciones seleccionables, de 8 a 20 bits
- Once rangos de entrada para cada resolución
- Frecuencia de muestreo 8 sps a 384 ksps
- Modos operacionales:
 - Muestra única
 - Multimuestra
 - Modo continuo
 - Multi-muestra (Turbo)
- Búfer de entrada de alta impedancia de entrada
 - Entrada de búfer de entrada seleccionable (1, 2, 4, 8) o bypass de búfer de entrada
- Múltiples opciones de referencia internas o externas
- Configuración automática de energía
- Hasta cuatro configuraciones ADC en tiempo de ejecución

Descripción General

El convertidor analógico a digital Delta Sigma (ADC_DelSig) proporciona un extremo delantero de baja potencia y bajo nivel de ruido para aplicaciones de medición de precisión. Puede usarlo en una amplia gama de aplicaciones, según la resolución, la frecuencia de muestreo y el modo de operación. Puede producir audio de 16 bits; Alta velocidad y baja resolución para procesamiento de comunicaciones; y conversiones de alta velocidad y baja velocidad de 20 bits para sensores como medidores de tensión, termopares y otros sensores de alta precisión. Cuando se procesa información de audio, ADC_DelSig se usa en un modo de operación continua. Cuando se usa para escanear múltiples sensores, ADC_DelSig se usa en uno de los modos de muestra múltiple. Cuando se usa para mediciones de alta resolución de un solo punto, ADC_DelSig se usa en modo de muestra única.

5.4.3. Anexo3

Transmisor receptor asíncrono universal (UART)

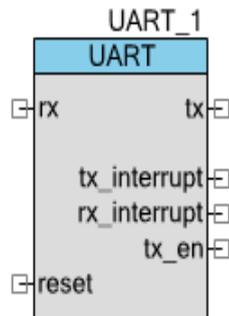


Figura 5.33: Diagrama de símbolos Transmisor Receptor Asíncrono Universal (UART). Fuente www.cypress.com

Características

- Modo de dirección de 9 bits con detección de dirección de hardware
- Baudios de 110 a 921600 bps o arbitrarios de hasta 4 Mbps
- RX y TX buffers = 4 a 65535
- Detección de errores de encuadre, paridad y desbordamiento
- Dúplex completo, semidúplex, solo TX, y RX solo hardware optimizado
- Dos de cada tres votantes por bit
- Generación y detección de señal de rotura
- Sobremuestreo de 8x o 16x

Descripción General

El UART proporciona comunicaciones asíncronas comúnmente denominadas RS232 o RS485. El componente UART se puede configurar para versiones Full Duplex, Half Duplex, RX only o TX only. Todas las versiones proporcionan la misma funcionalidad básica. Sólo difieren en la cantidad de recursos utilizados.

5.4.4. Anexo4

Interfaz Periférica Serial (SPI) Master

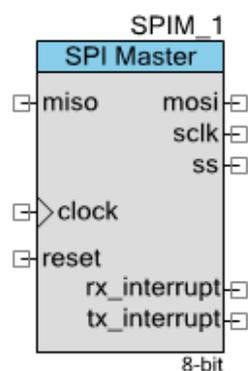


Figura 5.34: Diagrama de símbolos Interfaz Periférica Serial (SPI). Fuente www.cypress.com

Características

- Ancho de datos de 3 a 16 bits
- Cuatro modos de funcionamiento SPI
- Velocidad de bits de hasta 18 Mbps

Descripción General

El componente SPI Master proporciona una interfaz SPI maestra de 4 hilos, estándar de la industria. También puede proporcionar una interfaz SPI de 3 hilos (bidireccional). Ambas interfaces son compatibles con los cuatro modos de funcionamiento SPI, lo que permite la comunicación con cualquier dispositivo esclavo SPI. Además de la longitud de palabra estándar de 8 bits, el SPI Master admite una longitud de palabra configurable de 3 a 16 bits para comunicarse con longitudes de palabra SPI no estándar.

5.4.5. Anexo5

Temporizador

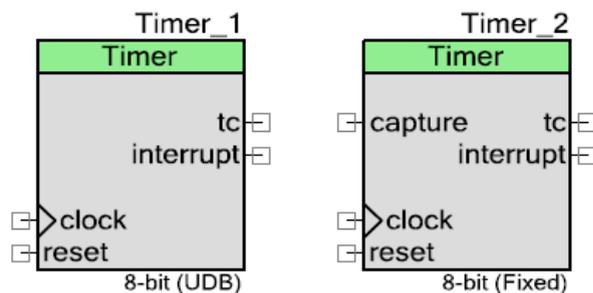


Figura 5.35: Diagrama de símbolos Temporizador. Fuente www.cypress.com

Características

- Implementación de función fija (FF) para dispositivos PSoC 3 y PSoC 5LP
- Temporizador de 8, 16, 24 o 32 bits
- Entrada de captura opcional
- Habilitar, activar y restablecer entradas, para sincronizar con otros componentes
- Modos continuos o de un disparo

Descripción General

El componente Timer proporciona un método para medir intervalos. Puede implementar una función de temporizador básica y ofrece funciones avanzadas como captura con contador de captura e interrupción / generación de DMA.

Para los componentes de dispositivos PSoC 3 y PSoC 5LP se puede implementar utilizando bloques FF o UDB. Los dispositivos PSoC 4 solo admiten la implementación de UDB. Una implementación UDB normalmente tiene más características que una implementación FF. Si el diseño es lo suficientemente simple, considere usar FF y guarde los recursos de UDB para otros propósitos.

5.4.6. Anexo6

Código Principal (Psoc Creator)

```
#include "project.h"
#include <cyapicallbacks.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <ctype.h>
#include <stdlib.h>
#include <isr_1.h>
#define CONVERT_TO_ASCII (0x30u)
#define CLEAR_SCREEN (0x0C)
#define SamplingTime 2
#define CONVERT_TO_ASCII (0x30u)
#define CLEAR_SCREEN (0x0C)
#define SamplingTime 2
void caracterizacion(void);
void envio(int16);
void set_resistance_to_finite_value(int16 );
//void set_resistance_to_finite_value(double R);
void caracterizacion(void);
void envio(int16);
int16 j;
char dat[15], Flag=0;
////////////////////////////////////
uint8 rxstate;
char buf[32];
char *pbuf=buf;
////////////////////////////////////
```

```

uint16 cmd=0x1100;
uint16 binData, binCode;
////////////////////////////////////
int16 res, mVolts;
////////////////////////////////////
CY_ISR(MY_ISR)
{
    Flag = 1;
}
int main(void)
{
    Timer_1_Init();          //INICIALIZA EL TIMER
    Timer_1_Start();
    isr_1_StartEx(MY_ISR); //INICIALIZA LA INTERRUPCION
    CyGlobalIntEnable; /* Enable global interrupts. */
    SPIM_1_Start();
    Usart_Init();
    Usart_Start();
    /* Place your initialization/startup code here (e.g. MyInst_Start())*/
    Adc_Start();
    Adc_StartConvert();
    Adc_IsEndConversion(Adc_WAIT_FOR_RESULT);
    AMux_Start();
    //////////////////////////////////////
    memset(dat, 0, sizeof(dat));
    char8 ch;
    for(;;)
    {
        //    set_resistance_to_finite_value(100);
        Usart_PutString("S");
        caracterizacion();
    }
    ////////////////////////////////////////PARTICION DEL DATO EN DOS BYTES
}
void caracterizacion(void)
{
    int16 i=0;
        AMux_Connect(0);
        CyDelay(150);
        AMux_Disconnect(0);
        Usart_PutString("S");
        while(i < 250)
        {
            if(Flag==1)
            {
                res=Adc_GetResult16();
                mVolts=Adc_CountsTo_mVolts(res);
                envio(mVolts);
                CyDelay(1);
                i++;
                Flag = 0;
            }
        }
}

```

```

        }
    }
    i = 0;
}
////////////////////////////////////
void set_resistance_to_finite_value(int16 R) {
    uint16 cmd=0x1100;
    uint16 binCode;
    // Set digital resistance to a given value
    SPIM_1_Start();
//    binCode    = cmd + R*256.0/1E4;
    binCode    = cmd +R;
    SPIM_1_TxEnable();
    SPIM_1_WriteTxData(binCode);
    return;
}
////////////////////////////////////
void envio(int16 Send)
{
    sprintf(dat , "%d" , Send);
    Usart_PutString(dat);
    Usart_PutCRLF(0xD);
}
/* [] END OF FILE */

```

5.4.7. Anexo7

Rutas de archivos

Un control de ruta de archivo , que se muestra a continuación, es un tipo de datos de LabVIEW que identifica la ubicación de un archivo en el disco.

Una ruta de archivo describe el volumen que contiene el archivo, los directorios entre el nivel superior del sistema de archivos y el archivo, y el nombre del archivo. Ingrese o muestre una ruta usando la sintaxis estándar para una plataforma dada con el control o indicador de ruta. La siguiente tabla incluye información sobre los diferentes tipos de rutas de archivo que puede usar en LabVIEW.

Tipo	Descripción	Uso
Camino Absoluto	Una ruta absoluta describe la ubicación de un archivo o directorio desde el nivel superior del sistema de archivos. Por ejemplo, E: / Temp / test.txt .	Use una ruta absoluta para apuntar a la misma ubicación en un sistema de archivos, independientemente del directorio de trabajo actual.
Camino Relativo	Una ruta relativa describe la ubicación de un archivo o directorio en relación con una ubicación arbitraria en el sistema de archivos. Por ejemplo, .. / test.txt .	Use una ruta relativa para apuntar a una ubicación que pueda cambiar con el directorio de trabajo actual. Utilice rutas relativas en VIs para evitar tener que volver a trabajar las rutas si crea una aplicación o ejecuta el VI en una computadora diferente.
Camino Simbólico o Pseudópata	Una ruta simbólica o pseudópata es una forma corta predefinida de una ruta que puede utilizar en LabVIEW. Por ejemplo, la ruta simbólica <vilib> representa el directorio <vi.lib> en el directorio labview . En el tiempo de ejecución, LabVIEW interpreta la ruta simbólica <vilib> como una ruta absoluta, como C: Archivos de programa (x86) National Instruments LabVIEW 2009 vi.lib o D: Archivos de programa National Instruments LabVIEW 2009 vi.lib , dependiendo de donde está instalado LabVIEW.	Use una ruta simbólica para apuntar a una ubicación que cambie con el entorno de ejecución, como dónde está instalado LabVIEW en el disco o qué usuario ha iniciado sesión.

Tabla 5.2: Tablas Rutas de archivos. Fuente www.ni.com

5.4.8. Anexo8

Buffer de Lectura

Comunicación en serie - Serial básico de escritura y lectura

Se abre un recurso VISA y se configura un puerto COM. A continuación, realiza una lectura de puerto serie, una escritura de puerto serie o ambas según las opciones (lectura o escritura) que el usuario selecciona en el panel frontal. Si se seleccionan ambos, el VI primero escribirá los datos, luego los leerá y finalmente cerrará la sesión de VISA que se abre en el puerto. Si se realiza una lectura, este VI esperará hasta que se reciba el número especificado de bytes en el puerto. Solo se leerá el número de bytes especificados.

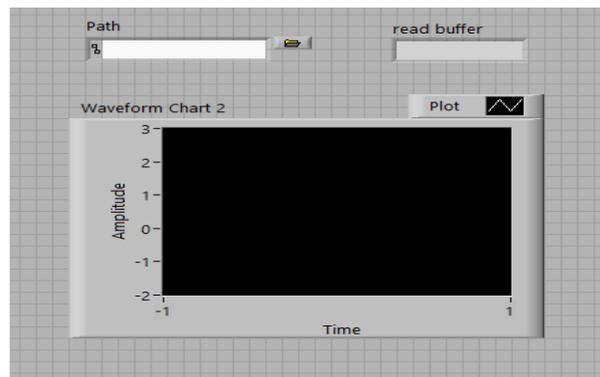


Figura 5.36: Diagrama de Buffer de Lectura (Labview). Fuente propia.

5.4.9. Anexo9

Gráficos de formas de onda y gráficos

LabVIEW incluye el gráfico de forma de onda y el gráfico para mostrar los datos típicamente adquiridos a una tasa constante.

Gráficos de forma de onda

El gráfico de forma de onda muestra uno o más gráficos de mediciones muestreadas de manera uniforme. El gráfico de forma de onda grafica solo funciones de un solo

valor, como en $y = f(x)$, con puntos distribuidos uniformemente a lo largo del eje x , como las formas de onda variables que varían con el tiempo. El siguiente panel frontal muestra un ejemplo de un gráfico de forma de onda.

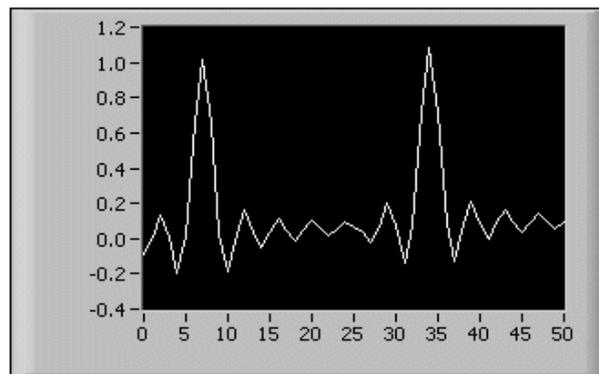


Figura 5.37: Gráfico de forma de onda (Labview). Fuente www.ni.com

El gráfico de forma de onda puede mostrar gráficos que contienen cualquier número de puntos. El gráfico también acepta varios tipos de datos, lo que minimiza la medida en que debe manipular los datos antes de mostrarlos.

Visualización de un gráfico único en gráficos de forma de onda

El gráfico de forma de onda acepta varios tipos de datos para los gráficos de forma de onda de un solo gráfico. El gráfico acepta una única matriz de valores, interpreta los datos como puntos en la gráfica e incrementa el índice x en uno, comenzando en $x = 0$. La gráfica acepta un grupo de un valor inicial de x , una delta x y una matriz de y datos. El gráfico también acepta el tipo de datos de forma de onda, que transporta los datos, la hora de inicio y el delta t de una forma de onda.

El gráfico de forma de onda también acepta el tipo de datos dinámico, que se utiliza con Express VIs. Además de los datos asociados con una señal, el tipo de datos dinámicos incluye atributos que proporcionan información sobre la señal, como el nombre de la señal o la fecha y hora en que se adquirieron los datos. Los atributos especifican cómo aparece la señal en el gráfico de forma de onda. Cuando el tipo de datos dinámicos incluye un solo valor numérico, el gráfico traza el valor único y automáticamente formatea la leyenda del trazado y la marca de tiempo de la escala x . Cuando el tipo de datos dinámicos incluye un solo canal, el gráfico traza la forma

de onda completa y automáticamente formatea la leyenda del trazado y la marca de tiempo de la escala x.

Para obtener ejemplos de los tipos de datos que acepta un gráfico de forma de onda, consulte el Tipo de datos de gráfico de forma de onda VI en el directorio de laboratorio / ejemplos / Controles e indicadores / Gráficos y gráficos / Gráficos de forma de onda y gráficos.

5.4.10. Anexo10

Diagrama Interfaz de Usuario (Diagrama de Bloques)

A continuación se presenta el Diagrama de bloques que hace parte de la interfaz de usuario para la toma de datos de los geófonos.

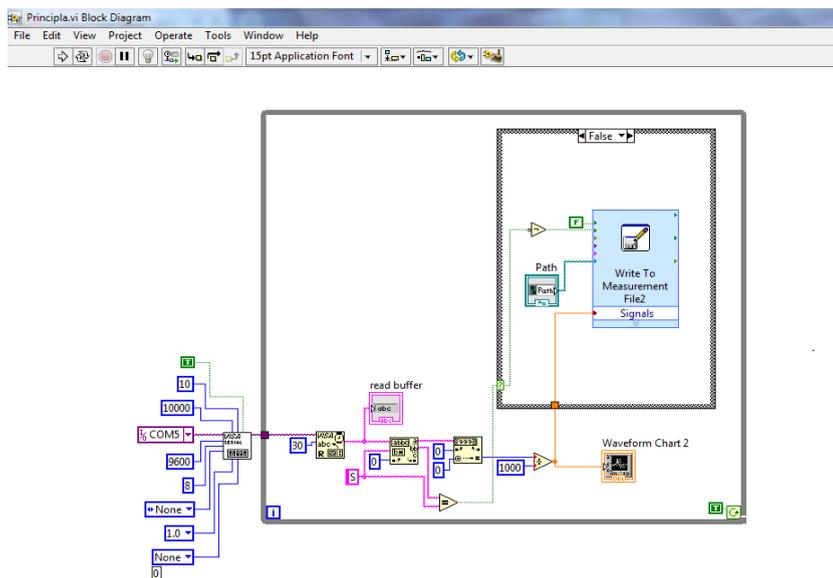


Figura 5.38: Diagrama de Bloques (Interfaz de Usuario). Fuente Propia

5.4.11. Anexo11

Programación Tarjeta de Desarrollo SM800L (MÓDULO GPRS)

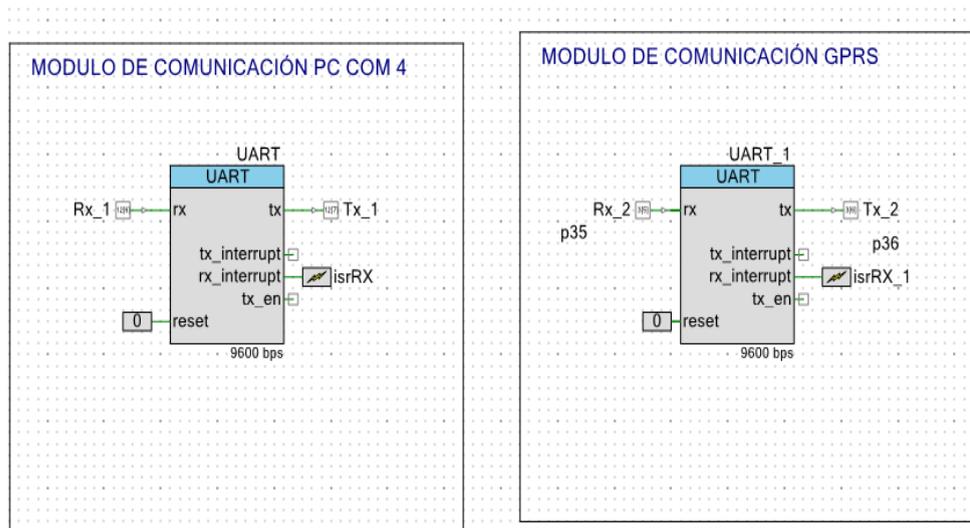


Figura 5.39: Bloques de Comunicación para el desarrollo y funcionamiento del Módulo Gprs. Fuente Propia.

El Módulo Gprs funciona entre una comunicación con el computador desde donde se van a enviar los comandos hacia el módulo Gprs, para poderla realizar se deben generar dos módulos de comunicación de tipo UART, uno que se va a comunicar con el computador y el otro que se va a comunicar con el Módulo Gprs, cada Módulo está configurado a 9600 Bit/s para la comunicación entre los dos módulos, de igual manera la configuración es de 8 bits de datos y Full transmisión (FULL UART TX+RX) para recepción y transmisión de datos.

Código (Programación)

```
#include "project.h"
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

int16 res ,mVolts;

char str[1024];
uint8 recibir , recibir2;
```

```

void sendRequest(char* command, int ticks); // función que envia los
datos al servidor y el pc(revice el caracter y un tiempo de espera)
void Conexion2(); //Lista de comando AT a enviar

//Variables que se desean enviar al servidor

//int Dato1, Dato2, Dato3;
double Dato1;

// Interrupción tarjeta PSoC (NARANJA a TX2, AMARILLO a Rx2
CY_ISR(datosGPRS){

    recibir = UART_1_GetChar(); //leo GPRS
    UART_PutChar(recibir); // envio al pc

}

// Interrupción que para visuaizar los datos 12(7)Tx, 12(6)Rx
CY_ISR(datosPC){

    recibir2 = UART_GetChar();
    UART_1_PutChar(recibir2);

}

int main(void)
{
    CyGlobalIntEnable; /* Enable global interrupts. */

    UART_Start(); // Inicia modulo que comunicación con el PC
    UART_1_Start(); // Inicia el modulo que comunica la psoc con el
    GPRS
    isrRX_1_StartEx(datosGPRS); // interrupción de lectura de lo que
    recibe el gprs
    isrRX_StartEx(datosPC); //Interrupción que envia los datos al pc
    Adc_Start();
    AMux_Start();

    for (;;)
    {
        /* Place your application code here. */
        Conexion2(); //

    }
}

```

```

void sendRequest(char* command, int ticks )
{

    UART_1_PutString(command);
    CyDelay(ticks);

}

void Conexion2(void){
//Configuración de módulo GPRS
AMux_Connect(0);
CyDelay(100);
res=Adc_GetResult16();
Dato1= Adc_CountsTo_mVolts(res);

sendRequest("AT\r\n",1000);
sendRequest("AT+CPIN?\r\n",1000);
sendRequest("AT+CREG?\r\n",1000);
sendRequest("AT+CGATT?\r\n",1000);
sendRequest("AT+CIPSHUT\r\n",1000);
sendRequest("AT+CIPSTATUS\r\n",2000);
sendRequest("AT+CIPMUX=0\r\n",2000);
sendRequest("AT+CSTT=\"internet\"\r\n",1000);
sendRequest("AT+CIICR\r\n",3000);
sendRequest("AT+CIFSR\r\n",2000);
sendRequest("AT+CIPSPRT=0\r\n",3000);
//Conexión con web server
sendRequest("AT+CIPSTART=\"TCP\", \"api.thingspeak.com\", \"80\"\r\n",6000);
sendRequest("AT+CIPSEND\r\n",4000);
// envío de datos al servidor Dato1, Dato2, Dato3
sprintf(str, "GET https://api.thingspeak.com/update?api_key=05DVHАОC859DQL54&field1= %f&field2= %f&field3= %f\r\n", Dato1);

sendRequest(str,4000);
UART_1_PutChar((char)26);// control z
CyDelay(5000);
sendRequest(" ",1);// espacio en blanco
sendRequest("AT+CIPSHUT\r\n",100);// termina conexión
}

char str[1024];

```

Se incluyen las librerías necesarias para el proyecto, se comienza con la creación de un dato de tipo *char* el cual es de tipo *string* con un tamaño de (1024) esto con el fin de garantizar el funcionamiento correcto por si la información es demasiado grande para los datos que se reciben.

- uint8 recibir, recibir2;

Se crean dos variables de tipo entero sin signo, que van a ser las variables donde se reciben los datos del puerto que se conecta con el Gprs, desde ahí responde cada vez que se envía un comando AT bien sea con un Ok o con un símbolo, así se lee cada operación.

- void sendRequest(char* command, int ticks); // función que envia los datos al servidor y el pc(revice el caracter y un tiempo de espera)

Se crea una función (**sendRequest**) la cual va a enviar los comandos o datos al servidor y al pc, la función recibe dos parámetros, uno que es de tipo char (**command**) y otro de tipo entero (**ticks**) la cual va a tener la función de delay (retardo) entre el envío de datos.

- void Conexion2(); //Lista de comando AT a enviar

Se crea una función (**Conexion2**) la cual va a tener todos los comandos AT que se van ejecutando en orden.

- double Dato1;

Se crea la variable Dato1 que contiene los datos del conversor ADC la cual lee los datos del geófono.

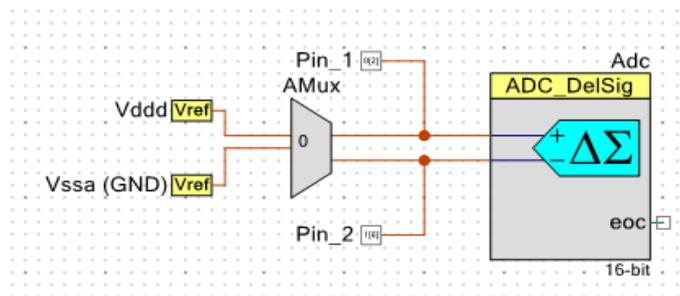


Figura 5.40: Configuración del Módulo ADC para el Código Gprs. Fuente Propia.

En el conversor ADC entran dos datos (**Vddd** y **Vssa**) los cuales se obtienen en la variable `res=Adc_GetResult16()`; y posteriormente se guardan en `Dato1=Adc_CountsTo_mVolts(res)`;

- // Interrupción tarjeta PSoC (NARANJA a TX2, AMARILLO a Rx2)

```

CY_ISR(datosGPRS){

    recibir = UART_1_GetChar(); //leo GPRS
    UART_PutChar(recibir); // envio al pc

}

// Interrupción que para visuaizar los datos 12(7)Tx, 12(6)Rx
CY_ISR(datosPC){

    recibir2 = UART_GetChar();
    UART_1_PutChar(recibir2);

}

```

Se crean dos interrupciones, una que se llama (**datosGPRS**) y otra que se llama (**datosPC**), lo que van a hacer es que los comandos AT que se envíen desde la PSoC hacia el módulo GPRS también se van a poder mostrar por el Puerto UART del PC, de igual manera los datos del GPRS que se reciben y los comandos que se envían también los recibe el PC, lo que se genera es la comunicación bidireccional entre el computador y el módulo GPRS.

CY_ISR: Comando para Interrupción.

`recibir = UART_1_GetChar();` = Leer todo lo que llega por el puerto, en este caso, lo que envía el Módulo Gprs.

`UART_PutChar(recibir);` = Se envía al puerto del PC todo lo que se ha recibido de `UART_1_GetChar();`

- `CyGlobalIntEnable; /* Enable global interrupts. */`

Se habilitan las interrupciones globales, debido a que se generaron las interrupciones mencionadas anteriormente (`CY_ISR`)

- `UART_Start();` = Inicia módulo de comunicación con el PC.
- `UART_1_Start();` = Inicia el módulo que comunica la Psoe con el GPRS.
- `isrRX_1_StartEx(datosGPRS);` = Interrupción de lectura de lo que recibe el Gprs.
- `isrRX_StartEx(datosPC);` = Interrupción que envía los datos al PC.

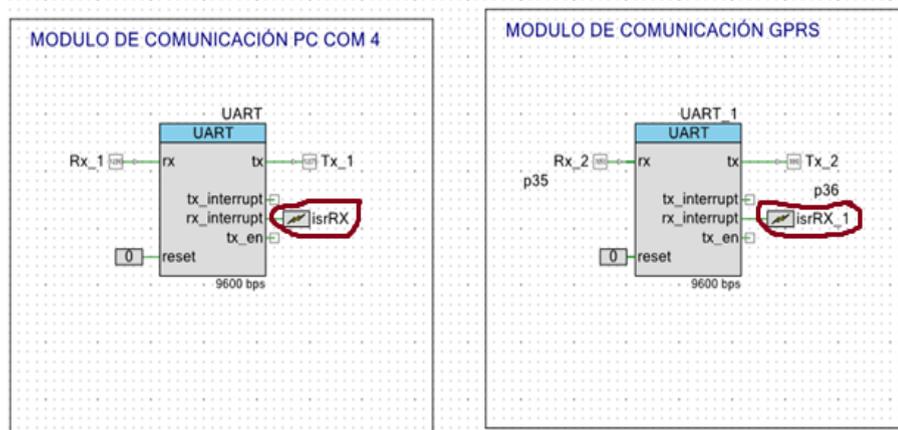


Figura 5.41: Bloques de Comunicación para el desarrollo y funcionamiento del Módulo Gprs. Fuente Propia.

`isrRX_StartEx` = Interrupción Externa Módulo UART PC

`isrRX_1_StartEx` = Interrupción Externa Módulo UART GPRS

- `Adc_Start();` = Se Inicializa el convertor análogo/digital

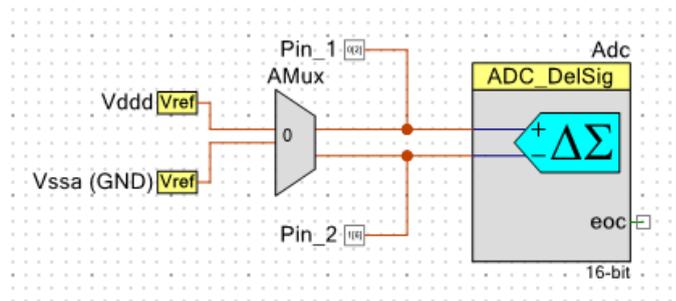


Figura 5.42: Configuración del Módulo ADC para el Código Gprs. Fuente Propia.

- `AMux_Start();` = Se Inicializa el Mux, posteriormente se le indica por cual canal va a leer.
- `Conexion2(); //`

La función `Conexion2();` contiene todas las funciones para realizar los comandos AT.

- `AMux_Connect(0);` = Leer el Canal 0 del Multiplexor.
- `res=Adc_GetResult16();` = Variable que guarda los datos que contiene el conversor ADC en ese momento.
- `Dato1= Adc_CountsTo_mVolts(res);` = Se le reasigna la información que contiene `res` a la función `Dato1` y posteriormente se convierte dicha información en milivoltios. La información de `Dato1` es la que será enviada al Servidor.

Las siguientes funciones son para realizar la conexión con el Servidor.

- `sendRequest("AT/r/n",1000);` = Se llama a la función `sendRequest`, recibe dos parámetros, uno de tipo `char` (texto) y otra variable de tipo entero el cual es el tiempo de conexión cuando se envía el dato (10sg). "AT" = Se usa para identificar si el GPRS está activado, de ser así se recibe una respuesta Ok, por eso la conexión debe ser bidireccional.
- `sendRequest("AT+CPIN?/r/n",1000);` = Introduce el Pin de la Simcard por si lo tiene (Espera 1sg).
- `sendRequest("AT+CREG?/r/n",1000);` = Comprueba la conexión de Red para ver si el módulo esta conectado (Espera 1sg y envía respuesta)
- `sendRequest("AT+CGATT?/r/n",1000);` = Cuando se establece la conexión a Internet, Se conecta al módulo Gprs de Red.

- `sendRequest("AT+CIPSHUT/r/n",1000);` = Cierra el contexto Pdp para la conexión con el servidor y así evitar la pérdida de datos, se deja activada en el Módulo Gprs.
- `sendRequest("AT+CIPSTATUS/r/n",2000);` = Comprueba si el Módulo encontrado da Red, en este caso TIGO fue el operador usado.
- `sendRequest("AT+CIPMUX=0 /r/n",2000)c` = Se configura el dispositivo para una conexión IP simple con el servidor.
- `sendRequest("AT+CSST=/"internet/"r/n",1000);` = Este comando indica que se va a habilitar la opción de internet de la Simcard.
- `sendRequest("AT+CIICR/r/n",3000);` = Activa el Módulo Inalámbrico para hacer la conexión a Internet.
- `sendRequest("AT+CIFSR /r/n",2000);` = Obtiene la Ip del Módulo Gprs.
- `sendRequest("AT+CIPSPRT=0/r/n",3000);` = Establecer si el indicador Genera Eco después de emitir el comando.

Posteriormente la Conexión con el servidor Web.

- `//Conexión con web server sendRequest ("AT+CIPSTART=/"TCP/" /"api.thingspeak.com/" /"80/"r/n",6000);`
= Se envía el commando AT+CIPSTART al cual se le asigna la dirección con el servidor de tipo TCP/IP que es api.thingspeak.com conectado por el puerto 80.
- `sendRequest("AT+CIPSEND/r/n",4000);` = Se envía el Mensaje a la página que se enviarán los datos, en este caso los datos del conversor ADC obtenidos.

Envío de datos al Servidor

```
// envio de datos al servidor Dato1
sprintf(str,"GET https://api.thingspeak.com/update?api_key=05DV
HAOC859DQL54&field1=%f \r\n",Dato1); = Se pasa la ruta donde se
enviaran los datos al servidor como un string, los datos serán de
tipo flotante.
```

```
sendRequest(str,4000); = Se envía la variable str que tiene todo la
dirección anterior, se envía durante 4 segundos para que alcance el
servidor a responder y a graficar.
```

```
UART_1_PutChar((char)26);// control z = Se usa como finalizador de
datos, se cierra el sendRequest.
```

```
CyDelay(5000); = Se espera 5 segundos en dar respuesta, si todo el
proceso ha resultado ok, si el servidor recibió los datos de Dato1 y
envía el carácter de finalizador, cierra el puerto.
```

```
sendRequest(" ",1);// espacio en blanco = Después de cerrar el puerto
se envía un 1 y la respuesta se envía como un espacio en blanco.
```

```
sendRequest("AT+CIPSHUT\r\n",100);// termina conexión = Se cierra
el puerto , se finaliza la conexión con el servidor
}
```

Pines de Conexión para el Módulo Gprs

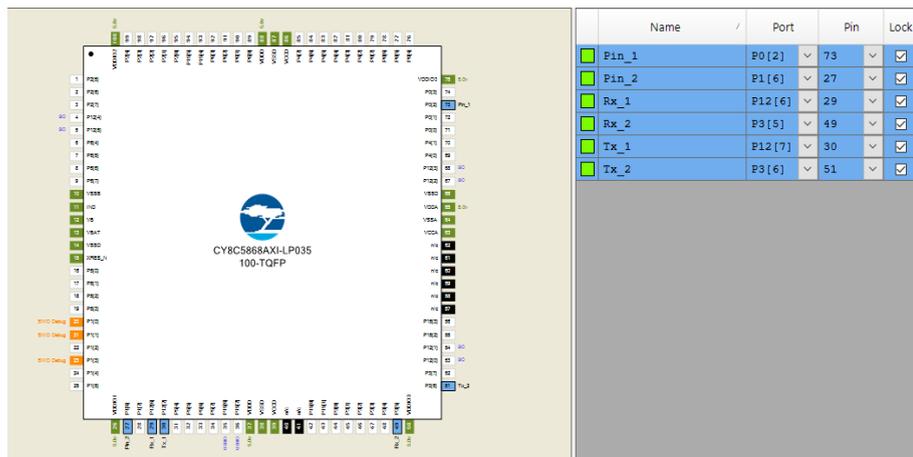


Figura 5.43: Pines de Conexión del Módulo ADC para el Código Gprs. Fuente Propia.

- PIN 0[2] Lectura del Conversor Análogo/Digital
- PIN 1[6] Lectura del Conversor Análogo/Digital
- PIN 12[6] Recepción Módulo UART (PC)
- PIN 3[5] Recepción Módulo UART (GPRS)
- PIN 12[7] Transmisión Módulo UART (PC)
- PIN 3[6] Transmisión Módulo UART (GPRS)

5.4.12. Anexo12

Código Correlación de Residuos(RUIDO BLANCO).

Función - Estimación del modelo Arx por mínimos cuadrados.

```

function [A1,A2,YMeasured,YHat] = least_squares_estimation_arx_model(Y)
% Second order ARX:  $y(k) = -a1*y(k-1) -a2*y(k-2)$ ;
%
%  $\hat{y}(3) = -a1*y(2) -a2*y(1)$ ;
%  $\hat{y}(4) = -a1*y(3) -a2*y(2)$ ;
% ...
%  $\hat{y}(N) = -a1*y(N-1) -a2*y(N-2)$ ;
Options = {'Matlab','Arduino'};
N = length(Y);
YMeasured = Y(3:N);
YA2 = Y(1:N-2);
YA1 = Y(2:N-1);
Style = Options{1};
switch Style,
case 'Matlab'
    Arx_coeff = [-YA1, -YA2] \ YMeasured;
    A1 = Arx_coeff(1);
    A2 = Arx_coeff(2);
case 'Arduino'
    Yk_x_Ykm1 = 0;
    Yk_x_Ykm2 = 0;
    Ykm1_x_Ykm1 = 0;
    Ykm2_x_Ykm2 = 0;
    Ykm1_x_Ykm2 = 0;
    %%OJO En Arduino debe ser desde k = 2 hasta N-1
    for k = 3:N,
        Yk_x_Ykm1 = Yk_x_Ykm1 + Y(k)*Y(k-1);
        Yk_x_Ykm2 = Yk_x_Ykm2 + Y(k)*Y(k-2);
        Ykm1_x_Ykm1 = Ykm1_x_Ykm1 + Y(k-1)*Y(k-1);
        Ykm2_x_Ykm2 = Ykm2_x_Ykm2 + Y(k-2)*Y(k-2);
        Ykm1_x_Ykm2 = Ykm1_x_Ykm2 + Y(k-1)*Y(k-2);
    end
    % Determinant
    D = Ykm1_x_Ykm1 * Ykm2_x_Ykm2
        - Ykm1_x_Ykm2 * Ykm1_x_Ykm1;
    A1 = (1/D)*(-Ykm2_x_Ykm2 *
        Yk_x_Ykm1 + Ykm1_x_Ykm2*Yk_x_Ykm2);
    A2 = (1/D)*(+Ykm1_x_Ykm2*
        Yk_x_Ykm1 - Ykm1_x_Ykm1*Yk_x_Ykm2);
end
YHat = -A1*YA1-A2*YA2;
End

```

Esta parte del código lo que realiza es la estimación del modelo Arx por mínimos cuadrados, se puede hacer obteniendo directamente los datos de los sensores desde la tarjeta de adquisición o desde una muestra adquirida previamente, para nuestro caso se realiza con muestras previamente obtenidas para cada uno de los sensores y los valores adquiridos en estas muestras procesados posteriormente en Matlab. Lo que se busca es la caracterización del sensor, en este caso el geófono, así al hacer la regresión lineal lo que se quiere es ver cuál es la que mejor se ajusta, al hacerlo con mínimos cuadrados lo que se calcula es que la distancia entre los valores estimados y los valores reales sean lo mínimo posibles para que se vaya ajustando al modelo real, así ser más preciso.

Una vez adquirido los coeficientes del modelo Arx se procede a la obtención de los parámetros del geófono, en este caso se calcula la Frecuencia Natural y el Coeficiente de Amortiguamiento.

Obtención de los parámetros del geófono en tiempo discreto del modelo ARX.

```
function [Xi,Wn] = get_geophone_parameters_from_discrete_
time_arx_model(a1,a2,Ts)
    Options = {'Matlab','Arduino'};
    Style = Options{1};
    switch Style
        case 'Matlab'
            % Poles of the ARX mode
            P = roots([1 a1 a2]);
            P1 = P(1);
            % Polar representation of the pole
            R = abs(P1);
            Theta = angle(P1);
            % Damping
            Xi = sqrt(log(R)^2 / (log(R)^2
+ Theta^2));
            % Natural frequency
            Wn = Theta / (Ts*sqrt(1 - Xi^2));
        case 'Arduino'
            RealPart = -a1/2;
            ImagPart = sqrt(4*a2-a1*a1)/2;
            R = sqrt(RealPart*RealPart+
ImagPart*ImagPart);
            Theta = atan2(ImagPart,RealPart);
            % Damping
            Xi = sqrt(log(R)^2 / (log(R)^2
```

```

        + Theta^2));
        % Natural frequency
        Wn = Theta / (Ts*sqrt(1 - Xi^2));
    end
end

```

Teniendo los coeficientes del modelo ARX se pasan a una representación polar para poder calcular el coeficiente de amortiguamiento y la Frecuencia Natural como Xi y Wn respectivamente.

De los datos obtenidos para cada prueba de los geófonos se realiza un análisis residual para encontrar la correlación de los residuos.

Análisis Residual

```

function Test = residual_analysis(Ym,Yp,Plot)
%Ym : Measured output
%Yp : Predicted output
MaxLag = 25;
Error = Ym - Yp;
Corr = xcorr(Error,'coeff',MaxLag);

% Confidence interval
RCorr = Corr;
RCorr(MaxLag+1) = [];
N = length(Error);
Sr = sqrt((1-RCorr.^2)/(N-2));
Conf_Interval = max(Sr * tinv(0.99,N-2));
Test = max(abs(RCorr));
% Rectangle with the confidence interval
if nargin == 2
    Plot = 'Noplot';
end
if strcmpi(Plot,'Plot') == 1
    Lags = -MaxLag:MaxLag;
    X = [min(Lags); max(Lags); max(Lags);
        min(Lags)];
    Y = [-1; -1; 1; 1] * Conf_Interval;
    fill(X,Y,'y');
    hold on;
    % Correlation
    stem(Lags,Corr,'Color','b');
    xlabel('Retardo');
    ylabel('Coeficiente de correlación');
    title('Correlación de los residuos del modelo');
end
end

```

Los residuos se calculan como la diferencia entre los valores estimados y los valores predichos donde se nombran como el error. Para los resultados en las gráficas de la correlación de los residuos se determinan los retardos en valores de cada 5 intervalos con un rango de $[-25 \text{ a } 25]$. En los intervalos de confianza representados en las gráficas en color amarillo nos remitimos al ejemplo que presenta Matlab como (*Confidence Intervals for Sample Autocorrelation*) para poder determinar ese intervalo de confianza y así encontrar el coeficiente de correlación, en nuestro proyecto el intervalo de confianza se establece como del 99 %. En la siguiente gráfica se muestra un ejemplo de la correlación de residuos obtenida para la prueba de un geófono.

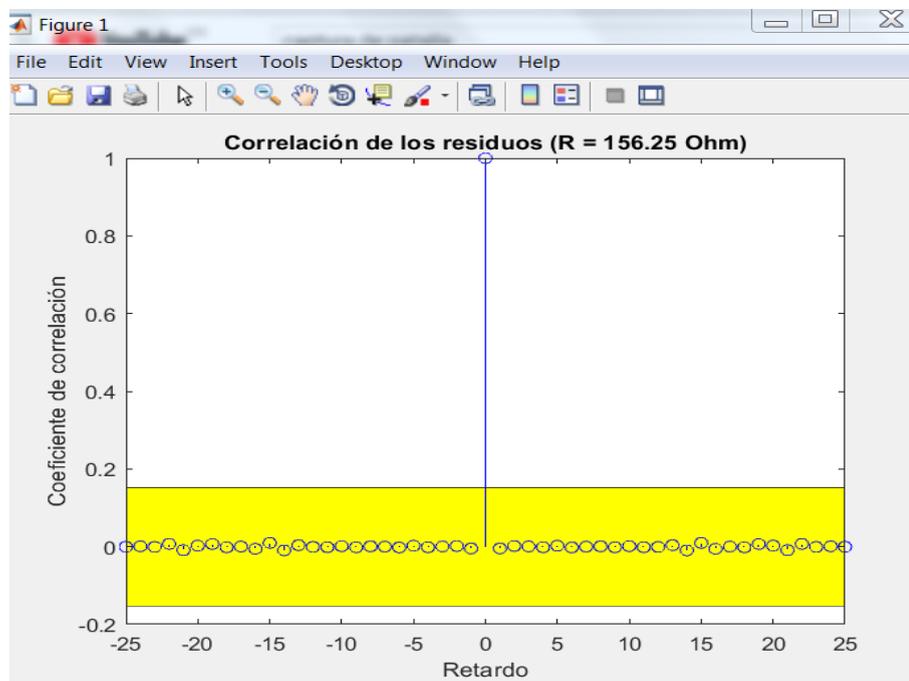


Figura 5.44: Correlación de Residuos para el Geófono aplicando una prueba de Ruido Blanco. Fuente Propia.

En la siguiente parte del proyecto se presentan las gráficas de Frecuencia Natural y el Coeficiente de Amortiguamiento Relativo al igual que la gráfica de porcentaje de ajuste en función de la resistencia de carga para cada una de las pruebas realizadas en cada geófono.

Prueba Principal (Resistencia Variable)

```

clc;
clear variables;
close all;

% Experiment with resistance
% Output of the geophone
Fid = fopen('prueba_2.txt','rt');
fileID = fopen('Damping.txt','wt');
tline = fgetl(Fid);
while ischar(tline)
    A = char(strrep(tline,',','.'));
    fprintf(fileID,'%s\n',A);
    tline = fgetl(Fid);
end
fclose(fileID);
Fid = load('Damping.txt','rt');
Fid = Fid(1:length(Fid),2);
YAll = reshape(Fid,250,[]);
YAll = YAll(:,end:-1:1);
YAll(1:10,:) = [];

%plot(YAll)

%%Experiment with resistance
% Output of the geophone
Ts = 1E-3;
% Fit function
Fit = @(X,Y) 100*(1 - norm(Y-X)/norm
(Y-mean(Y)));
% estimacion modelo ARX
NMin = 1;
NMax = 250;
NExp = NMax - NMin + 1;
R = zeros(NExp,1);
Fit_Level = zeros(NExp,1);
Xio = zeros(NExp,1);
Wno = zeros(NExp,1);
Test = zeros(NExp,1);
for i = 1:NExp
    Y = YAll(:,NMin + i - 1);
    [A1,A2,YMeasured,YHat] = least_squares_estimation_
    arx_model(Y);
    Test(i) = residual_analysis(YMeasured,
    YHat,'Noplot');
    NData = length(YMeasured);
    Time = (0:1:(NData-1))' * Ts;
    % Damping y Frecuencia Natural
    R(i) = (NMin + i - 1) * 10E3 / 256;
    Fit_Level(i) = Fit(YMeasured,YHat);

```

```

[Xio(i),Wno(i)] = get_geophone_parameters_from_
discrete_time_arx_model(A1,A2,Ts);
fprintf('PARAMETROS PARA R = %.2f\n',R(i));
fprintf('Porcentaje de ajuste : %10.4f [adimensional]\n',Fit_
Level(i));
fprintf('Damping : %10.4f [adimensional]\n',
Xio(i));
fprintf('Frecuencia Natural : %10.4f [rad/seg]\n',Wno(i));
end
Fit_Level(isnan(Wno)) = [];
R(isnan(Wno)) = [];
Xio(isnan(Wno)) = [];
Wno(isnan(Wno)) = [];

%%Worst and best whiteness test
% Best test
[~,IBest] = min(Test);
Y = YAll(:,NMin + IBest - 1);
[~,~,YMeasured,YHat] = least_squares_estimation_
arx_model(Y);
figure; residual_analysis(YMeasured,YHat,'Plot');
title(sprintf('Correlación de los residuos (R = %.2f Ohm)',
R(IBest)));

% Best test
[~,IWorst] = max(Test);
Y = YAll(:,NMin + IWorst - 1);
[~,~,YMeasured,YHat] = least_squares_estimation_
arx_model(Y);
figure; residual_analysis(YMeasured,YHat,'Plot');
title(sprintf('Correlación de los residuos (R = %.2f Ohm)',
R(IWorst)));

%%Parametros
%Damping
figure;
subplot(2,1,1); plot(R,Xio,'LineWidth',2); grid on;
title('Damping en funcion de la Resistencia de carga');
xlabel('Resistencia [Ohms]');
%Frecuencia Natural
subplot(2,1,2); plot(R,Wno/(2*pi),'LineWidth',2); grid on;
title('Frecuencia Natural en funcion de la Resistencia de Carga');
xlabel('Resistencia [Ohms]');
ylabel('[Hz]');

%%Fit level porcentaje de ajuste
figure; plot(R,Fit_Level,'LineWidth',2); grid on;
title('Porcentaje de Ajuste en funcion de la Resistencia de Carga');
xlabel('Resistencia [Ohms]');
plot(Fit_Level)
ylabel('[Percentage]');

```

```

%
% Calculo Xio y So^2
m = 11E-3;
r = 375;
Wo = mean(Wno);
D=Wo/(2*pi);
AlphaR = @(R) 1 ./ (2*(r + R)*m*Wo);
Col_Alpha = AlphaR(R);
Col_Ones = ones(size(Col_Alpha));
C = [Col_Ones, Col_Alpha];
Params = C\Xio;
figure; plot(Col_Alpha, Xio, 'b-', Col_Alpha, C*Params, 'r-', 'LineWidth', 2);
f=C*Params;
title(sprintf('Dampin en funcion de la Resistencia de Carga (Fit = %f %f)', Fit(Xio, C*Params)));
legend('Damping Medido', 'Damping Predicho', 'location', 'northwest');
xlabel('Alpha (R) = 1/(2*(r+R)*m*Wo)');
ylabel('Damping');

% Computing RNew
Xi = Params(1);
SoSquare = Params(2);
Xidesired = sqrt(2)/2;
RNew = SoSquare / (2*m*Wo*(Xidesired - Xi)) - r;
fprintf('\n\n ***** To obtain a damping of %.3f a resistance of %.2f ohms is required *****\n', Xidesired, RNew)

```

En esta parte se toman los datos obtenidos de las pruebas del geófono en función de la resistencia variable, se obtiene la estimación de parámetros del modelo ARX del código presentado anteriormente (**least_squares_estimation_arx_model**), posteriormente se calcula el Damping y la Frecuencia Natural en función de la resistencia variable de (**get_geophone_parameters_from_discrete_time_arx_model**), adquiridos los datos necesarios de los códigos presentados anteriormente se determina la peor y mejor prueba de ruido blanco en función de la resistencia variable, así determinar qué valor de resistencia cumple con los parámetros de diseño garantizando que el sistema sea estable obteniendo un valor de damping aproximando a 0.707 para la mejor prueba y que la autocorrelación cumpla con las características para determinar el ruido blanco, para la peor prueba se tiene en cuenta que no cumpla con las características de autocorrelación y que los valores de la muestra superan los límites de confianza, adicional que no cumple con el parámetro de diseño para un damping de 0.707. Posteriormente se calcula la gráfica del porcentaje de ajuste

en función de la resistencia variable para la muestra obtenida de cada una de las pruebas en cada geófono.

5.4.13. Anexo13

Código (Caracterización sin Resistencia)

Código Principal

```

clc;
clear all;
close all;

%%Experiment without resistance
%Output of the geophone

Fid = fopen('R_final.txt','rt');
fileID = fopen('Damping.txt','wt');
tline = fgetl(Fid);
while ischar(tline)
    A=char(strrep(tline,',' ,',' ,'. '));
    fprintf(fileID,'%s\n',A);
    tline=fgetl(Fid);
end
fclose(fileID);
Fid = load('Damping.txt','rt');
Fid = Fid(1:25000,2);%el 1000 se cambia por
25000
YAll = reshape(Fid,250,[]);
YAll = YAll(:,end:-1:1);
YAll(1:230,:) = [];
Ts = 1E-3;
n=100;
vec1 = zeros(1,n);
vec2 = zeros(1,n);

for j=2:1:10
    %% Least square estimation of an ARX model
    [A1,A2,YMeasured,YHat] = least_squares_estimation_arx_
model(YAll(:,j));
    %% Plot measured and predicted outputs
    plot_measured_and_predicted_values(YMeasured,YHat,Ts,inf);
    %% Damping and natural frequency
    [Xio,Wno] = get_geophone_parameters_from_
discrete_time_arx_model(A1,A2,Ts);

    d = Wno/(2*pi);

```

```

fprintf('PARAMETERS FOR R = INF\n');
fprintf('Damping           : %10.4f [adimensional]\n', Xio);
fprintf('Natural frequency : %10.4f [Hz]\n', d);

%vec1(j) = Xio;
%vec2(j) = d;

end

%xlswrite('vecdampingres.xlsx', vec1, 'hoja1', 'A1');
%xlswrite('vecfrecuencia2.xlsx', vec2, 'hoja1', 'A1');

```

Función (get_geophone_parameters_from_discrete_time_arx_model)

```

function [Xi,Wn] = get_geophone_parameters_from
_discrete_time_arx_model(a1,a2,Ts)
    Options = {'Matlab','Arduino'};
    Style = Options{1};
    switch Style
        case 'Matlab'
            % Poles of the ARX mode
            P = roots([1 a1 a2]);
            P1 = P(1);
            % Polar representation of the pole
            R = abs(P1);
            Theta = angle(P1);
            % Damping
            Xi = sqrt(log(R)^2 / (log(R)^2
            + Theta^2));
            % Natural frequency
            Wn = Theta / (Ts*sqrt(1 - Xi^2));
        case 'Arduino'
            RealPart = -a1/2;
            ImagPart = sqrt(4*a2-a1*a1)/2;
            R = sqrt(RealPart*RealPart
            +ImagPart*ImagPart);
            Theta = atan2(ImagPart,RealPart);
            % Damping
            Xi = sqrt(log(R)^2 / (log(R)^2
            + Theta^2));
            % Natural frequency
            Wn = Theta / (Ts*sqrt(1 - Xi^2));
    end
end

```

Función (least_squares_estimation_arx_model)

```

function [A1,A2,YMeasured,YHat] = least_squares_estimation
_arx_model(Y)
    % Second order ARX:  $y(k) = -a1*y(k-1) -a2*y(k-2);$ 

```

```

%
% yhat(3) = -a1*y(2) -a2*y(1);
% yhat(4) = -a1*y(3) -a2*y(2);
% ...
% yhat(N) = -a1*y(N-1) -a2*y(N-2);
Options = { 'Matlab', 'Arduino' };
N = length(Y);
YMeasured = Y(3:N);
YA2 = Y(1:N-2);
YA1 = Y(2:N-1);
Style = Options{1};
switch Style,
    case 'Matlab'
        Arx_coeff = [-YA1, -YA2] \ YMeasured;
        A1 = Arx_coeff(1);
        A2 = Arx_coeff(2);
    case 'Arduino'
        Yk_x_Ykm1 = 0;
        Yk_x_Ykm2 = 0;
        Ykm1_x_Ykm1 = 0;
        Ykm2_x_Ykm2 = 0;
        Ykm1_x_Ykm2 = 0;
        %%OJO En Arduino debe ser desde k = 2 hasta N-1
        for k = 3:N,
            Yk_x_Ykm1 = Yk_x_Ykm1 + Y(k)*Y(k-1);
            Yk_x_Ykm2 = Yk_x_Ykm2 + Y(k)*Y(k-2);
            Ykm1_x_Ykm1 = Ykm1_x_Ykm1 + Y(k-1)*Y(k-1);
            Ykm2_x_Ykm2 = Ykm2_x_Ykm2 + Y(k-2)*Y(k-2);
            Ykm1_x_Ykm2 = Ykm1_x_Ykm2 + Y(k-1)*Y(k-2);
        end
        % Determinant
        D = Ykm1_x_Ykm1 * Ykm2_x_Ykm2
            - Ykm1_x_Ykm2 * Ykm1_x_Ykm2;
        A1 = (1/D)*(-Ykm2_x_Ykm2
            * Yk_x_Ykm1 + Ykm1_x_Ykm2*Yk_x_Ykm2);
        A2 = (1/D)*(+Ykm1_x_Ykm2
            * Yk_x_Ykm1 - Ykm1_x_Ykm1*Yk_x_Ykm2);
    end
YHat = -A1*YA1-A2*YA2;
end

```

función (plot_measured_and_predicted_values)

```

function plot_measured_and_predicted_values(ymeasured, yhat, Ts, R)
figure;
NData = length(ymeasured);
Time = (0:1:(NData-1))' * Ts;
plot(Time, ymeasured, 'b-', Time, yhat, 'r. ');
grid on;
legend('Measured', 'Predicted');
xlabel('Seconds [Time]');

```

```

Fit = @(X,Y) 100*(1 - norm(Y-X)
/norm(Y-mean(Y)));
title(sprintf('Geophone' 's identification with R = %.2f Ohms
(fit = %.2f %%)',R,Fit(ymeasured ,yhat)));
end

```

5.4.14. Anexo14

Código (Caracterización con Resistencia)

Código Principal

```

clc;
clear all;
close all;

% Experiment with resistance
% Output of the geophone

Fid = fopen('Cal.txt','rt');
fileID = fopen('Damping.txt','wt');
tline = fgetl(Fid);
while ischar(tline)
    A=char(strrep(tline,',' ,'. '));
    fprintf(fileID,'%s\n',A);
    tline=fgetl(Fid);
end
fclose(fileID);
Fid = load('Damping.txt','rt');
Fid = Fid(1:length(Fid),2);
%Fid = Fid(1:63495,2);
YAll = reshape(Fid,250,[]);
YAll = YAll(:,end:-1:1);
YAll(1:10,:) = [];

%%Experiment without resistance
% Output of the geophone
% Fid = fopen('MResistencias.txt','rt');
% Data = fscanf(Fid,'%f',[1,inf]);
% YAll = reshape(Data,250,[]);
% Reversing the order of columns as the last column is generated by
using
% the LOWEST resistance (10K/256)Ohms
% YAll = YAll(:,end:-1:1);
% YAll(1:25,:) = [];
% Entrada y salida para la identificacion

```

```

Ts = 1E-3;
% Fit function
Fit = @(X,Y) 100*(1 - norm(Y-X)/norm
(Y-mean(Y)));
% estimacion modelo ARX
NMin = 1;
NMax = 250;
NExp = NMax - NMin + 1;
R = zeros(NExp,1);
Fit_Level = zeros(NExp,1);
Xio = zeros(NExp,1);
Wno = zeros(NExp,1);
for i = 1:NExp,
    Y = YAll(:,NMin + i - 1);
    [A1,A2,YMeasured,YHat] = least_squares_estimation_
    arx_model(Y);
    NData = length(YMeasured);
    Time = (0:1:(NData-1))' * Ts;
    % Damping y Frecuencia Natural
    R(i) = (NMin + i - 1) * 10E3 / 256;
    Fit_Level(i) = Fit(YMeasured,YHat);
    [Xio(i),Wno(i)] = get_geophone_parameters_from
    _discrete_time_arx_model(A1,A2,Ts);
    fprintf('PARAMETROS PARA R = %.2f\n',R(i));
    fprintf('Porcentaje de ajuste : %10.4f [adimensional]
    \n',Fit_Level(i));
    fprintf('Damping : %10.4f [adimensional]\n',Xio(i));
    fprintf('Frecuencia Natural : %10.4f [rad/seg]\n',Wno(i));
end
Fit_Level(isnan(Wno)) = [];
R(isnan(Wno)) = [];
Xio(isnan(Wno)) = [];
Wno(isnan(Wno)) = [];

%%Parametros
% Damping
subplot(2,1,1); plot(R,Xio,'LineWidth',2); grid on;
title('Damping en funcion de la Resistencia de carga');
xlabel('Resistencia [Ohms]');
% Frecuencia Natural
subplot(2,1,2); plot(R,Wno/(2*pi),'LineWidth',2); grid on;

title('Frecuencia Natural en funcion de la Resistencia de Carga');
xlabel('Resistencia [Ohms]');
ylabel('[Hz]');

%%Fit level porcentaje de ajuste
figure; plot(R,Fit_Level,'LineWidth',2); grid on;
title('Porcentaje de Ajuste en funcion de la Resistencia de Carga');
xlabel('Resistencia [Ohms]');
ylabel('[Percentage]');

```

```

%
% Calculo Xio y So^2
m = 11E-3;
r = 375;
Wo = mean(Wno);
D=Wo/(2*pi);
AlphaR = @(R) 1 ./ (2*(r + R)*m*Wo);
Col_Alpha = AlphaR(R);
Col_Ones = ones(size(Col_Alpha));
C = [Col_Ones, Col_Alpha];
Params = C\Xio;
figure; plot(Col_Alpha, Xio, 'b-', Col_Alpha, C*Params, 'r-',
'LineWidth', 2);
f=C*Params;
title(sprintf('Dampin en funcion de la Resistencia de Carga
(Fit = %f %%)',Fit(Xio,C*Params)));
legend('Damping Medido', 'Damping Predicho', 'location', 'northwest');
xlabel('Alpha(R) = 1/(2*(r+R)*m*Wo)');
ylabel('Damping');

% Computing RNew
Xi = Params(1);
SoSquare = Params(2);
Xidesired = sqrt(2)/2;
RNew = SoSquare / (2*m*Wo*
(Xidesired - Xi)) - r;
fprintf('\n\n ***** To obtain a damping of %.3f a resistance of
%.2f ohms is required *****\n', Xidesired, RNew)

```

Función [plot_measured_and_predicted_values(ymeasured,yhat,Ts,R)]

```

function plot_measured_and_predicted_values(ymeasured,yhat,Ts,R)
figure;
NData = length(ymeasured);
Time = (0:1:(NData-1))' * Ts;
plot(Time,ymeasured,'b-',Time,yhat,'r. ');
grid on;
legend('Measured', 'Predicted');
xlabel('Seconds [Time]');
Fit = @(X,Y) 100*(1 - norm(Y-X)
/norm(Y-mean(Y)));
title(sprintf('Geophone' 's identification with R =
%.2f Ohms (fit = %.2f %%)',R, Fit(ymeasured,yhat)));
end

```

Función (least_squares_estimation_arx_model)

```

function [A1,A2,YMeasured,YHat] = least_squares_estimation_
arx_model(Y)
    % Second order ARX:  $y(k) = -a1*y(k-1) - a2*y(k-2)$ ;
    %  $\hat{y}(3) = -a1*y(2) - a2*y(1)$ ;
    %  $\hat{y}(4) = -a1*y(3) - a2*y(2)$ ;
    % ...
    %  $\hat{y}(N) = -a1*y(N-1) - a2*y(N-2)$ ;
    Options = { 'Matlab', 'Arduino' };
    N = length(Y);
    YMeasured = Y(3:N);
    YA2 = Y(1:N-2);
    YA1 = Y(2:N-1);
    Style = Options{1};
    switch Style,
        case 'Matlab'
            Arx_coeff = [-YA1, -YA2]
            \ YMeasured;
            A1 = Arx_coeff(1);
            A2 = Arx_coeff(2);
        case 'Arduino'
            Yk_x_Ykm1 = 0;
            Yk_x_Ykm2 = 0;
            Ykm1_x_Ykm1 = 0;
            Ykm2_x_Ykm2 = 0;
            Ykm1_x_Ykm2 = 0;
            % OJO En Arduino debe ser desde k = 2 hasta N-1
            for k = 3:N,
                Yk_x_Ykm1 = Yk_x_Ykm1
                + Y(k)*Y(k-1);
                Yk_x_Ykm2 = Yk_x_Ykm2
                + Y(k)*Y(k-2);
                Ykm1_x_Ykm1 = Ykm1_x_Ykm1
                + Y(k-1)*Y(k-1);
                Ykm2_x_Ykm2 = Ykm2_x_Ykm2
                + Y(k-2)*Y(k-2);
                Ykm1_x_Ykm2 = Ykm1_x_Ykm2
                + Y(k-1)*Y(k-2);
            end
            % Determinant
            D = Ykm1_x_Ykm1 *
            Ykm2_x_Ykm2 - Ykm1_x_Ykm2 * Ykm1_x_Ykm2;
            A1 = (1/D)*(-Ykm2_x_Ykm2
            * Yk_x_Ykm1 + Ykm1_x_Ykm2*Yk_x_Ykm2);
            A2 = (1/D)*(+Ykm1_x_Ykm2*
            Yk_x_Ykm1 - Ykm1_x_Ykm1*Yk_x_Ykm2);
    end
    YHat = -A1*YA1-A2*YA2;
end

```