

**PROPUESTA DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA AJUSTE AUTOMÁTICO  
DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO RELATIVO DE UN GEÓFONO.**



**VENSIUN VIDAL BOLIVAR MENESES**

**JONATHAN ALEXANDER URIBE**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**POPAYÁN, 2018**

**PROPUESTA DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA AJUSTE AUTOMÁTICO  
DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO RELATIVO DE UN GEÓFONO.**



**VENSIUN VIDAL BOLIVAR MENESES**

**JONATHAN ALEXANDER URIBE**

**TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**Director**

**ING. JOHN ROBERT MUÑOZ CHÁVEZ**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**POPAYÁN, 2018**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>20</b>
1.1	Planteamiento del problema .....	20
1.2	Pregunta de investigación .....	21
1.3	Justificación .....	21
1.4	Objetivos.....	22
1.4.1	Objetivo general.....	22
1.4.2	Objetivos específicos.....	22
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO. ....</b>	<b>23</b>
2.1	Propagación de Ondas en Medios Elásticos .....	23
	Ondas Primarias: .....	23
	Ondas Secundarias .....	23
	Ondas L .....	23
	Ondas R o de Rayleigh.....	23
2.2	Censado de Vibraciones Superficiales en suelo.....	24
2.3	Prospección sísmica .....	24
2.4	Método de Reflexión.....	25
2.5	Método Sísmico de Refracción .....	26
2.6	Dispositivos de Adquisición sísmica .....	26
2.7	Fuentes .....	26
2.8	Adquisición de datos de prospección Sísmica.....	27
2.9	Tipos de sensores sísmicos según su frecuencia.....	27

Periodo Corto.....	27
Banda Ancha.....	27
De Movimiento Fuerte .....	27
2.10 Geófono .....	27
2.11 Resistencia .....	28
2.12 Frecuencia Natural.....	29
2.13 Sensibilidad.....	29
2.14 Distorsión .....	29
2.15 Coeficiente de Amortiguamiento.....	29
2.16 Efectos de la temperatura .....	30
2.17 Antecedentes .....	30
<b>3 CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN HARDWARE DEL SISTEMA</b>	
<b>33</b>	
3.1 Diseño Hardware.....	33
3.2 Componentes del Sistema .....	35
3.2.1 Selección de componentes de la Tarjeta.....	35
3.2.1 Sensor de Temperatura y Humedad .....	36
3.2.2 Micro relé.....	38
3.2.3 Potenciómetro Digital de 2k AD5248 .....	39
3.2.4 Potenciómetro Digital MCP41010- I/SN.....	39
3.2.5 Selección de Características Tarjeta de Adquisición.....	40
3.3 Modelo Matemático.....	44

3.4	Caracterización Elemento Sensor .....	57
3.5	Prueba funcionamiento Geófono.....	58
3.6	Implementación Del Hardware Del Sistema.....	61
3.6.1	Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición.....	62
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN SOFTWARE DEL SISTEMA.....</b>	<b>65</b>
4.1	Implementación en PsoC Creator .....	66
4.1.1	ADC.....	66
4.1.2	UART.....	68
4.1.3	Configuración del Timer .....	69
4.1.4	Configuración SPI.....	70
4.2	Funciones .....	71
4.3	Configuración de pines .....	71
4.4	Implementación en LabVIEW .....	73
4.4.1	Caracterización.....	74
4.4.2	Casos para el Ajuste del Sensor .....	75
4.4.3	Determinación de la Resistencia de Carga para el Ajuste .....	75
4.4.4	Toma de Muestras con el Sensor Ajustado .....	75
4.4.5	Visualización.....	76
4.5	Implementación en Matlab .....	76
4.5.1	Modelo ARX.....	77
4.5.2	Parámetros del Geófono .....	77

4.5.3	Cálculo de la resistencia de carga .....	77
4.5.4	Análisis de Datos.....	78
4.5.5	Coeficiente de Amortiguamiento con Resistencia de Carga .....	78
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO V: ANALISIS Y RESULTADOS. ....</b>	<b>79</b>
5.1	Procedimiento general de las pruebas .....	79
5.2	Experimento puente.....	80
5.2.1	Análisis de la prueba.....	81
5.3	Experimento Saltarín .....	86
5.3.1	Análisis de la prueba.....	89
5.4	Experimento Pólvora .....	94
5.4.1	Análisis de la prueba.....	95
5.5	Experimento Roca de 10 kg .....	100
5.5.1	Análisis de la prueba.....	102
5.6	Experimento Falla Geologica.....	107
5.6.1	Análisis de la prueba.....	108
5.7	Comparación sensor ajustado y sin ajustar .....	114
<b>6</b>	<b>CAPITULO VI: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>115</b>
6.1	Conclusiones .....	115
6.2	Recomendaciones .....	116
6.3	Trabajos Futuros.....	116
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>117</b>

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de ondas.....	24
Figura 2:Tipos de geófonos.....	28
Figura 3:Diagrama en bloques del sistema .....	33
Figura 4:Diagrama de bloques del hardware.....	34
Figura 5:Interior del geofono SM-24.....	35
Figura 6:Carcasa para Geófono SM-24 .....	36
Figura 7:Sensor de temperatura y humedad HTU21D .....	37
Figura 8:Micro relé EC2 / Serie EE2 .....	38
Figura 9: Potenciómetro digital de2k AD5248 .....	39
Figura 10: Potenciómetro digita de 10K .....	40
Figura 11: Arduino mega 2560.....	41
Figura 12: Tarjeta de desarrollo PIC32-Pinguino-Micro Olimex .....	42
Figura 13: Tarjeta de desarrollo PSoC® 5LP: CY8C58LP. ....	43
Figura 14: Modelo del geófono.....	45
Figura 15: Modelo eléctrico del geófono .....	46
Figura 16: Curva de respuestas de la prueba .....	58
Figura 17: Circuito para excitación de geófono. ....	59
Figura 18: Respuesta al impulso de un geófono en diferentes pruebas.....	59
Figura 19: Circuito para caracterización con resistencia de carga .....	60
Figura 20: Respuesta de geófonos con resistencia de carga 1992 Ohms .....	61

Figura 21: Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición y ajuste del coeficiente de amortiguamiento relativo de un geófono. ....	62
Figura 22: Diseño esquemático tarjeta de adquisición y ajuste del coeficiente de amortiguamiento relativo. ....	63
Figura 23: Vista en 3d de componentes de la tarjeta de adquisición. ....	63
Figura 24: Tarjeta de adquisición ensamblada.....	64
Figura 25: Diagrama general del software .....	65
Figura 26: ADC.....	66
Figura 27: Configuración voltaje diferencial de entrada .....	67
Figura 28: Selección de voltaje diferencial. ....	67
Figura 29: UART. ....	68
Figura 30:configuración UART .....	68
Figura 31: Timer. ....	69
Figura 32: Configuración Timer. ....	69
Figura 33: SPI .....	70
Figura 34: Configuración SPI. ....	70
Figura 35: Distribución de Pines tarjeta Psoc.....	72
Figura 36: Lectura de datos en LabVIEW. ....	73
Figura 37: Calculo de la resistencia de carga a partir de los parámetros y variables obtenidas de la lectura. ....	74
Figura 38: visualización.....	76
Figura 39: prueba puente carrera 7 entre calle 1y 1 <sup>a</sup> . ....	81



Figura 40: lectura experimento puente sin ajuste.....	82
Figura 41: Lectura experimento puente sin ajuste ampliada .....	82
Figura 42: Lectura experimento puente ampliada geofono ajustado.....	83
Figura 43: Damping y frecuencia natural en función .....	84
Figura 44: Variación del damping y Frecuencia Natural en 250 pruebas. ....	85
Figura 45: Porcentaje de ajuste en 250 pruebas.....	86
Figura 46: prueba pisón saltarín calle 1ª entre carrera 3ª y 2ª. ....	88
Figura 47: prueba pisón saltarín calle 1ª entre carrera 3ª y 2ª .....	88
Figura 48: Lectura experimento saltarin sin ajuste .....	89
Figura 49: Lectura experimento saltarin sin ajuste ampliada. ....	90
Figura 50: Lectura ampliada geofono ajustado experimento saltarin. ....	90
Figura 51: Variación del damping y Frecuencia natural .....	91
Figura 52: Variación del Damping y frecuencia natural .....	92
Figura 53: Porcentaje de ajuste en 250 pruebas.....	93
Figura 54: prueba explosión .....	95
Figura 55: lectura experimento polvora sin ajuste .....	96
Figura 56: Lectura experimento polvora sin ajuste ampliada .....	96
Figura 57: Lectura del geofono ajustado polvora ampliada.....	97
Figura 58: Variación del damping y Frecuencia natural en función de la resistencia de 10kΩ.....	98
Figura 59: Variación del Damping y frecuencia natural en 250 pruebas. ....	99

Figura 60: Porcentaje de Ajuste en 250 pruebas .....	100
Figura 61: prueba Roca 10 kg .....	101
Figura 62: Lectura del geofono sin ajustar experimento roca 10kg .....	102
Figura 63: Lectura experimento roca 10kg sin ajuste ampliada .....	103
Figura 64: Lectura experimento roca 10kg del geofono ajustado.....	103
Figura 65: Variación del damping y Frecuencia natural .....	104
Figura 66: Variación del Damping y frecuencia natural en 250 pruebas .....	105
Figura 67: Porcentaje de Ajuste en 250 pruebas. ....	106
Figura 68: Falla geológica .....	108
Figura 69: Lectura del experimento falla geologica del geofono sin ajustar ampliada .....	109
Figura 70: Lectura del geófono ajustado experimento falla geológica.....	110
Figura 71: Variación del damping y Frecuencia natural .....	111
Figura 72: Variación del Damping y frecuencia natural en 250 pruebas. ....	112
Figura 73: Porcentaje de Ajuste en 250 pruebas. ....	113

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características tarjetas de desarrollo. ....	43
Tabla 2: Características elemento sensor .....	57
Tabla 3: Valores prueba Puente.....	86
Tabla 4: Valores prueba Saltarín.....	93
Tabla 5: Valores promedios prueba Saltarín geofono sin ajustar.....	93
Tabla 6: Valores promedios prueba Saltarín geofono ajustado.....	94
Tabla 7: Valores prueba Pólvora .....	100
Tabla 8: Valores prueba Roca 10Kg. ....	106
Tabla 9: Valores prueba Falla Geológica. ....	113

## **NOTA DE ACEPTACIÓN**

El director y los jurados del proyecto de grado en modalidad trabajo de investigación denominado “PROPUESTA DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA AJUSTE AUTOMÁTICO DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO RELATIVO DE UN GEÓFONO”, realizado por los estudiantes Vensiun Vidal Bolivar Meneses y Jonathan Alexander Uribe Cuellar , una vez revisado el informe final y aprobado la sustentación del mismo autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar por el título profesional de Ingeniería Electrónica.

---

Mg: Juan pablo Diago Rodríguez

Jurado

---

Ing: Carlos Felipe López Cordoba

Jurado

---

Mg. John Robert Muñoz

Director Proyecto de investigación

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a cada una de las personas que me ayudaron y animaron a hacer realidad este sueño, brindándome su apoyo incondicional creyendo que lo podía conseguir.

A **Dios** quien me dio la fortaleza y tranquilidad para no rendirme cuando hubo dificultades, a quien doy gracias por su compañía en este periodo de mi vida que está por terminar, esperando me siga acompañando en cada una de las etapas de mi vida.

A **Marielcy Barreto Arango** mi esposa quien ha acompañado este sueño y lo ha hecho como suyo animándome cuando pensaba desistir.

A **Sebastián Bolívar Barreto** mi hijo quien fue el motor y motivación para seguir adelante y dejarle un legado que, con esfuerzo, disciplina y con la ayuda de Dios los sueños se pueden conseguir, por él y para el van dedicados todos mis logros.

A **Elvira Meneses** mi madre quien siempre me llevaba en sus oraciones pidiendo la ayuda y respaldo de Dios que, aunque está lejos siempre me visitaba y me decía siempre que si seguía luchando con disciplina y valor todo lo podía conseguir. Todos los días le pido a Dios que nunca me falte.

A **Vidal Antonio Bolívar Cerón** mi padre que me enseñó a luchar y a seguir siempre adelante sin mirar atrás quien fue un ejemplo de trabajo y disciplina apoyado en Dios y con los principios y valores de un buen ser humano las cosas se podían lograr que, aunque está lejos siempre venía a visitarme y colocaba su mano en mi hombro y me decía sé que lo vas a lograr.

A **Juan pablo Bolívar Meneses Mi hermano** que, aunque ya no está con nosotros siempre lo recuerdo y lo llevo presente, sé que se si estuviera con nosotros sentiría orgulloso de que puede alcanzar mis sueños.

A mi apreciada hermana, **Vely Esnid Bolivar Meneses**, que con su ejemplo, dedicación y palabras de aliento han sido la guía y el apoyo cuando más lo he necesitado.

Finalmente, a todos y cada una de las personas que han velado por mi bienestar durante todos estos años.

**“con todo mi amor, bendiciones para todos” ...**

### **AGRADECIMIENTO**

El presente trabajo de grado primeramente me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme por llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A todos los integrantes de mi familia porque de alguna manera u otra aportaron un granito de arena para que todo saliera con éxito.

A la **CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA** por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A mi director del trabajo de grado, **Ing. John Robert Muñoz Chávez**, por su esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí, alcanzar mi logro con éxito.

También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado sus conocimientos para mi formación.

A mi compañero de trabajo de trabajo de grado, Jonathan Alexander Uribe porque sin él no hubiera sido posible la culminación de este proyecto final

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

Att: **Vensiun Vidal Bolivar Meneses**

## DEDICATORIA

Este espacio lo quiero aprovechar para dedicar a cada una de las personas que han brindado, su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida; algunas están aquí conmigo, otras en mis recuerdos y otras en mi corazón. Sin importar dónde estén quiero darles las gracias por aportar su granito de arena.

Mi trabajo de grado lo dedico a dios, por darme la oportunidad de vivir por darme una hermosa familia a quienes amo demasiado, por estar conmigo en cada paso que doy y fortalecer mi corazón.

A mis padres que han estado presentes en cada uno de los pasos que doy que, gracias a sus consejos, apoyo constante, conocimiento, enseñanza, cariño y esfuerzos me convertí en un profesional y esencialmente en un ser humano de bien.

## AGRADECIMIENTO

Primero que todo agradecerle a Dios por haberme brindado la oportunidad de vivir y guiarme día tras día a lo largo de mi carrera, por sus continuas bendiciones y por darme la fortaleza de superar cualquier obstáculo.

Le doy gracias a mis padres **AGUSTÍN URIBE PAREJA y XIMENA CUELLAR CLAROS** por apoyarme en todo momento, por brindarme la oportunidad de tener una excelente formación académica y sobre todo por inculcarme valores y principios con el fin de ser una gran persona.

A mi hermana **JERLY URIBE CUELLAR** que me daba fuerzas cuando estaba pasando por malos momentos y me daba consejos y ánimos para que cumpliera mis sueños.

A mi novia **Camila Muñoz Lopez** que ha estado presente desde que inicie esta etapa de formación gracia por compartir tantos momentos lindos de tu vida conmigo, por su comprensión y acompañarme durante todos estos años de estudio.

Agradezco a la **COORPORACION UNIVERISITARIA AUTONMA DEL CAUCA** por brindarme la oportunidad de formarme como profesional.

Sin lugar a duda este trabajo no pudo haberse realizado sin la formación de los profesores de la carrera, a quienes recuerdo con mucho cariño y respeto.

Quisiera expresar un inmenso agradecimiento a mi director de tesis, **ING John Robert Muñoz Chavez**, por brindarme todo su apoyo, comprensión, conocimiento, asesoría y correcciones acertadas para llevar a cabo este trabajo de graduación con éxito ya que sin su ayuda no hubiera sido posible la realización de esta investigación.

Entrañablemente, agradezco a mi compañero **Vensiun Vidal Bolivar**, que sin su ayuda, dedicación y conocimientos no hubiéramos culminado con nuestro proyecto.

Att: **Jonathan Alexander Uribe Cuellar**.



## RESUMEN

El geófono es un dispositivo utilizado para medir ondas sísmicas del suelo; para conocer la actuación del instrumento se debe estudiar el comportamiento de sus parámetros para determinar su funcionamiento en relación a la sensibilidad y la vibración a la que se encuentra expuesto. Ahora, es importante aclarar que las condiciones a las que el sensor es sometido junto con la variación de variables físicas y ambientales generan desajustes y esto lleva a que se tenga que realizar ajustes periódicos para tener un comportamiento deseado. En este sentido, el proyecto estudia el comportamiento del sensor para desarrollar un sistema electrónico que ajuste el geófono teniendo en cuenta los resultados de la señal producida frente a una excitación externa y finalmente implementar algoritmos que permitan una medida en un damping cercano a 0.707.

## **ABSTRACT**

The geophone is a device used to measure seismic waves of the ground. In order to know the performance of the instrument, the behavior of its parameters must be studied; which allows determining its functioning in relation to the sensitivity and vibration faced during the sample. These conditions together with the variation of physical and environmental variables generate imbalances. This study allowed the development of an electronic system for the adjustment where the signal produced by the sensor was acquired in response to an external excitation. The analysis of the obtained parameters and finally the implementation of a self-regression model allow the calculation of the device's adjustment resistance; locating its measurement in a damping close to 0.707; the process is developed automatically according to the measurement that is being taken.

## INTRODUCCIÓN

El método más utilizado en la obtención de datos del suelo es el sísmico, este se basa en la propagación de ondas elásticas en diferentes medios ya que los minerales que conforman la superficie terrestre tienen densidades parecidas. En otras palabras, la medida de propagación pone en evidencia cambios de naturaleza de los materiales [1].

La correcta lectura de la información de las señales permite que los datos sean fiables, el encargado de esta función es el sensor y para que los datos sean verídicos se le debe realizar un ajuste periódico dado que el dispositivo está expuesto a cambios de variables ambientales que hacen que sus resultados no sean tan eficaces.

Las aplicaciones de método sísmico para la calibración de equipos son generadas artificialmente mediante explosiones, impactos mecánicos o vibraciones cerca de la superficie [2]. Las vibraciones que transmite el suelo se recogen en aparatos sensibles capaces de registrarlas e inscribirlas, llamados sismógrafos o geófonos [3].

Teniendo en cuenta lo anterior a través de este proyecto se desarrolló una propuesta de dispositivo electrónico para el ajuste automático del coeficiente de amortiguamiento relativo de un geófono, con respecto a la alteración de variables ambientales, de modo que la resistencia de carga del instrumento de medida se pueda ajustar dentro de un rango deseado.

# 1 CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

## 1.1 Planteamiento del problema

Algunos fenómenos naturales pueden llegar a ocasionar catástrofes para la población y seres vivos en general; inundaciones, tsunamis, incendios forestales, terremotos, erupciones volcánicas, sismos, deslizamientos de tierra, entre otros, los cuales han ocasionado múltiples daños, pérdidas materiales y humanas [4]. En la mayoría de los casos estos fenómenos son producidos por movimientos internos de la tierra, es decir, cambios que se presentan en las cortezas o de las placas tectónicas. Por este motivo a través del tiempo el hombre ha desarrollado elementos que permiten conocer las características de estos eventos [5]. El sismómetro es un instrumento con el cual se puede medir los movimientos telúricos desde pequeños temblores hasta terremotos [3].

Como punto esencial se define que los conocimientos de los parámetros (frecuencia natural, sensibilidad, damping, masa móvil, resistencia, vibración y temperatura) permite determinar la sensibilidad del instrumento ante variaciones en frecuencia de la señal por las reacciones a las que se encuentra sometido y obtener una respuesta lineal haciendo uso del mayor rango de frecuencias. Debido a esto el ajuste del coeficiente de amortiguamiento relativo que se le realice al geófono es fundamental para el mantenimiento del instrumento dentro de las especificaciones establecidas por el fabricante, para que este genere datos confiables; por este motivo se deben realizar ajustes periódicos, dado que esta propiedad es muy sensible ante algunas variables ambientales y ubicación que generan desajustes en el sensor, por lo tanto será esencial el acompañamiento técnico y de apropiación del instrumento [6].

Según lo anterior, se ve la necesidad de proponer un método que mediante el uso de herramientas tecnológicas permitan realizar un ajuste automático del coeficiente de amortiguamiento relativo de los geófonos en un rango deseado. Se pretende la autonomía del proceso, mejorando el mantenimiento en sitio y que permita la captura de información fiable, eliminando así los errores de evaluación. De esta

forma, surge entonces la siguiente pregunta que motiva este trabajo de investigación.

## **1.2 Pregunta de investigación**

¿Cómo ajustar de manera automática y eficiente el coeficiente de amortiguamiento relativo de un geófono ante variaciones físicas y ambientales que rodean al sistema?

## **1.3 Justificación**

El geófono es un dispositivo que registra el movimiento del suelo generado por una fuente de energía ya sea natural o inducida [3]. Es importante aclarar que la lectura de estas señales depende por un lado del correcto ajuste de los parámetros que posee el sensor, pues esto evita comportamientos indeseados a la hora de registrar movimientos telúricos producidos por las fuentes anteriormente citadas. Por otro lado, las variables ambientales como la temperatura afectan de manera directa las características propias del sensor, teniendo como efecto medidas no deseadas [3].

El coeficiente de amortiguamiento relativo es una de las propiedades del sistema que tiene alta variación frente a cambio de condiciones ambientales como la temperatura, presión, humedad entre otras; dicha característica determina la linealidad de respuesta del instrumento, así como el ancho de banda que posee el sensor [7].

Los ajustes de esta caracterización han generado la necesidad de desarrollar técnicas e instrumentos que le den la solvencia eficiente de ajustar el prototipo, sin embargo, esta situación ha llevado a instaurar equipos de alta complejidad y de costos elevados, que en muchas de las situaciones son difíciles de desplazar a lugares lejanos, por lo tanto en la actualidad lo que se hace es desmontar los sensores y trasladarlos al laboratorio para hacer su respectivo mantenimiento, lo cual genera costos adicionales por la movilidad del personal calificado [8].

Teniendo en cuenta esto, es importante diseñar un sistema que permita un ajuste automático del coeficiente de amortiguamiento relativo del geófono en campo, con esto se lograría una autonomía en el proceso de ajuste dadas las condiciones de disposición de los instrumentos de medida, lo que mejoraría considerablemente los procesos de mantenimiento preventivo de los sensores. En otros términos, este proyecto de investigación es propuesto con el fin de contribuir en el mejoramiento de un proceso que es indispensable para el buen funcionamiento del sistema, el cual puede ser aplicado a las ramas de geología, prospección sísmica entre otras.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Proponer un sistema hardware y software para el ajuste automático del coeficiente de amortiguamiento relativo de un geófono.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Definir el procedimiento experimental requerido para la estimación del coeficiente de amortiguamiento relativo de un geófono.
- Diseñar la arquitectura de un sistema hardware y software para el ajuste automático del coeficiente de amortiguamiento relativo de un geófono.
- Validar el comportamiento del coeficiente de amortiguamiento relativo entre un geófono ajustado y otro sin ajustar.

## 2 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Propagación de Ondas en Medios Elásticos

Las ondas sísmicas se propagan a través de vías elásticas generadas por perturbaciones, como la fractura de la corteza terrestre, explosiones o impactos entre otras, estas ondas se pueden clasificar de dos formas:

**Ondas Primarias:** Son ondas que generan un movimiento de partículas en dirección de la propagación, llamadas ondas P u ondas de compresión (Figura 1a) [9].

**Ondas Secundarias:** Son también llamadas ondas S, generan un movimiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación, desarrollando esfuerzos de corte en el medio de propagación. Este movimiento se descompone en dos planos: un movimiento vertical y otro horizontal; sus componentes son SV Y SH. (Figura 1b) [9].

Así mismo se encuentran ondas superficiales las cuales se propagan en la superficie de la tierra con velocidad menor a las ondas del cuerpo; Pueden ser generadas de forma natural o artificial, ubicadas en el interior o exterior de la tierra, conocidas como ondas superficiales: Ondas L y ondas R [9].

**Ondas L:** Estas ondas se producen cuando la capa superficial es blanda que la inferior, se originan a partir de la reflexión de una honda SH con la superficie que luego sufre múltiples reflexiones entre las capas inferior y la superficie. Ocasionan vibración horizontal en sentido perpendicular a la dirección de propagación (Figura 1d). [9]

**Ondas R o de Rayleigh:** Esta clase de ondas generan una trayectoria elíptica de partícula, la cual en su plano de propagación tiene una componente retrógrada de movimiento. Estas ondas son producidas siempre que se exista un movimiento en la vertical sobre la superficie (Figura 1c).

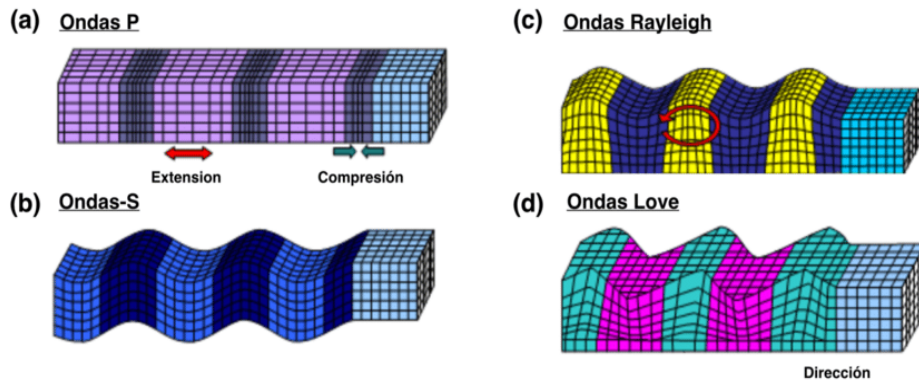


Figura 1: Tipos de ondas

Fuente tomada [8]

## 2.2 Censado de Vibraciones Superficiales en suelo

El estudio de las propiedades físicas de las capas superficiales del suelo, la composición, concentración y discontinuidad, que este tiene, son motivo de estudio de diferentes áreas como ingeniería civil, arqueología, ciencias forenses, área militar y la minería por lo que se requieren de desarrollos tecnológicos para este propósito, que cumplan con los requisitos característicos de cada disciplina.

Para realizar una caracterización del subsuelo desde una perspectiva sísmica algunos autores (Vireux, Xiang & Sabatier, Ryden Mooney, watt, Savazzi), han propuesto un estudio de ondas elásticas generadas por fuentes mecánicas como: parlantes, explosiones o electro vibradores. En Su proceso de propagación bajo la superficie se difractan al encontrarse en discontinuidad, luego se reflejan de nuevo a la superficie generando un patrón de vibración, que dependen de las propiedades geométricas y físicas. Estas ondas son inducidas en el suelo [10].

## 2.3 Prospección sísmica

La forma más popular de la prospección sísmica en la exploración geofísica para adquirir información de los recursos tales como el petróleo, gas natural, etc. Su



principal Herramienta es el geófono [10], que permite adquirir información de la tierra, desde los primeros metros hasta varios kilómetros de profundidad, por medio de ondas elásticas mediante una fuente emisora; finalmente se almacena en un dispositivo de registro que se llama sismógrafo graba en un equipo electrónico llamado sismógrafo. Las perturbaciones conllevan a que haya una deformación elástica, lo cual genera ondas superficiales que se propagan a través de la tierra; perdiendo energía en su trayectoria sufriendo reflexiones, refracciones y difracciones [11].

Por medio del uso de ondas elásticas se puede llegar a medir la prospección sísmica al interior de la tierra. De las cuales estas se generan regularmente con un martillo, un dispositivo de baja energía o de vibración, la cual recibe la información por medio de los sensores situados sobre el terreno, y de la misma manera se almacena en un dispositivo de registro llamado sismógrafo. Hay que tener en cuenta que la deformación elástica producida por el golpe a lo largo del terreno va perdiendo energía en su recorrido, sufriendo reflexiones, refracciones y difracciones [12].

Finalmente, la prospección sísmica es un movimiento complejo ya que solo se debe tomar como un ajuste matemático de datos, y el terreno que depende de la distribución en el subsuelo de alguna propiedad física como la densidad, resistividad, velocidad, etc. Para obtener una cartografía más puntual del subsuelo, también la elección del método adecuado que depende de las características del terreno como (grava, arcilla, roca, entre otras).

#### **2.4 Método de Reflexión**

El método sísmico de reflexión es una técnica de gran importancia la cual es utilizada en exploraciones geofísicas, ya que se puede obtener información del subsuelo como propiedades mecánicas en las diferentes capas internas a partir de los tiempos de llegada de las ondas elásticas generadas artificialmente mediante explosiones de impactos mecánicos o vibraciones en la superficie terrestre y así obtener una imagen representativa; por lo tanto es posible alcanzar información de sus amplitudes y frecuencias [13].

## **2.5 Método Sísmico de Refracción**

El método sísmico de refracción se basa en la diferencia de la velocidad de las ondas sísmicas en los distintos terrenos, como la refracción que sufren las ondas al cruzar la frontera de distintos suelos, de igual forma ocurre con las ondas de luz que cambia su dirección en un ángulo que depende de la relación entre las velocidades de las ondas [2].

Por otra parte en el área de ingeniería civil es una de las aplicaciones más utilizadas en la refracción sísmica; empleada para la determinación de la profundidad, edificación de cimiento, en las construcciones de represas e hidroeléctricas, también para establecer las condiciones de suelo de acuerdo con los diferentes materiales que lo componen y la fracturación que puede ocasionar deslizamientos del terreno, además como la detección de fallas geológicas, así mismo este método mide el tiempo de las ondas elásticas donde se forma las ondas sísmicas, y se obtiene el tiempo de llegada de las primeras ondas o de diferentes partes[14].

## **2.6 Dispositivos de Adquisición sísmica**

Para la obtención de la información de las ondas sísmicas se requiere básicamente de un sistema de adquisición que está integrado por la detección del movimiento de la tierra, registro de la información, acondicionamiento de la señal captada y una fuente de energía [15].

## **2.7 Fuentes**

Para la realización de exploraciones sísmicas las fuentes suelen ser de dos tipos, unas generadas por fuentes transitorias como los explosivos o golpes de martillo y otras de vibración donde oscilan frecuencias durante un periodo de tiempo, por ejemplo, la resolución o separación mínima entre dos objetos distintos que se puedan reconocer depende de la resolución mientras que la profundidad máxima que se puede alcanzar depende de la energía entregada por la fuente [15].

## 2.8 Adquisición de datos de prospección Sísmica

La adquisición de datos de prospección sísmica se utiliza por medio de, tarjeta DAQ, acompañada de sensores sísmicos, (geófonos), conexiones, sistema de disparo, computadora portátil, cables de conexión, y unidades de amplificación, por lo tanto, son equipos para obtener datos y luego ser procesados [12].

## 2.9 Tipos de sensores sísmicos según su frecuencia

Clasificación de Los sensores sísmicos con base a la respuesta en frecuencia para el estudio:

**Periodo Corto:** Se identifica porque su rango dinámico y su respuesta en frecuencia es ideal para el estudio de sismicidad local de magnitud baja y moderada. No es recomendable para estudio de terremotos que manejan una mayor magnitud de energías ya que puede ocasionar una saturación mecánica del instrumento, es decir fuera del rango de medida; Este sismómetro presenta una respuesta plana en sismología de corto periodo (1-50Hz).

**Banda Ancha:** Utilizado para señales de periodo corto menores a 1Hz, ligados a grandes terremotos, consecuencia de erupciones o movimientos de cámaras magnéticas, etc.

**De Movimiento Fuerte:** Conocidos como acelerógrafos, utilizado para detectar movimientos de mediana o fuerte magnitud, empleado para el estudio de señales vinculadas a movimientos tectónicos en niveles de aceleración del suelo [16].

## 2.10 Geófono

Los geófonos son sensores que transforman los movimientos sísmicos del suelo en una señal eléctrica, se agrupan en relación con el sistema de generación, con indicaciones análogas a las ondas sísmicas que detecta frecuencia y amplitud. Existen diferentes tipos de geófono entorno a su diseño y capacidad de respuesta. Su producción es rigurosa de acuerdo con las características de la señal de salida

y compatibilidad con los diferentes tipos de sismógrafos. Como se puede evidenciar en el siguiente cuadro ver figura 2. [12]

<b>SISTEMA DE GENERACION DE LA SEÑAL ELECTRICA</b>	<b>TIPO DE SALIDA DE LA SEÑAL ELECTRICA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electromagnético</li> <li>- Reluctancia variable</li> <li>- Piezoeléctrico</li> <li>- Capacitativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Salida simple</li> <li>- Preamplificada</li> <li>- Señal regulada</li> </ul>

Figura 2:Tipos de geófonos

Fuente: Tomada de [12]

Para el uso del sensor es necesario realizar una prueba de sus parámetros como resistencia, frecuencia natural, coeficiente de amortiguamiento, sensibilidad, distorsión entre otras. Generalmente los probadores son de un gran tamaño y su consumo energético es elevado y no son apropiados para ser utilizados al aire libre [17].

Se encuentran dos tipos de probadores de geófono uno de tamaño pequeño y de alta precisión basadas en una computadora embebida (pc104). Estos tienen un elevado consumo por lo que no son utilizados en campo. El otro tipo de probador se basa en DDS (Servicio de distribución de datos) y ARM (Maquina avanzada de ordenadores con conjuntos reducido de instrucciones) que tienen un bajo consumo y buena precisión, pero cuando se ven expuestos a altas temperaturas no responden de forma adecuada [17].

### **2.11 Resistencia**

indica la oposición que presentan los conductores al paso de la corriente eléctrica donde normalmente los electrones tratan de circular por el circuito eléctrico de una forma más o menos organizada, de acuerdo con la resistencia que encuentren a su

paso. Mientras menor sea esa resistencia, mayor será el orden existente; pero cuando la resistencia es elevada, comienzan a chocar unos con otros y a liberar energía en forma de calor.[18]

### **2.12 Frecuencia Natural**

Es la repetición con la que tiende a vibrar luego de una perturbación. La forma de excitar el sistema para sacarlo del equilibrio y analizar la frecuencia natural luego de la perturbación es por impacto. Este debe ser lo más corto e intenso posible, para obtener una oscilación amortiguada significativa que permita calcular el espectro.[19]

### **2.13 Sensibilidad**

indica la magnitud máxima de vibraciones que puede recibir ésta se indica en unidades de volt/(mm/s). Para obtener el rango máximo de vibración que permitiría registrar un es necesario ingresar el valor de sensibilidad de éste y el equipo de medición entregará el valor máximo de velocidad en forma automática[20]

### **2.14 Distorsión**

Cuando el voltaje o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal; cuyas distorsiones son generadas por Fenómenos transitorios y Condiciones permanentes que están relacionadas con armónicas de estado estable [21]

### **2.15 Coeficiente de Amortiguamiento**

La amortiguación o amortiguamiento se define como la capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía cinética en otro tipo de energía. Típicamente los amortiguadores disipan la energía cinética en energía térmica. un coeficiente de amortiguamiento de aproximadamente 0.707, representa que el ángulo  $\theta$  es de  $45^\circ$ . En estas condiciones el sistema es más robusto a las variaciones en los parámetros de la planta o actuador. Además, que para un coeficiente de amortiguamiento de

0.707 la frecuencia natural es igual al ancho de banda del sistema (sistema de segundo orden ideal).[22]

### **2.16 Efectos de la temperatura**

La temperatura incide en los materiales que integran el sensor produciendo un desequilibrio entre la gravedad y la fuerza de elasticidad del sismómetro, además de toda la geometría de la suspensión, por lo consecuente es necesario tener una especial protección con los componentes electrónicos encapsulados con los sensores mecánicos, ya que sufren de calentamiento al ser expuestos a corrientes de aire, pese a que están fabricados de forma inherente a modificaciones eventuales. Por otra parte, los cambios de temperatura de corto periodo deben ser depurados por combinación de aislamiento e inercia térmica, sin embargo, las variaciones a largo plazo no infieren en la toma de datos [23].

### **2.17 Antecedentes**

La calibración de los geófonos permite determinar los parámetros, que pueden ser ajustados para garantizar la fidelidad y fiabilidad de lectura [23].

El método Wilmore desarrollado en la década de los 50; implementa un generador de señales tipo sinusoidal, donde una señal de baja frecuencia es aplicada a un puente de impedancias y mediante inspección visual, se hace la comparación entre valores establecidos y medidos [8].

Muchos sismómetros electromagnéticos y casi todos los geófonos carecen de bobinas de calibración; por lo tanto, deben ser calibrados por otros medios como técnicas clásicas que incluyen el peso de elevación y método de agitar-mesa. Los sismómetros también pueden ser calibrados por comparación con un sismómetro de ubicación conjunta, previamente, o mediante la medición de la fase entre una tensión sinusoidal aplicada a la bobina de la señal y la corriente resultante [24].

Una de las formas de calibración del geófono se realiza con el uso de una cámara hiperbárica, se efectúa con perfiles de velocidad y vibraciones de amplitud de 3

mm/s de 1 a 100 Hz de frecuencia, Esta forma consiste en ajustar el sensor "en seco" (sin sedimento), con una mesa de agitación; su calibración se efectúa con condiciones y orientaciones predeterminadas [25].

Otro método se basa en la respuesta del sistema frente a una excitación externa inducida; puesto que un sismógrafo electromagnético implica determinar su sensibilidad a la velocidad en función del tiempo, y se realiza mediante la inyección de fuerza electromotriz sinusoidal midiendo la respuesta a través de un periodo de señal [8].

Así mismo para la calibración de geófonos se utiliza un calibrador teniendo en cuenta que los parámetros del sensor pueden ser ajustados a conveniencia mediante elementos externos. El funcionamiento del calibrador consiste en aplicar un pulso eléctrico a la masa del geófono repetidas veces utilizando una resistencia en paralelo variando su valor para obtener las tres amplitudes que siguen al pulso inducido para encontrar el coeficiente de amortiguamiento propio de cada sensor, así como la transducción y la impedancia de salida equivalente [16].

Por otra parte, uno de los métodos incluye un circuito de calibración con una bobina por telemetría diseñado para la recesión de señales especiales; el cual ejerce un movimiento en la masa del sensor logrando su desplazamiento equivalente en comparación a las características del sensor descritas por el fabricante a partir de señales sinusoidales. La tensión de salida producida por los sismómetros durante la calibración por telemetría es similar a las señales sísmicas reales [26].

Otra forma de calibración en el estudio de derrubios en los barrancos, es la utilización de un circuito en una caja metálica de protección para transformar la señal de salida del Geófono en una lectura real. Este método se aplica para filtrar las vibraciones que sean demasiado pequeñas, tales como las producidas por el paso de un animal, la lluvia, entre otras, evitando valores que no son objeto de estudio, y captando señales determinantes. Para el ajuste es necesario una resistencia de carga externa y variable que permita la correcta filtración [27].

De otra manera se realiza la calibración energizando el sensor con 2.5v por un periodo de tiempo y luego se quita la alimentación para obtener la curva que determina su funcionamiento; la prueba se repite varias veces sin resistencia de carga y con resistencia de carga de  $60\Omega$ ,  $120\Omega$  y  $180\Omega$  en paralelo a la bobina del geófono; para el ajuste se utilizan dos microcontroladores uno de referencia PIC18F4550 para generar señales a través del módulo SSP (puerto serie Síncrono) y otro con referencia PIC16F876A para efectuar la prueba por medio del bus SPI (Interface de Periféricos Serie) [28].

Igualmente, para la calibración de geófonos y acelerómetros se utiliza la ER-CT1 es una mesa de calibración de alta precisión para sismómetros de periodo corto y banda ancha. Es utilizado gracias a su espectro de movimiento controlado de 0.01 a 20.00 mm (error de  $\pm 0.002$  mm), que se logra gracias al control computarizado. El objetivo de esta mesa de calibración es proporcionar el desplazamiento controlado y confiable del instrumento sísmico con el uso de programas escritos en el ambiente Matlab, logrando el cálculo de la constante del instrumento analizado, así como los polos y los ceros del sensor sísmico [29].



### 3 CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN HARDWARE DEL SISTEMA

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

En la figura 3 se ilustra el diagrama del sistema en general; compuesto por una tarjeta de adquisición encargada del control y ajuste de amortiguamiento relativo; los datos obtenidos por el geófono son transmitidos a la tarjeta a través del módulo de comunicación.

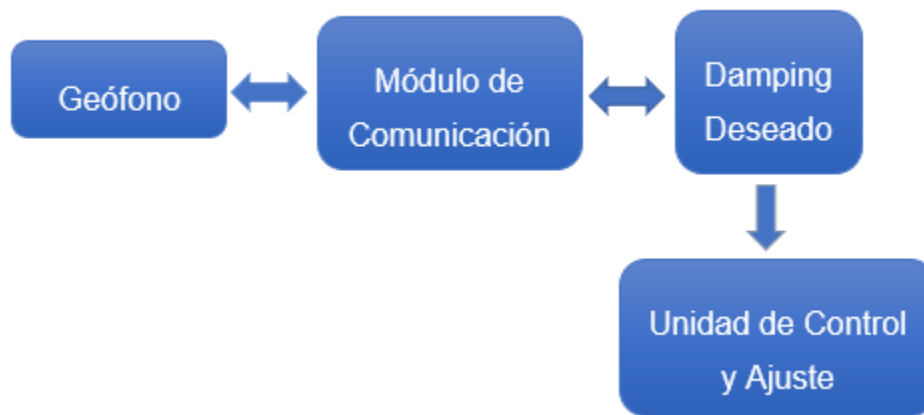


Figura 3: Diagrama en bloques del sistema

Fuente: Elaboración Propia

#### 3.1 Diseño Hardware

En esta sección, se detalla el diseño y elaboración de la tarjeta donde se efectúan los procesos de adquisición y tratamiento de datos. Este debe realizar el ajuste de los parámetros y lograr un buen funcionamiento del sensor sísmico; la información suministrada por el geófono será transmitida al área de control para su posterior procesamiento. A continuación, se describe el diagrama en bloques del dispositivo.

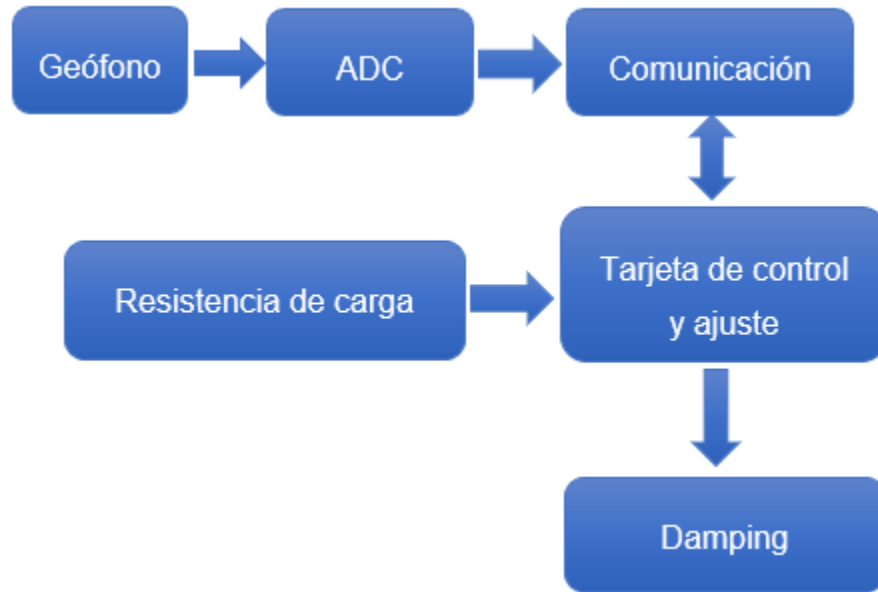


Figura 4:Diagrama de bloques del hardware

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se enuncian la correspondiente función de cada bloque:

- Bloque del Sensor (geófono): Elemento que se encarga de detectar las vibraciones del suelo donde se realiza el estudio.
- ADC (Convertor Analógico Digital): consiste en la forma de ingreso de los datos provenientes del sensor sísmico dirigidos a la unidad de control y ajuste de forma diferencial.
- Bloque de comunicación: Módulo la transmisión de datos de los sensores y la tarjeta de adquisición y control del sistema.
- Bloque de control y ajuste: Encargado de contener un algoritmo de comunicación, adquisición y almacenamiento, así como el ajuste de su coeficiente de amortiguamiento relativo y transmisión de datos.
- Bloque Resistencia de Carga: Valor que permite ajustar el coeficiente de amortiguamiento utilizando los parámetros del sensor.

- Damping deseado: Valor de salida de acuerdo a los requerimientos del fabricante.

### 3.2 Componentes del Sistema

El diseño del sistema inicia con la selección del sensor sísmico buscando una alta fiabilidad en los datos obtenidos de los movimientos del suelo, sabiendo que la superficie terrestre y sus ondas se comportan como un filtro pasa-bajo, para poder determinar la resolución que debe manejar [7]. Por este motivo se escogió el geófono de referencia SM-24 donde sus principales características son:

- La Frecuencia natural: Debe estar en un rango de frecuencia de prospección sísmica, entre 10Hz y 250Hz.
- Sensibilidad: valor de 28,8 V/m/s dado por el fabricante [30].

#### 3.2.1 Selección de componentes de la Tarjeta

Para la selección de los componentes que integran la tarjeta se debe tener en cuenta el comportamiento del sensor y cómo se ajusta para que los datos del coeficiente de amortiguamiento obtenidos estén en un valor cercano a 0.707 y así ser más fiables. En la figura 5 se observa el interior del geófono SM-24, donde se aprecia la bobina móvil del mismo. Ver figura 5



Figura 5:Interior del geofono SM-24

Fuente: Tomado de [30]

En la toma de datos es necesario contar con un buen acople entre el suelo y el geófono, de modo que los datos obtenidos sean de buena calidad, lo recomendable es que se encuentre enterrado [31]; para esto se usan carcacas disponibles a nivel comercial, entre sus principales características se encuentran la resistencia y acople del suelo. En la figura 6 se observa la carcaca empleada en el presente proyecto.



Figura 6: Carcasa para Geófono SM-24

Fuente: Tomado de [32]

### 3.2.1 Sensor de Temperatura y Humedad

Es un sensor digital de temperatura y humedad; su diámetro es de 3x3x0.9mm dentro de un paquete plano dual soldable (DFN) de bajo consumo y potencia, por lo tanto, suministra señales linealizadas y calibradas en un formato digital I<sup>2</sup>C. Este protocolo es utilizado internamente para la comunicación entre diferentes partes de un circuito ver figura 7.



Figura 7: Sensor de temperatura y humedad HTU21D

Fuente Tomado de [33]

### Características

- Paquete tipo DFN (plano dual sin conductores).
- Salida digital de humedad relativa y temperatura, interfaz I<sup>2</sup>C.
- Totalmente calibrado.
- Sensor sin plomo, reflujo soldable.
- Bajo consumo de energía.
- Tiempo de respuesta rápido.
- Intercambiabilidad completa sin calibración requerida en condiciones. Estándar.
- Desaturación instantánea después de largos períodos en fase de saturación.
- Compatible con procesos de ensamblaje automatizados.
- Marca individual para el cumplimiento de estrictos requisitos de trazabilidad.

### 3.2.2 Micro relé

En el ajuste de los parámetros del sensor sísmico(geófono), es necesario conectar una resistencia de carga externa para obtener una respuesta ideal y definir el valor que ajusta su coeficiente de amortiguamiento relativo (Damping) en un rango cercano al 0.707. Para este fin se ha escogido el Micro relé EC2 / Serie EE2 que es un relé de señalización en miniatura con un tamaño de caja compacta y ligero en paquete delgado de bajo consumo, con una alta tensión de disparo, puede soportar 1,5 kvAc en contactos abiertos ver figura 8.



Figura 8:Micro relé EC2 / Serie EE2

Fuente: Tomado de [34]

#### Características

- Empaquetado Tubo.
- Corriente de bobina 11,7mA.
- Voltaje de bobina 12 VCC.
- Resistencia de bobina 1,03 k Ohm.
- Potencia de bobina 140 mW.
- Voltaje de conmutación 250 VCA, 220 VCC - máx.
- Voltaje de encendido (máx.) 9 VCC.
- Voltaje de apagado (mín.) 1.2 VCC.
- Tiempo de funcionamiento 2ms.
- Tiempo de liberación 1ms.
- Temperatura de operación -40 °C ~ 85 °C.

### 3.2.3 Potenciómetro Digital de 2k AD5248

Dispositivo compacto de dimensiones de 3 mm x 4.9 mm, solución empaquetada para las aplicaciones de ajuste duales, de 256 posiciones, realizan la misma función de ajuste electrónico que un potenciómetro mecánico de tres terminales, se encuentra disponible en cuatro valores de resistencia de extremo a extremo (2,5 kW, 10 kW, 50 kW, y 100 kW), estos dispositivos de bajo coeficiente de temperatura son ideales para una alta precisión ver figura 9.

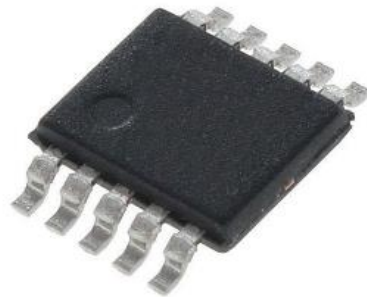


Figura 9: Potenciómetro digital de 2k AD5248

Fuente [35]

#### Características

- 2 canales, potenciómetros 256 posiciones.
- Subministro individual: 2,7 V a 5,5 V.
- Temperatura de funcionamiento: -40 °C a 125°C.

### 3.2.4 Potenciómetro Digital MCP41010- I/SN

Es un dispositivo de un solo canal y tiene un paquete PDIP o SOIC de 8 pines; que se controla a través de una interfaz SPI estándar de la industria, en valores digitales ver figura 10.

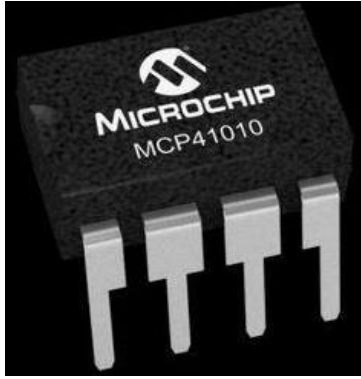


Figura 10: Potenciómetro digita de 10K

Fuente tomado [36]

### Características

- 256 topes para cada potenciómetro.
- Valores de potenciómetro para 10 k $\Omega$ , 50 k $\Omega$  y 100 k $\Omega$ .
- Versiones simples y duales.
- Interfaz serie SPI <sup>TM</sup> (modo 0,0 y 1,1).
- $\pm 1$  LSB máx. INL y DNL.
- Tecnología CMOS de baja potencia.

Corriente de suministro máxima de 1  $\mu$ A en funcionamiento estático.

### 3.2.5 Selección de Características Tarjeta de Adquisición

Una vez seleccionado el sensor se procede al diseño de la tarjeta de adquisición, que se encarga de capturar las señales obtenidas por el geófono y transmitir las. Por consiguiente, se establecen las siguientes características:

- **Convertor Análogo Digital (ADC):** Uno de los aspectos más importantes en el diseño es contar con una alta resolución de la adquisición que se realiza a 16 bits, con el fin de no perder información en el proceso. Además, se requiere que el ADC sea diferencial para que se tomen los datos en los dos semiplanos (positivo y negativo).



- **Comunicación Serial entre el Sensor:** Es necesario que la tarjeta se comunique de forma serial con un computador para visualizar el comportamiento del dispositivo.
- **Capacidad de Procesamiento acorde con las tareas a desarrollar:** Sistema que ejecuta múltiples tareas tales como sincronización en la toma de datos, operaciones de adquisición en cortos periodos de tiempo, aproximadamente de 1ms, y de esta forma obtener todos los datos generados por un geófono, para que no haya pérdida de información.

Para realizar la implementación de la etapa de control de la tarjeta de adquisición, se realizó un proceso de revisión bibliográfica de las tecnologías adecuadas con el fin de buscar una tarjeta de código abierto (Open Source), a continuación, se detallan las principales características y figuras de las tarjetas.

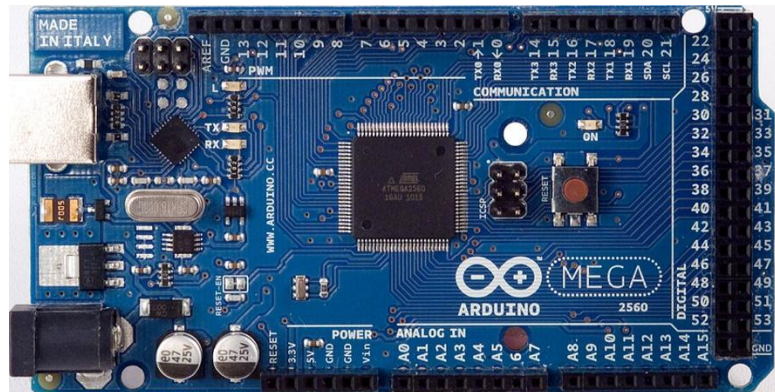


Figura 11: Arduino mega 2560

Fuente: Tomado de [37]

### Características

- Microcontrolador Atmega2560.
- Procesador Atmel Atmega328.
- SRAM 8Kb.
- Alimentación 7-12v.

- Memoria de programa 256kB.
- ADC 10bits.



Figura 12: Tarjeta de desarrollo PIC32-Pinguino-Micro Olimex

Fuente: Tomado de [38]

### Características

- Microcontrolador PIC32MX220F032D.
- Procesador MIPS32® M4K™.
- SRAM 8Kb.
- Alimentación 2.3 V – 3.6 V.
- Memoria de programa 32kB.
- ADC 10bits.

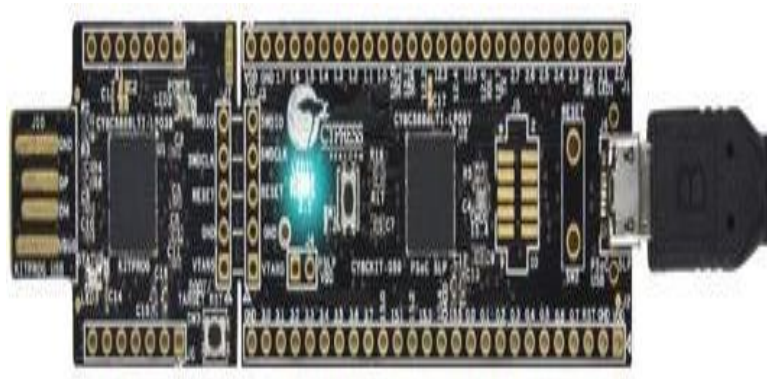


Figura 13: Tarjeta de desarrollo PSoC® 5LP: CY8C58LP.

Fuente: Tomado de [39]

### Características

- Microcontrolador CY8C5888LTI-LP097.
- Procesador ARM Cortex-M3.
- SRAM 8Kb.
- Alimentación 3.3V a 5.5 V.
- Memoria de programa 256kB.
- ADC Delta Sigma de 24bits.

Característica	Pingüino	Arduino Mega 2560	PSoC® 5LP CY8CKIT-059
Microcontrolador	PIC32MX220F032D	Atmega2560	CY8C5888LTI-LP097
Procesador	MIPS32® M4K™	Atmel Atmega328	ARM Cortex-M3
Memoria de programa (KB)	32	256	256
SRAM (KB)	8	8	64
Convertor ADC	10 bits	10 bits	Delta Sigma de 24bits
Tensión alimentación	2.3 V a 3.6 V	7-12V	3.3V a 5.5V

Tabla 1: Características tarjetas de desarrollo.

De acuerdo con las especificaciones del sensor y por consideración del fabricante es recomendable utilizar un ADC de 16 bits que adquiera señales diferenciales, para evitar pérdidas de información.

Con las características de las tarjetas descritas en la tabla 1, la tarjeta que cuenta con los requerimientos necesarios es la PSoC® 5LP CY8CKIT-059 de Cypress que tiene un ADC Delta Sigma diferencial de 24 bits. Otros aspectos tenidos en cuenta es el procesamiento, memoria y resolución.

- **Procesamiento:** Aspecto importante que da la eficiencia al momento de procesar la información, este valor es de 32bits.
- **Memoria SRAM (KB):** Es de vital importancia por su capacidad de almacenamiento de datos que es de 64Kbits.
- **Resolución de conversor ADC:** Es un aspecto significativo por la resolución recomendada en la obtención de datos a través del sensor ya que el fabricante del geófono recomienda que la adquisición de las señales a 16bits.

### **3.3 Modelo Matemático**

La figura (14) 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.

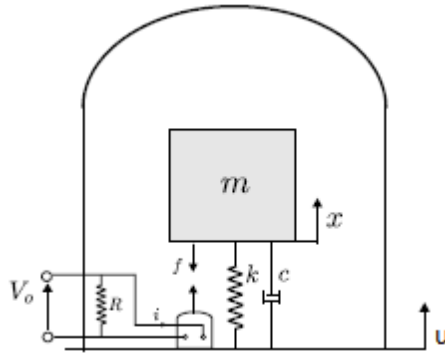


Figura 14: Modelo del geófono

Fuente tomada [40].

El modelo electromecánico equivalente de la figura 14 se puede escribir como la ecuación (1)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m\ddot{u} - BLI \quad (1)$$

Donde:

$m$  =Masa

$c$  =Coeficiente de amortiguamiento

$k$ =Constante del resorte

$B$ =Densidad de flujo de campo magnético

$L$ =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 la ecuación (2)

$$Eg = Bl\dot{x} \quad (2)$$

Si el geófono no se mueve en  $u(t) = 0$ , el nuevo modelo sería el descrito en la ecuación (3)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -BLI \quad (3)$$

Muchos modelos eléctricos equivalentes han aparecido como representación de los geófonos, el modelo eléctrico comúnmente utilizado se observa en la figura (15) cuya ecuación puede ser descrita mediante la ley de Ohm. [41] [42] [43]. descritas en la ecuación (4)

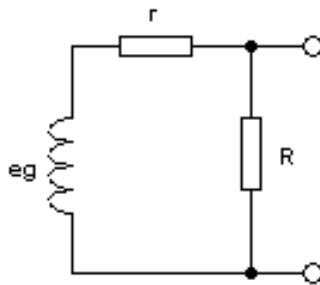


Figura 15: Modelo eléctrico del geófono

$$I = \frac{E_g}{r + R} \quad (4)$$

Donde:

$E_g$  = Constante de generación, propia del geófono

$r$  = resistencia interna del inductor, propia del geófono

$R$  = resistencia de carga, externa y variable

Reemplazando el valor de  $I$  de la ecuación (2) en la ecuación (4) se convierte en la ecuación

$$I = \frac{Bl\dot{x}}{r + R} \quad (5)$$

De esta manera la ecuación (3) se convierte en la ecuación

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -Bl \left[ \frac{Bl\dot{x}}{r+R} \right] \quad (6)$$

Luego se pasa al lado izquierdo el termino que tiene  $\dot{x}$ , reordenando se tiene la ecuación (7)

$$m\ddot{x} + \left[ c + \frac{B^2 l^2}{r + R} \right] \dot{x} + kx = 0 \quad (7)$$

Despues se divide por la masa de la ecuación (7) y nos queda la ecuación (8)

$$\ddot{x} + \left[ \frac{c}{m} + \frac{B^2 l^2}{(r + R)m} \right] \dot{x} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (8)$$

La ecuación (8) representa el modelo matematico del geófono. Este coincide con el modelo caracteristico para un sistema de segundo orden expresado en la ecuación (9)

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (9)$$

Los polos de un sistema subamortiguado de segundo orden de tiempo continuo están dados según la ecuación (10)

$$s = -\zeta\omega_n \pm -j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (10)$$

Sus equivalentes en tiempo discreto se obtienen aplicando la transformada descrita en la ecuación (11)

$$Z = e^{sh} \quad (11)$$

Donde:

$s$ =Los polos del sistema continuo.

$h$ = Periodo de muestreo.

A partir de la ecuación (11) se determina la ecuación (12) y (13)

$$Z = e^{[-\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}]h} \quad (12)$$

$$Z = e^{-\zeta\omega_n h} \cdot e^{\pm(j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})h} \quad (13)$$

dando como resultado la ecuación (14)

$$z = r e^{j\theta} \quad (14)$$

$r$  y  $\theta$  son una representación polar de los polos discretos, que muestran la respuesta al impulso del sistema de segundo orden, estas expresiones se pueden expresar según las ecuaciones (15) y (16)

$$r = e^{-\zeta\omega_n h} \quad (15)$$

$$\theta = \pm \left( j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \right) h \quad (16)$$

Las expresiones (15) y (16) permiten determinar la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguamiento para un sistema discreto de segundo orden. Despejando  $\omega_n$  de la ecuación (16) y  $\zeta$  de la ecuación (15) de la ecuación (18) a la ecuación (24)



$$\omega_n = \frac{\theta}{\sqrt{1 - \zeta^2} \cdot h} \quad (17)$$

$$r = e^{\frac{-\zeta\theta h}{\sqrt{1 - \zeta^2} \cdot h}} \quad (18)$$

$$\ln(r) = \frac{-\zeta\theta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (19)$$

$$(\ln(r))^2 = \frac{\zeta^2\theta^2}{1 - \zeta^2} \quad (20)$$

$$(\ln(r))^2 - \zeta^2((\ln(r))^2) = \zeta^2\theta^2 \quad (21)$$

$$(\ln(r))^2 = \zeta^2(\theta^2 + ((\ln(r))^2)) \quad (22)$$

$$\zeta^2 = \frac{(\ln(r))^2}{\theta^2 + ((\ln(r))^2)} \quad (23)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{(\ln(r))^2}{\theta^2 + ((\ln(r))^2)}} \quad (24)$$

### Estimación de los coeficientes de un modelo auto regresivo

De aquí las expresiones (17) y (24) 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  $a_1$  y  $a_2$  .[39]

$$\hat{y} = a_1 y(k - 1) - a_2 y(k - 2) \quad (25)$$

$$J(a_1, a_2) = \frac{1}{N} \sum_{k=3}^N [y(k) - \hat{y}(k)]^2 \quad (26)$$

$$J(a_1, a_2) = \frac{1}{N} \sum_{k=3}^N [y(k) - (-a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2))]^2 \quad (27)$$

Donde  $J(a_1, a_2)$  es el promedio de los cuadrados de los errores de predicción

$$J(a_1, a_2) = \frac{1}{N} \sum_{k=3}^N [y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2)]^2 \quad (28)$$

$$\hat{y} = -y(k-1) - y(k-2) \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (29)$$

Se define  $\varphi^T$  de la ecuación (30) y  $\delta$  de la ecuación (31)

$$\varphi^T(K-1) = -y(k-1) - y(k-2) \quad (30)$$

$$\delta = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (31)$$

Al reemplazando la ecuación (30) y (31) en (29) dando como resultado la ecuación (32)

$$\hat{y} = \varphi^T(K-1) \cdot \delta \quad (32)$$

La ecuación (29) se puede optimizar si el valor mínimo es igual a la ecuación (33)

$$\delta^{min} \in R^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=3}^N [y(k) - \varphi^T(K-1) \cdot \delta]^2 \quad (33)$$

Donde:

$y(k)$ =valor medido

$\varphi^T(K-1) \cdot \delta$  = valor predicho

Derivando con respecto a  $\delta$  la ecuación (33) e igualando a cero se obtiene la ecuación (34)

$$\delta = \left[ \sum_{k=3}^N y(k-1) \cdot \varphi^T(K-1) \right]^{-1} \left[ \sum_{k=3}^N \varphi(K-1)y(k) \right] \quad (34)$$

De manera matricial se puede expresar como la ecuación (35)

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \left( \sum_{k=3}^N \begin{bmatrix} y^2(k-1) & y(k-1)y(k-2) \\ y(k-1)y(k-2) & y^2(k-2) \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \left( \sum_{k=3}^N \begin{bmatrix} -y(k)y(k-1) \\ -y(k)y(k-2) \end{bmatrix} \right) \quad (35)$$

De la ecuación (35)  $a_1$  y  $a_2$  son los coeficientes,  $r$  y  $\delta$  son los polos del modelo ARX.

### **Determinación de $R$ como función de $\zeta$**

Para determinar el valor de la resistencia de carga, la cual permite modificar el valor de coeficiente de amortiguamiento debemos empezar por cotejar las ecuaciones (8) y (9) y despejando  $\omega_n$  dando como resultado la ecuación (36).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (36)$$

Donde

$\omega_n$  =frecuencia natural del sistema.

De la misma manera se tiene:

$$2\zeta\omega_n = \frac{c}{m} + \frac{B^2 l^2}{(r + R)m} \quad (37)$$

Si despejamos  $\zeta$  de (36) obtenemos la ecuación (38)

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} + \frac{B^2 l^2}{2m\omega_n(r + R)} \quad (38)$$

Se definen  $\zeta_0$  descrita en la ecuación (39) y  $S_0$  en la ecuación (40)

$$\zeta_0 \cong \frac{c}{2m\omega_n} \quad (39)$$

$$S_0 \cong Bl \quad (40)$$

Donde:

$\zeta_0$ = damping natural del sistema.

$S_0$ = constante de generación electromotriz propia del geófono

para simplificarse define en la ecuación (41)

$$\alpha(R) \cong \frac{1}{2m\omega_n(r + R)} \quad (41)$$

Reemplazando las expresiones (39), (40) y (41) en (38).Descritas en la ecuación (42)

$$\zeta = \zeta_0 + \alpha(R)S_0^2 \quad (42)$$

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 (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 la ecuación (42) obtenemos la ecuación (43) y (44)

$$\zeta(R1) = \zeta_0 + \alpha(R1)S_0^2 \quad (43)$$

$$\zeta(R2) = \zeta_0 + \alpha(R2)S_0^2 \quad (44)$$

La ecuación (42) puede ser representada matricialmente como la ecuación 45

$$\begin{bmatrix} 1 & \alpha(R1) \\ 1 & \alpha(R2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_0 \\ S_0^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta(R1) \\ \zeta(R2) \end{bmatrix} \quad (45)$$

despejamos de la ecuación (45)  $\zeta_0$   $S_0^2$  se tienen las ecuaciones (46), (47) y (48)

$$\begin{bmatrix} \zeta_0 \\ S_0^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha(R2) - \alpha(R1)} \begin{bmatrix} \alpha(R2) & -1 \\ \alpha(R1) & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \zeta(R1) \\ \zeta(R2) \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} \zeta_0 \\ S_0^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha(R2) - \alpha(R1)} \begin{bmatrix} \alpha(R2) & -\alpha(R1) \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta(R1) \\ \zeta(R2) \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} \zeta_0 \\ S_0^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha(R2) - \alpha(R1)} \begin{bmatrix} \alpha(R2)\zeta(R1) & -\alpha(R1)\zeta(R2) \\ -\zeta(R1) + \zeta(R2) & \end{bmatrix} \quad (48)$$

Para tener una medida más exacta y aprovechar todo el espectro de la prueba y tener resultados óptimos se utiliza una pseudoinversa. [45]

Redefiniendo la ecuación (48) se tiene la ecuación (49)

$$\begin{bmatrix} 1 & \alpha(R1) \\ 1 & \alpha(R2) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \alpha(RN) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_0 \\ S_0^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta(R1) \\ \zeta(R2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \zeta(RN) \end{bmatrix} \quad (49)$$

Donde se define  $A$ ,  $\vartheta$  y  $B$  en las ecuaciones (50), (51) y (52)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha(R1) \\ 1 & \alpha(R2) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \alpha(RN) \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$\vartheta = \begin{bmatrix} \zeta_0 \\ S_0^2 \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$B = \begin{bmatrix} \zeta(R1) \\ \zeta(R2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \zeta(RN) \end{bmatrix} \quad (52)$$

La ecuación (49) puede escribirse de manera general como la ecuación (53)

$$A\vartheta = B \quad (53)$$

Despejando de (53)  $\vartheta$  obtenemos la ecuación (54)

$$\vartheta = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (53)$$

$$A^T \cdot A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \alpha(R1) & \alpha(R2) & \cdot & \cdot & \cdot & \alpha(RN) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \alpha(R1) \\ 1 & \alpha(R1) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \alpha(RN) \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$A \cdot A^T = \begin{bmatrix} N & \sum_{j=1}^N \alpha(Rj) \\ \sum_{j=1}^N \alpha(Rj) & \alpha^2(Rj) \end{bmatrix} \quad (56)$$

De la ecuación (56) se define la ecuación (57)

$$Det(A \cdot A^T) = N \sum_{j=1}^N \alpha^2(Rj) - \sum_{j=1}^N \alpha(Rj) \quad (57)$$

Se define la ecuación (58)

$$A \cdot A^T = \frac{1}{Det(A \cdot A^T)} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N \alpha^2(Rj) & -\sum_{j=1}^N \alpha(Rj) \\ -\sum_{j=1}^N \alpha(Rj) & N \end{bmatrix} \quad (58)$$

Por lo tanto se llega a la ecuación (59)

$$\begin{bmatrix} \zeta_0 \\ S_0^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\text{Det}(A.A^T)} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N \alpha^2(Rj) & -\sum_{j=1}^N \alpha(Rj) \\ -\sum_{j=1}^N \alpha(Rj) & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N \zeta(Rj) \\ \sum_{j=1}^N \alpha(Rj)\zeta(Rj) \end{bmatrix} \quad (59)$$

De la ecuación (42) se despeja R teniendo una expresión para calcular la resistencia de carga necesaria para obtener un  $\zeta$  descrita en la ecuación (60)

$$\zeta^d = \zeta_0 + \alpha(R)S_0^2 \quad (60)$$

Donde:

$\zeta^d$  = damping deseado

Despejando  $\alpha(R)$  de la ecuación (60) se obtiene la ecuación (61)

$$\alpha(R) = \frac{\zeta^d - \zeta_0}{S_0^2} \quad (61)$$

Al Reemplazando en (41) se tiene la ecuación (62)

$$\frac{1}{2m\omega_n(r + R)} = \frac{\zeta^d - \zeta_0}{S_0^2} \quad (62)$$

La ecuación (62) escrita de otra forma se convierte en las ecuaciones (63) y (64)

$$2rm\omega_n + 2Rm\omega_n = \frac{S_0^2}{\zeta^d - \zeta_0} \quad (63)$$



$$2Rm\omega_n = \frac{S_0^2}{\zeta^d - \zeta_0} - 2rm\omega_n \quad (64)$$

Finalmente, la ecuación para R es la ecuación (65)

$$R = \frac{S_0^2}{(\zeta^d - \zeta_0)2m\omega_n} - r \quad (65)$$

La resistencia R en la expresión (64) se puede calcular solo si se conoce los valores de la frecuencia natural del sistema  $\omega_n$ , el damping  $\zeta_0$  y la constante de generación  $S_0$ , las ecuaciones descritas anteriormente son utilizadas para determinar los parámetros del geófono y calcular la resistencia necesaria para su ajuste.

### 3.4 Caracterización Elemento Sensor

La caracterización es una parte importante del diseño, permitiendo verificar el funcionamiento y comportamiento del sensor sísmico para obtener una medida acertada. En el presente proyecto se utilizará el geófono SM-24 y sus características descritas en la tabla 2.

Frecuencia Natural	10Hz
circuito abierto (típico)	0.25
resistencia de derivación de calibración de amortiguamiento	1.339 $\Omega$
amortiguamiento con calibración de derivación	0.6
Sensibilidad	28.8 V/m/s (0.73 V/in/s)
Resistencia de la bobina	375 $\Omega$
Temperatura de la bobina	-40 °c 100 °c (-40° F-212°F)

Tabla 2:Características elemento sensor

Fuente tomada [24]

### 3.5 Prueba funcionamiento Geófono

Para realizar una prueba se deben tener en cuenta el comportamiento de las bobinas con relación a la fuerza magnética generada en sus extremos, así como las corrientes eléctricas del geófono en relación con la frecuencia natural, coeficiente de amortiguamiento, sensibilidad y la masa equivalente.

Como se muestra en la figura 16 la amplitud de la primera cresta de tensión ( $A_1$ ), amplitud del segundo pico ( $A_2$ ), el tiempo de punto de cruce por cero. ( $T$ ) [46].

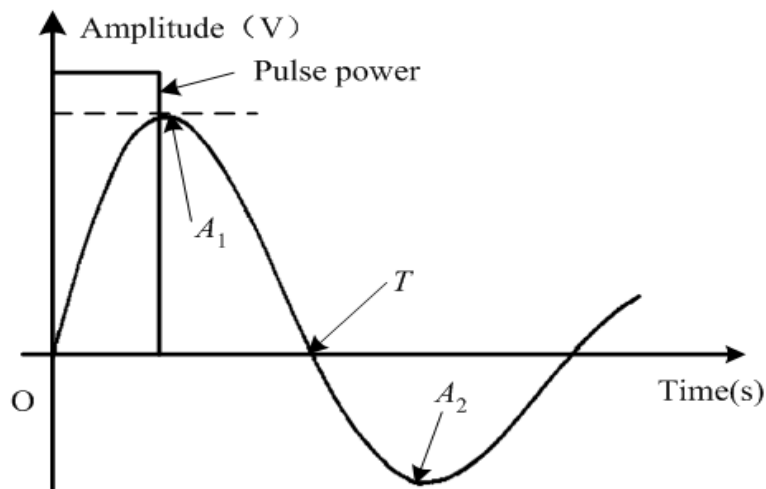


Figura 16: Curva de respuestas de la prueba

Fuente: Tomado de [46]

El primer paso consiste en confirmar dos parámetros, físicos y fundamentales la frecuencia natural en circuito abierto (llamada resistencia) y el coeficiente de amortiguamiento electromecánico o damping), para esto se implementa el circuito mostrado en la figura 17, se debe excitar el geófono 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 y generando una diferencia de potencial, la cual mostrará el comportamiento dinámico del sistema al ser visualizado mediante un sistema de adquisición.

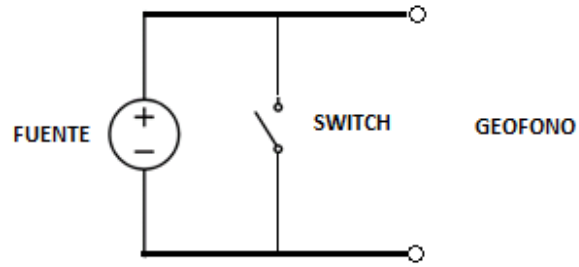


Figura 17: Circuito para excitación de geófono.

Fuente: Elaboración propia

Luego de implementar el circuito de la figura 17 y excitándolo con una diferencia de potencial de 6 volts en un intervalo de 150ms, se obtuvo los datos mostrados en la figura 18. Esta describe comportamiento dinámico del geófono un sistema subamortiguado de segundo orden, por lo que el valor del damping debe estar en un valor entre 0 y 1.

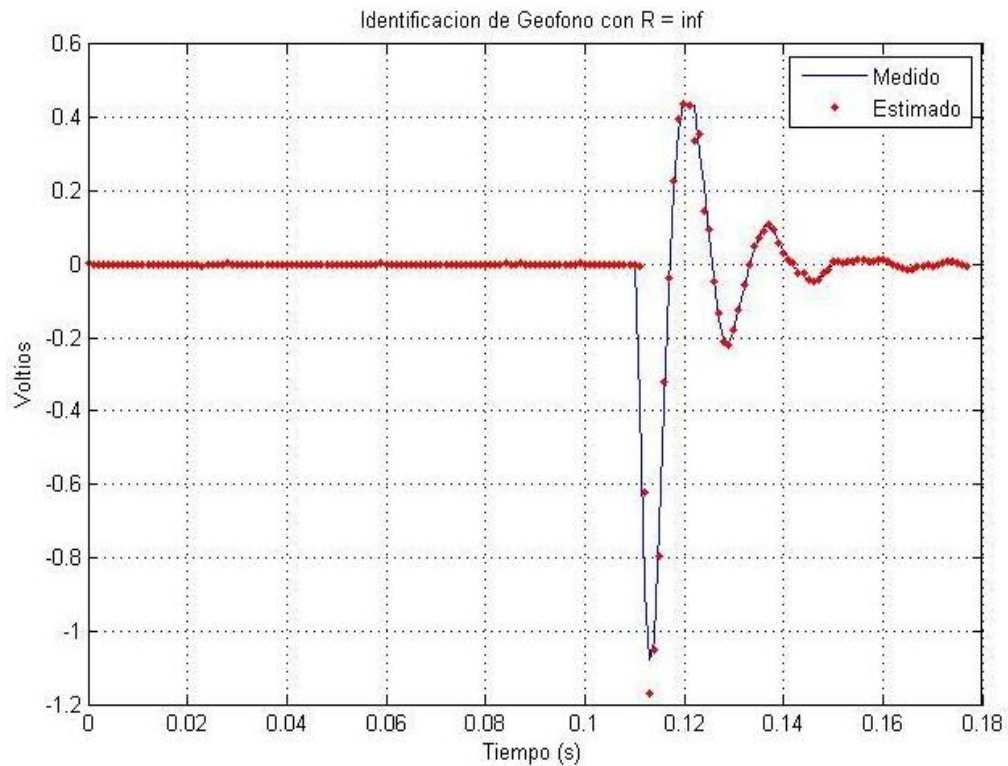


Figura 18: Respuesta al impulso de un geófono en diferentes pruebas

Fuente: *Elaboración Propia.*

En la Figura 19 se observa el circuito para caracterización del geófono con resistencia de carga.

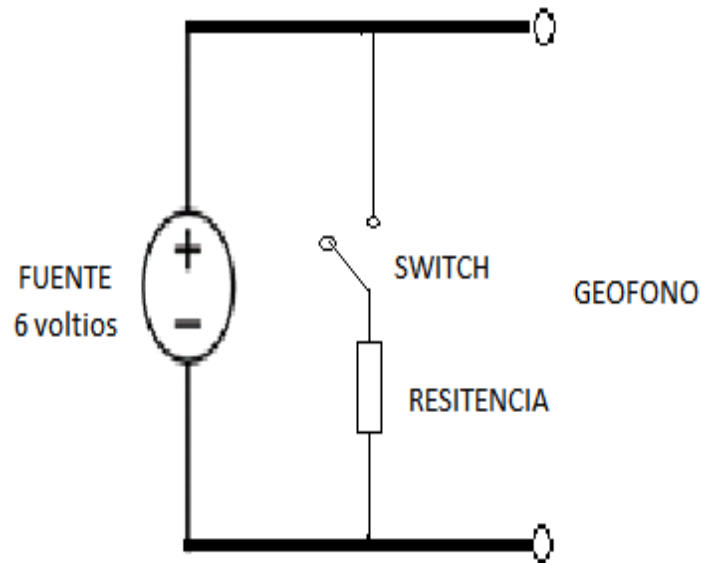


Figura 19: Circuito para caracterización con resistencia de carga

Fuente elaboración propia

El siguiente paso para la caracterización consta en cerrar el Switch del circuito del sistema, ver figura 19, y colocar una resistencia de carga calculada a través del modelo matemático ecuación (65) del capítulo III a través del software Matlab corresponde a un valor de  $1992\Omega$  esta resistencia modifica el coeficiente de amortiguamiento o damping y afecta la respuesta del sistema frente a la misma (diferencia de potencial de 6 volts en un intervalo de 150ms), ver Figura 20 y comparándolo con la gráfica de la figura 16 se puede evidenciar un correcto funcionamiento del geófono con un damping cercano a 0.707.

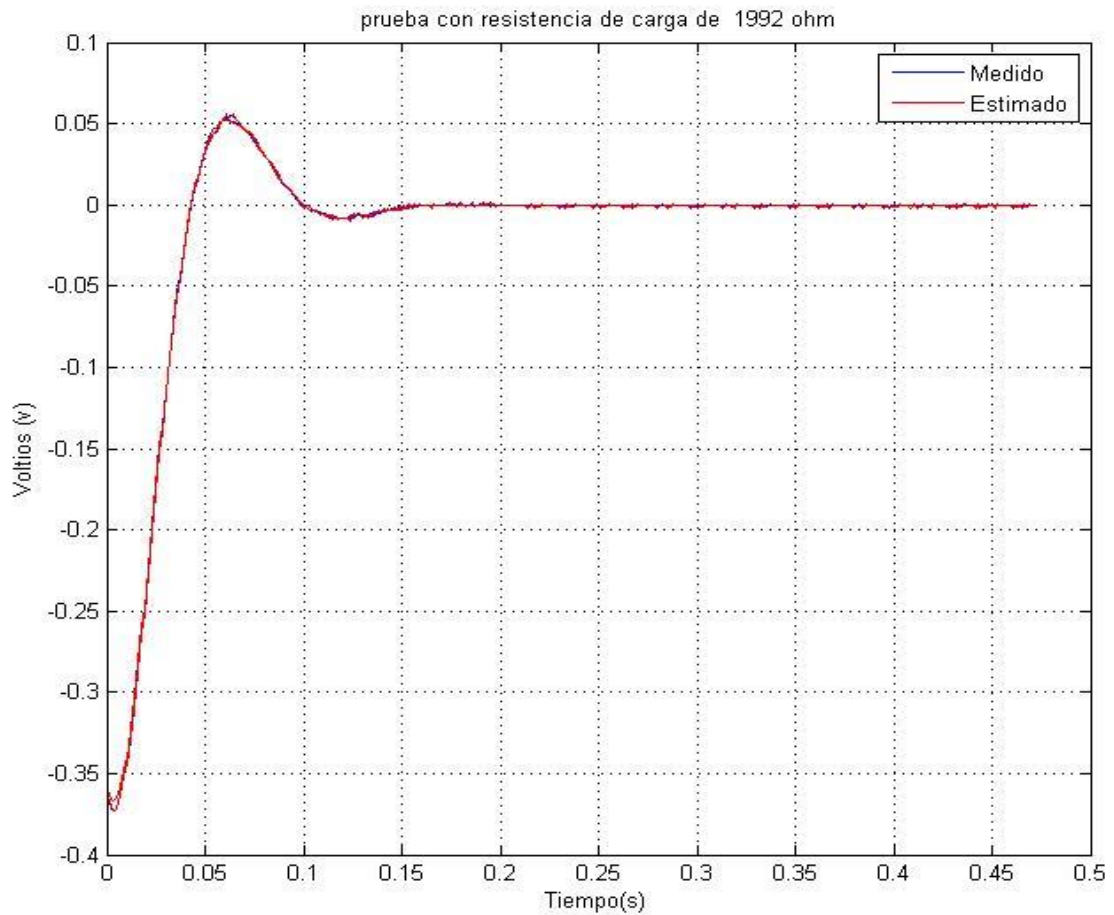


Figura 20: Respuesta de geófonos con resistencia de carga 1992 Ohms

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.6 Implementación Del Hardware Del Sistema

En esta parte se encuentra el diseño electrónico de los bloques que conforman el sistema; tanto para el diseño de los esquemáticos como de los circuitos impresos PCB, se utiliza la herramienta CadSoft Eagle 7.60, versión de prueba para la elaboración de la tarjeta de adquisición, en relación con los anchos y distancias entre pistas y dimensiones.

### 3.6.1 Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición

En la figura 21 se presenta el diseño realizado con la herramienta Cadsoft Eagle donde se observa la distribución de los dispositivos que incluyen el esquemático del hardware, en la figura 22 se observa la (cara superior) TOP COOPER del dispositivo implementado y en la figura 23 se visualiza la tarje en 3D (tercera dimensión)

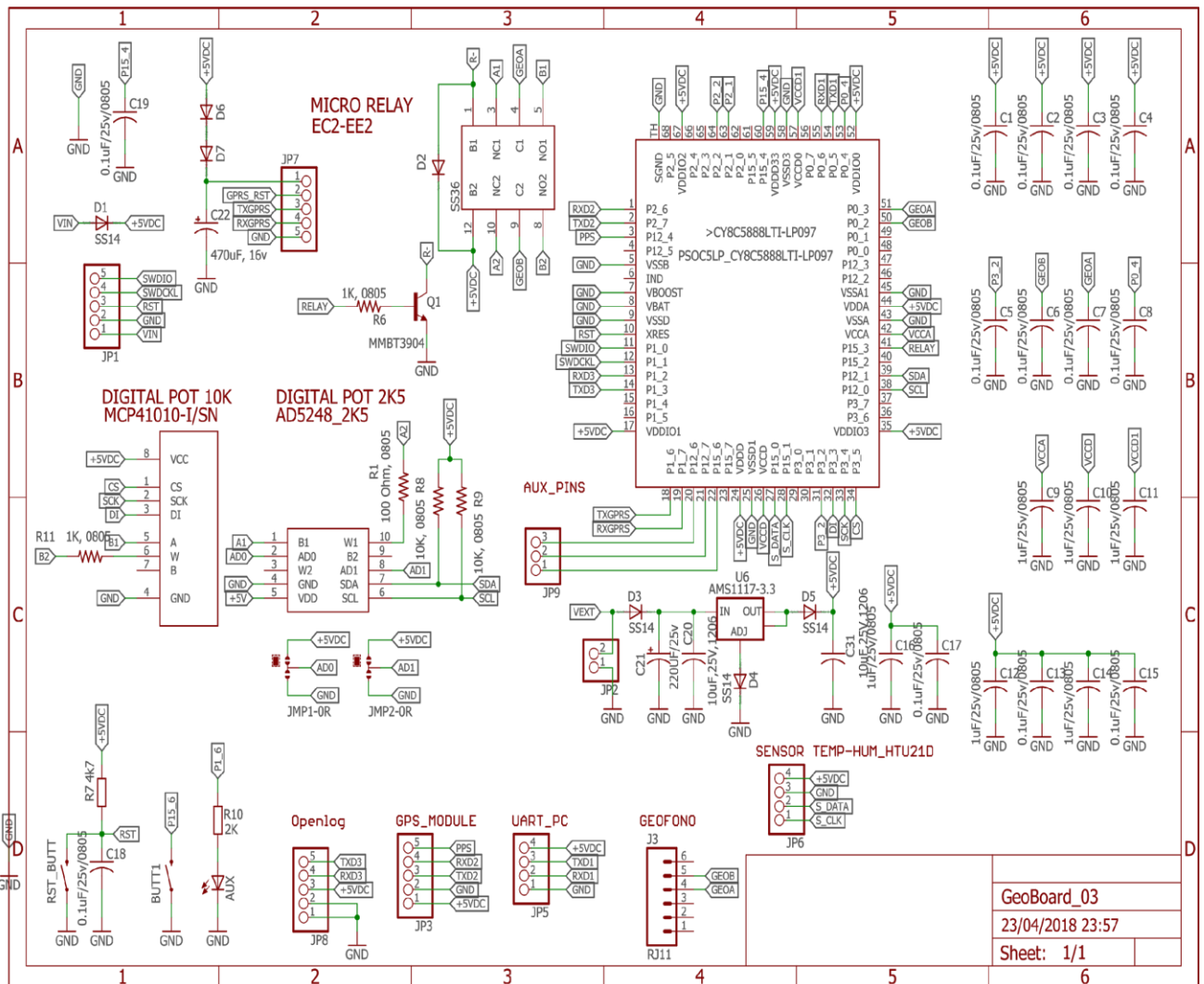


Figura 21: Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición y ajuste del coeficiente de amortiguamiento relativo de un geófono.

Fuente: Elaboración Propia.

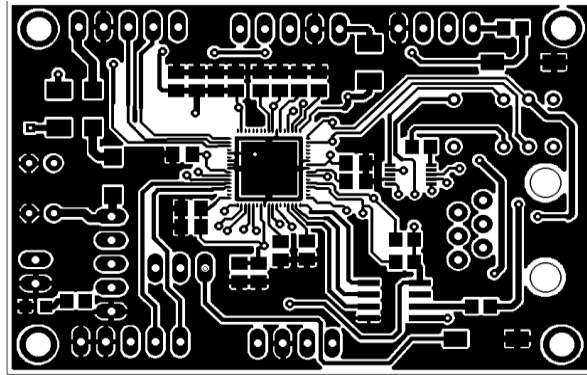


Figura 22: Diseño esquemático tarjeta de adquisición y ajuste del coeficiente de amortiguamiento relativo.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 23: Vista en 3d de componentes de la tarjeta de adquisición.

Fuente: Elaboración Propia

Una vez realizado el proceso de elaboración de ensamble donde son soldados los componentes y montados los módulos ; se obtiene la tarjeta visualizada en la figura (24).

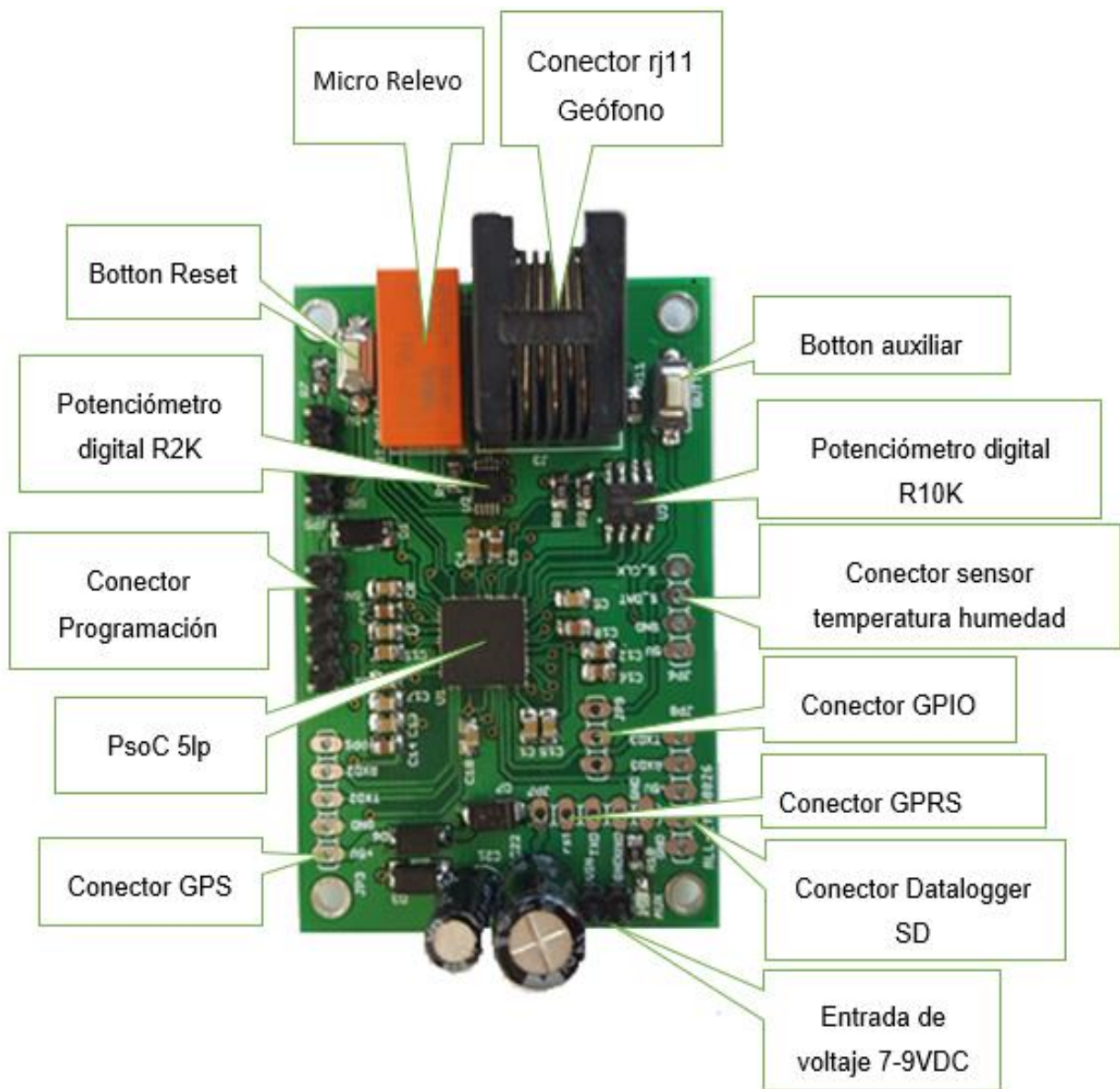


Figura 24: Tarjeta de adquisición ensamblada.

Fuente: Elaboración Propia.



## 4 CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN SOFTWARE DEL SISTEMA

En este capítulo se describe cada uno de los programas utilizados en el proyecto a partir del modelamiento matemático del geófono definido en el capítulo III; para este fin se emplean tres distintos entornos de programación Psoc Creator, LabVIEW y Matlab script que se enlazaran para la toma de datos, ajuste y visualización de los datos obtenidos.

### DIAGRAMA GENERAL

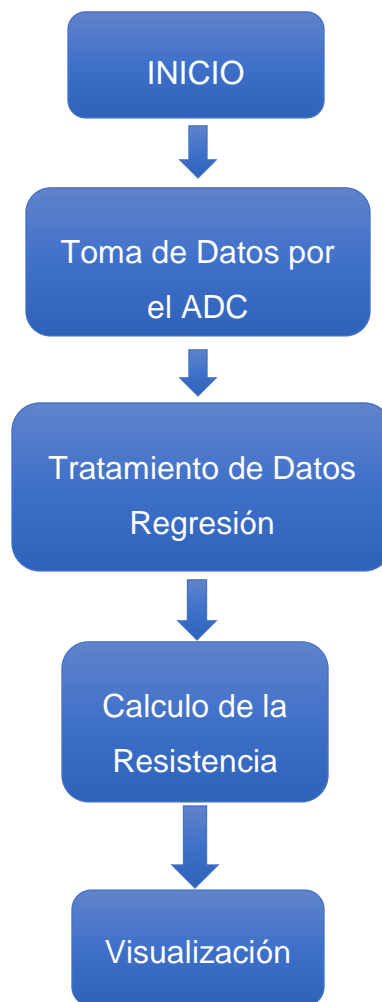


Figura 25: Diagrama general del software

Fuente propia

## 4.1 Implementación en Psoc Creator

Es un entorno de diseño integrado (IDE) que permite la edición simultánea de hardware y firmware, la compilación y la depuración de los sistemas Psoc. Las aplicaciones se crean utilizando captura esquemática con más de 150 componentes periféricos análogos y digitales basado en un compilador de código en C gratuito, sin limitaciones de tamaño de código el cual está basado en Windows que incluye ADC, UART y TIMER [47], por consiguiente, se procede a la explicación de la configuración de cada una de ellos.

### 4.1.1 ADC

La configuración del ADC(Analog-to-Digital Conversión) ver (figura 26) donde se establece en una resolución de 16 bits, para obtener una mayor confiabilidad en los datos adquiridos el cual tiene un filtro pasa baja, con el fin de que la señal no se distorsione, su configuración se determina en un rango de entrada de  $\pm 6v$  (figura 27), significa que es un voltaje diferencial (figura 28), esto implica que al desconectar el voltaje de entrada la masa se suelta dirigiéndose a voltajes negativos.

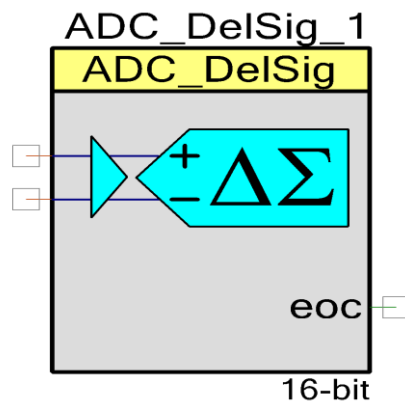


Figura 26: ADC

Fuente Propia.

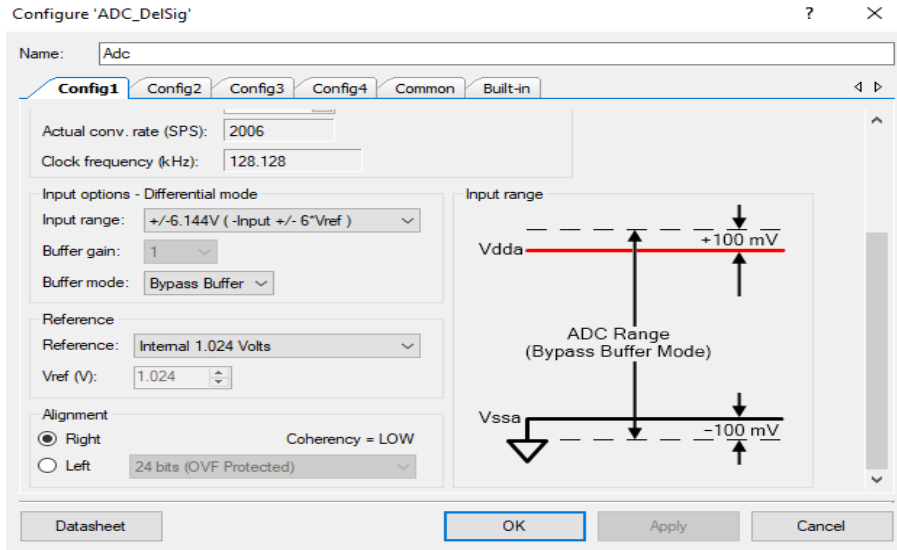


Figura 27: Configuración voltaje diferencial de entrada  
Fuente Propia.

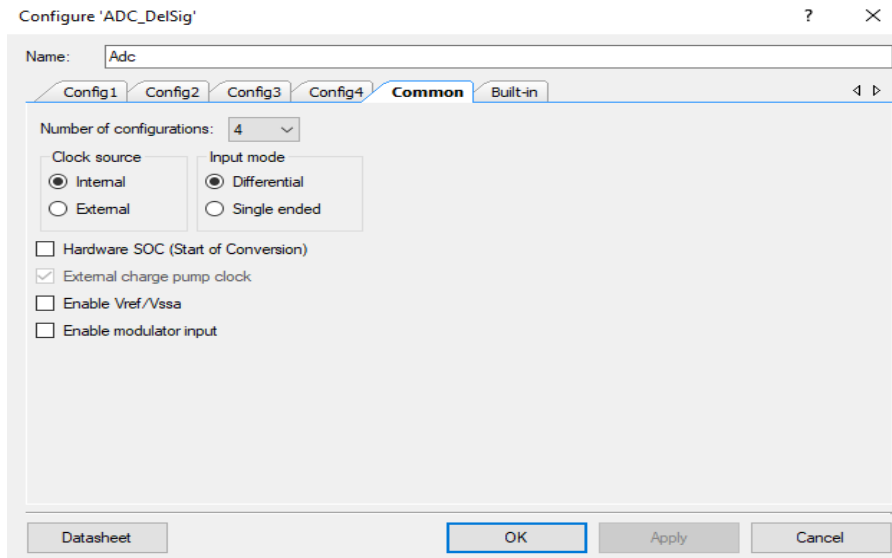


Figura 28: Selección de voltaje diferencial.  
Fuente Propia.

## 4.1.2 UART

Protocolo de comunicación asíncrona comúnmente como RS-232 configurado para Rx, Tx (figura 29), su principal funcionamiento es la recepción y transmisión de los valores censados, se elige la velocidad en 9600 baudios recomendada por el fabricante ver (figura 30).

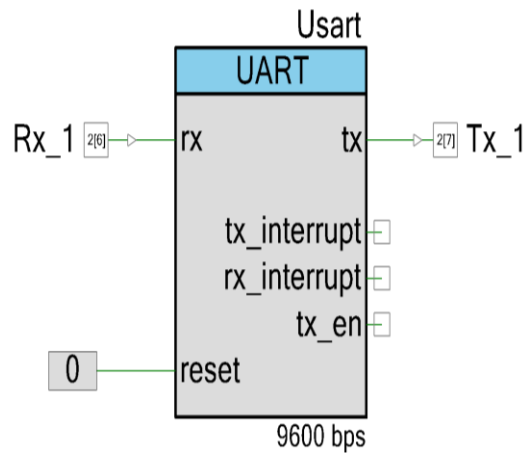


Figura 29: UART.

Fuente Propia.

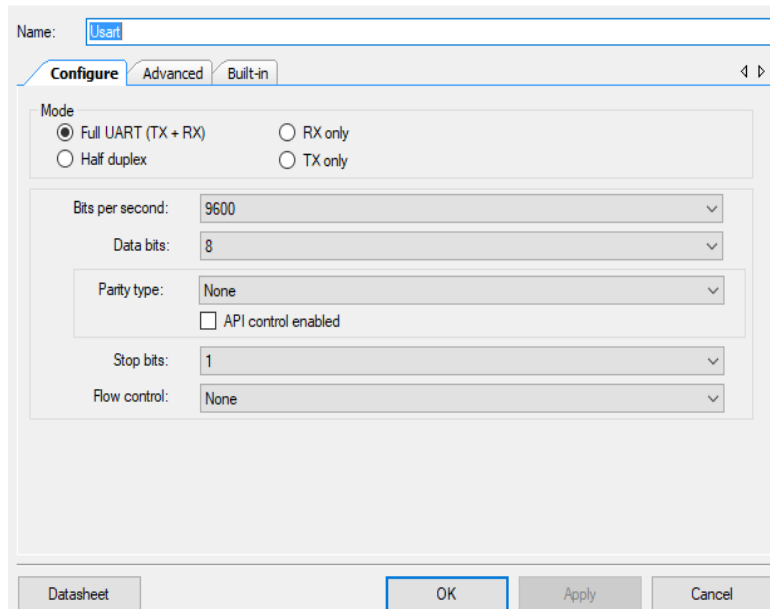


Figura 30: configuración UART

Fuente Propia.

### 4.1.3 Configuración del Timer

Para el envío y recepción de datos es importante determinar el tiempo que se va a realizar esta transmisión proveniente del ADC utilizando un timer ver (figura 31); para esto es necesario colocar una interrupción (isr\_1), que avise cuando empiecen a llegar los datos determinando un periodo de muestreo de 1 ms ver (figura 32).

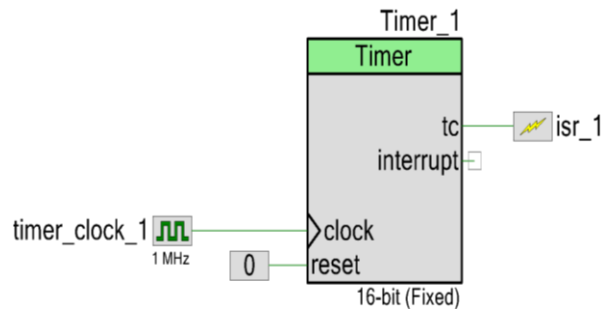


Figura 31: Timer.

Fuente Propia.

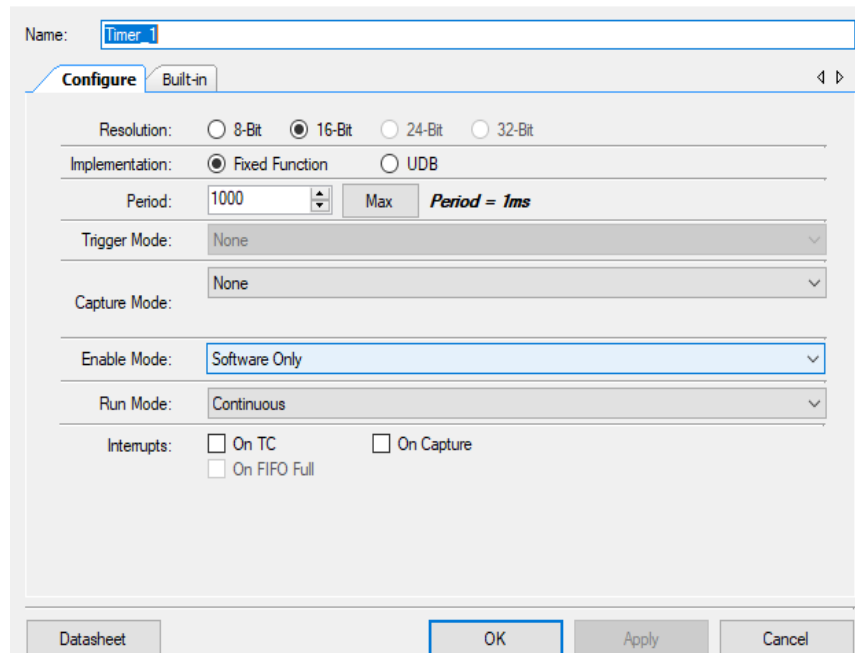


Figura 32: Configuración Timer.

Fuente Propia.

#### 4.1.4 Configuración SPI

Para hacer uso de la resistencia de carga externa es necesario la configuración del SPI que permite la comunicación ver (figura 33).

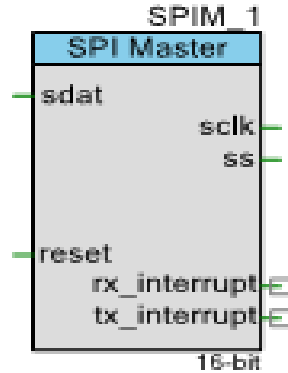


Figura 33: SPI

Fuente Propia.

En la configuración del SPI se tiene en cuenta la resolución configurada para el ADC y el tiempo de transmisión configurados en el timer y la forma bidireccional en línea de datos como se muestra en la figura 34.

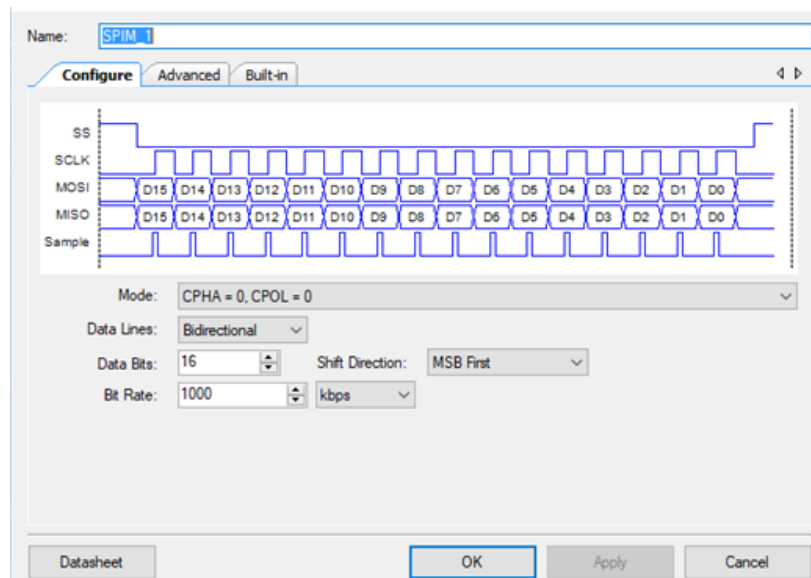


Figura 34: Configuración SPI.

Fuente Propia.

Después de configurar los protocolos, formas de envío y recepción de los datos, así como los tiempos de muestreo se ejecutan en código c las funciones donde se activan y se colocan condiciones de funcionamiento.

## 4.2 Funciones

**Caracterización:** Inicia con la alimentación del geófono con 5v durante un periodo de 150 ms, luego se desconecta con el fin de que se polarice el electroimán produciendo una elevación de la masa por un instante de tiempo, cuando se desconecta se suelta la masa produciendo una diferencia de potencial donde se puede observar el comportamiento dinámico del sensor; esta acción nos permite conocer la actuación del sensor en relación con sus parámetros; se realizan 250 pruebas compuestas por 250 muestras efectuadas cada milisegundo. Este algoritmo se puede evidenciar en el Anexo J.

**Función envío:** Encargada de la recepción de los datos provenientes del sensor sísmico(geófono), donde se hace uso de una bandera (“s”) para determinar el momento donde comienza a llegar los datos censados haciendo el enlace con LabVIEW para graficar y guardar el comportamiento del sensor, en esta función se hace uso de caracterización. Este algoritmo se puede evidenciar en el Anexo J.

**Función Regresión:** Permite hacer el enlace con LabVIEW; la función se desarrolla en un ciclo de 250 interacciones correspondiente al número de pasos que determina la variación de la resistencia de carga y por consiguiente el número de pruebas tomadas; el valor enviado por LabVIEW es establecido en el potenciómetro digital; esta función hace uso de caracterización y envío. Este algoritmo se puede evidenciar en el Anexo J.

## 4.3 Configuración de pines

La configuración de pines de entrada (E/S) y salida se ajustaron con base en el diagrama diseñado en Eagle y están organizados como se muestra en la figura 35.

- PinRx\_1 pin 1: Utilizado en la recepción de datos en el protocolo Uart.
- Tx\_1 pin 2: Utilizado en la transmisión de datos en el protocolo Uart.
- SI\_P25 pin 32: Entrada al potenciómetro digital.
- SCK\_P26 pin 33: Este es el pin de reloj puerto SPI en el potenciómetro.
- Pin csp27: Es la entrada al potenciómetro digital por el puerto SPI pin 34.
- Pin\_3 pin 41: Utilizado para activación del micro relé.
- io\_1wire pin48: Utilizado para la comunicación asíncrona entre los dispositivos.
- SCL\_1 pin 49: Reloj del protocolo I<sup>2</sup>C.
- Pin \_1: Entrada 1 correspondiente al ADC del pin 50.
- Pin \_2: Entrada 1 correspondiente al ADC del pin 51.
- SDA\_1 pin 53: Utilizado para entrada y salida de datos con el protocolo I<sup>2</sup>C.

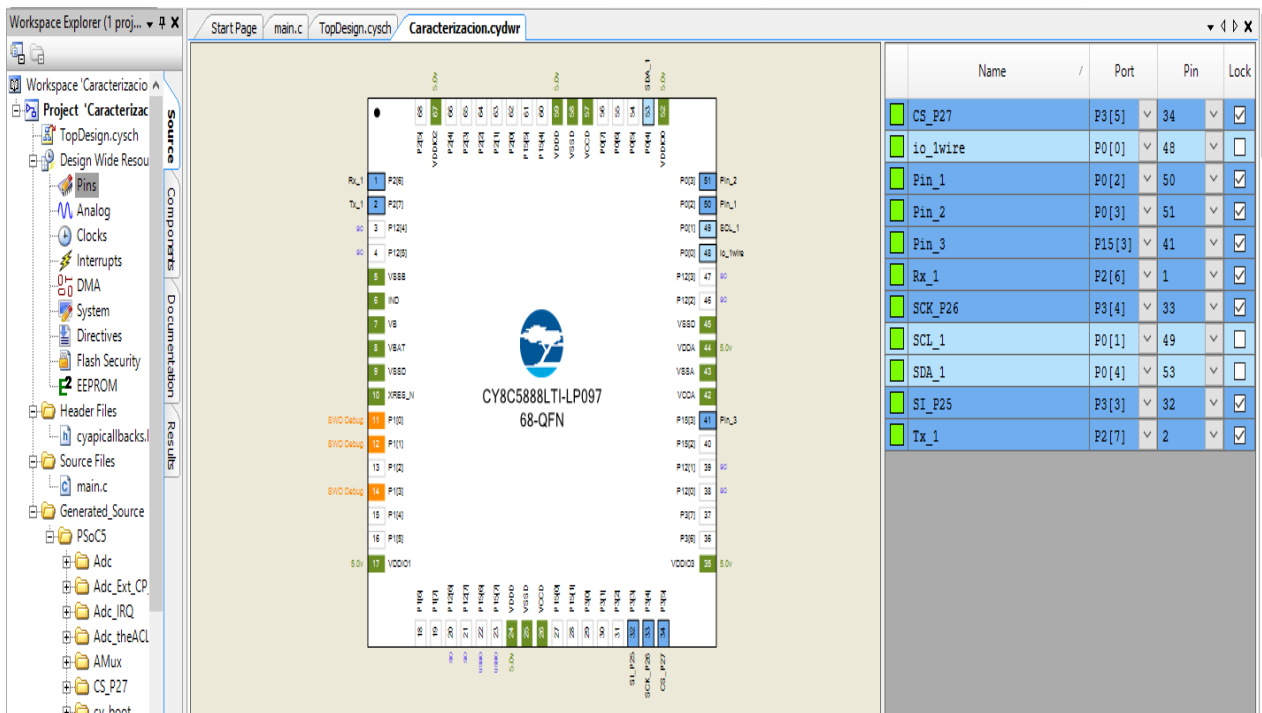


Figura 35: Distribución de Pines targeta Psoc

Fuente Propia.



#### 4.4 Implementación en LabVIEW

Para la observación y análisis de los datos obtenidos por el sensor sísmico se utiliza el software LabVIEW que se enlaza con la Psoic colocando la misma configuración de tiempo de muestreo, la velocidad y el número de muestras figura (36); en este entorno de programación se grafican y guardan los datos censados para observar el comportamiento; así mismo se efectúa la toma de muestras colocando una resistencia externa desde 0 a 10.000 $\Omega$  para efectuar el cálculo de los parámetros que ayudan a determinar en este rango de valores la carga externa para ajustar el sensor en un valor del damping cercano al 0.707 con un porcentaje de error inferior al 5%.

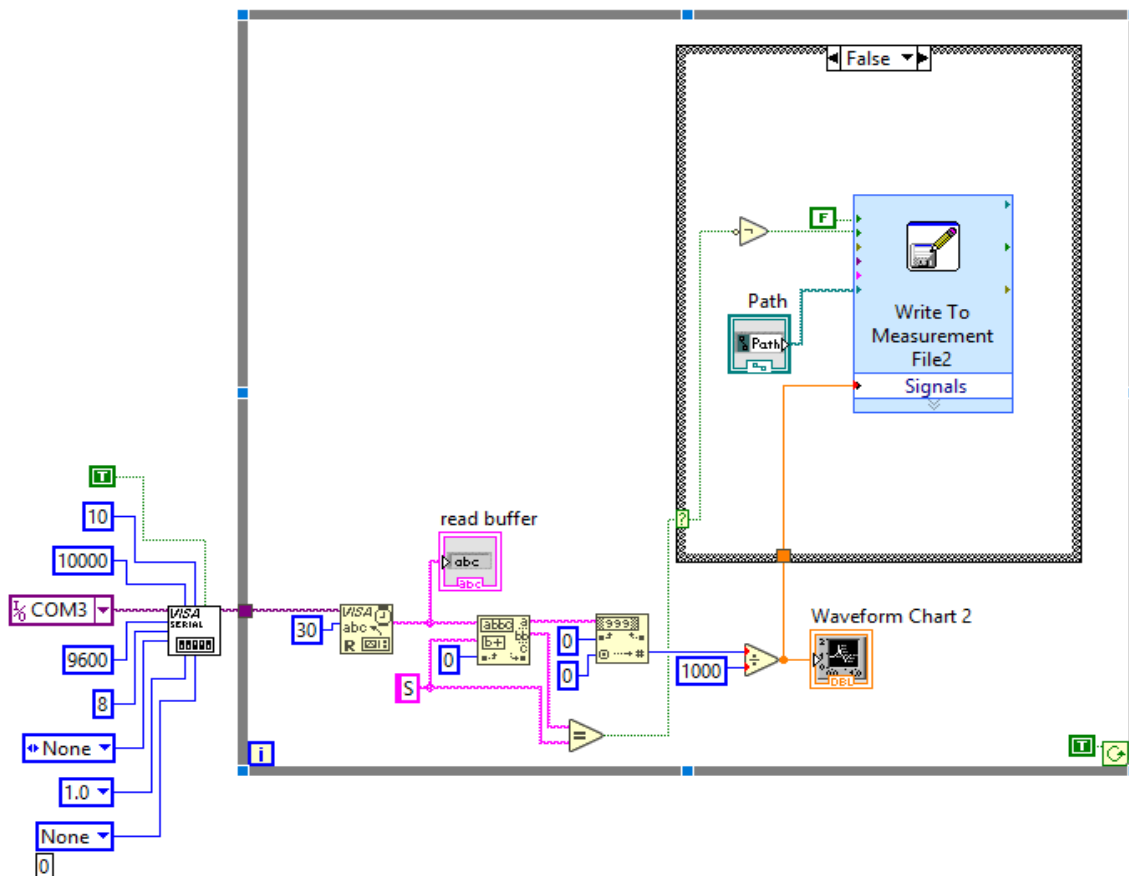


Figura 36: Lectura de datos en LabVIEW.

Fuente Propia.

#### 4.4.1 Caracterización

Para conocer el comportamiento del sensor es necesario observar su funcionamiento; para esto se conecta la tarjeta de adquisición y control, analizando su actuación, sin y con resistencia externa para determinar un valor que ayude al ajuste del geófono dentro de un rango determinado de acuerdo con sus parámetros de frecuencia natural y amortiguamiento.

En la recepción de datos se tiene en cuenta la cantidad de caracteres, la velocidad y el puerto de comunicación por donde se leen los datos, así como la conversión de unidades, analizando su funcionamiento cuando se ve sometido a disturbios externos. Los datos censados son graficados y guardados en un archivo, para esto se utiliza una bandera ("s") que determina el momento donde empiezan a llegar la información ver figura 37.

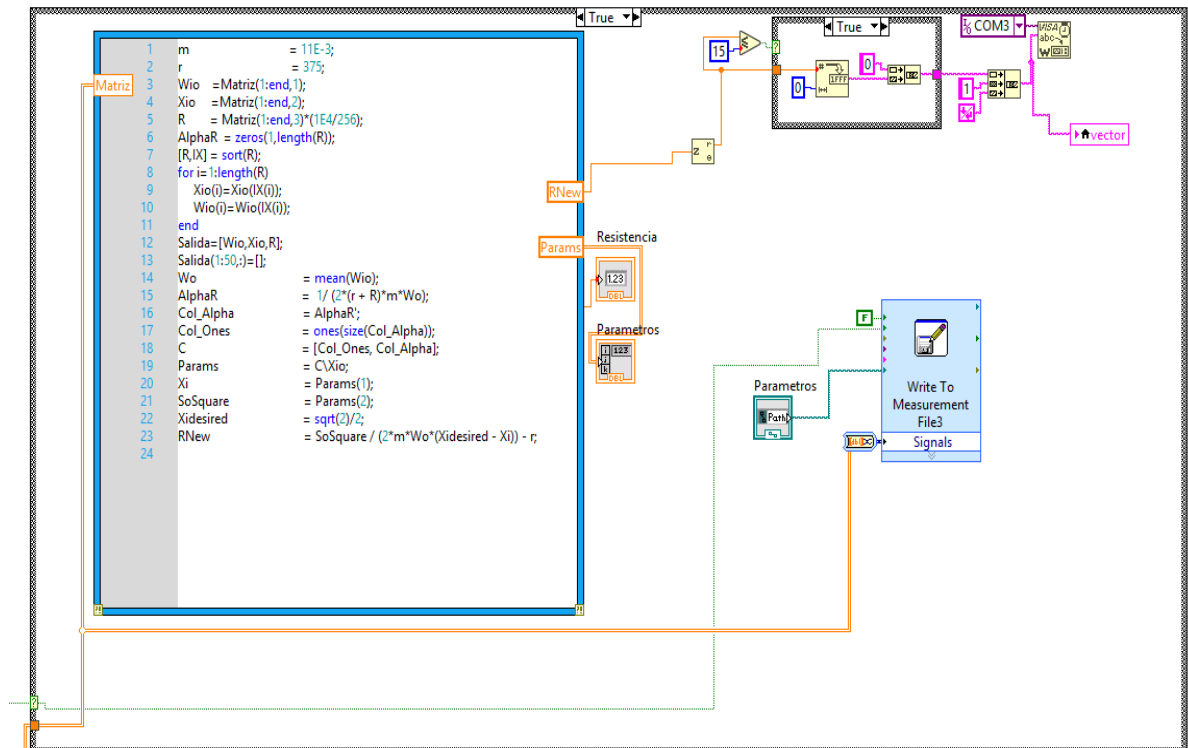


Figura 37: Calculo de la resistencia de carga a partir de los parámetros y variables obtenidas de la lectura.

Fuente Propia.

#### **4.4.2 Casos para el Ajuste del Sensor**

Para los datos censados se guardan en un vector de 250 posiciones; se definen los casos planteados en la programación de Psoc, donde se configura el sensor para que registre los datos de forma independiente; una de lectura normal, otra con la variación de la resistencia de 0 a  $10.000\Omega$  que ayuda a determinar el valor que ajusta el geófono y finalmente con resistencia de carga que se acerca al damping en un valor deseado para realizar una comparación entre un geófono ajustado y otro sin ajustar.

#### **4.4.3 Determinación de la Resistencia de Carga para el Ajuste**

Comienza con el caso donde se varía la resistencia, se inicia la estimación de la resistencia de ajuste haciendo uso de los parámetros físicos del geófono ecuaciones 40 - 43; se desarrolla la identificación por mínimos cuadrados aplicando una regresión y una pseudo inversa descrita ecuaciones 48 - 54, con las variables encontradas se determina la resistencia de carga de ajuste ecuación 59 - 64 del modelo matemático capítulo III (ver figura 37), este valor se envía a la Psoc para que a su vez ajuste el potenciómetro digital y efectúe una calibración automática.

#### **4.4.4 Toma de Muestras con el Sensor Ajustado**

Después de encontrar la resistencia de carga y establecer el potenciómetro digital con este valor, se toman los datos de 250 pruebas de la misma manera que se efectuaron anteriormente para hacer la comparación entre un sensor ajustado y otro sin ajustar.

Una vez obtenidos los datos se busca analizar la forma como con el ajuste de los parámetros del sensor pueden determinar un valor de resistencia externa que ayude a su ajuste con un damping cercano a 0.707; para esto se hace uso de Matlab que nos ayude con el cálculo de los valores de las variables descritas en el modelo matemático del geófono, además de graficar las señales de los valores obtenidos, verificando la similitud entre la señal censada y la obtenida por el modelo.

#### 4.4.5 Visualización

La (figura 38) muestra el comportamiento del geófono frente a la variación de la resistencia; donde se puede observar que la amplitud va decreciendo con el paso del tiempo y el coeficiente de amortiguamiento cambia en relación con la carga externa; de esta manera se puede visualizar si se está efectuando el censo de forma correcta.

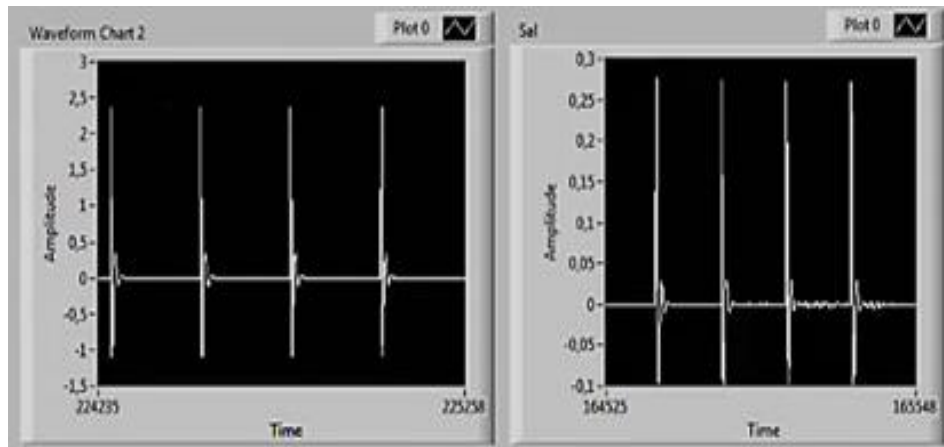


Figura 38: visualización.

Fuente Propia.

Una vez obtenidos los datos se busca analizar la forma como el ajuste de los parámetros del sensor puede determinar un valor de resistencia externa que ayude a determinar un damping cercano a 0.707; para esto se hace uso de Matlab que efectúa el cálculo de los valores de las variables descritas en el modelo matemático del geófono, además de graficar las señales de los valores obtenidos, verificando la similitud entre la señal censada y la obtenida por el modelo.

#### 4.5 Implementación en Matlab

Para la identificación y ajuste de algunos de los parámetros del sensor sísmico se utilizó el software Matlab 2013a; donde se desarrollaron funciones que ayudan a la identificación del sensor, así como el ajuste de su resistencia que permita

acondicionar el coeficiente de amortiguamiento (damping) dentro de un rango deseado; se realizaron a partir del modelo matemático descrito en el capítulo III utilizado por LabVIEW; la caracterización, cálculo de resistencia y el ajuste del coeficiente de amortiguamiento, entre las funciones tenemos regresión o modelo ARX, obtención de parámetros del geófono y la gráfica de los datos obtenidos para su observación y análisis.

#### **4.5.1 Modelo ARX**

En el modelo ARX se estiman los coeficientes  $a_1$  y  $a_2$  de la ecuación (35) del capítulo 3 del modelo matemático que determina una variable identificable, es decir la curva calculada con la identificación a partir de los datos obtenidos. El programa entrega el valor de los coeficientes medidos y los calculados mediante el modelo de identificación. Este algoritmo se puede evidenciar en el Anexo I.

#### **4.5.2 Parámetros del Geófono**

La función determina los parámetros del sensor hallando la parte real y la imaginaria calculadas a partir de las ecuaciones (15) y (16), se halla la frecuencia natural en la ecuación (17) y el coeficiente de amortiguamiento en la ecuación (24) descritas en modelo matemático del capítulo III. Este algoritmo se puede evidenciar en el Anexo H.

#### **4.5.3 Cálculo de la resistencia de carga**

A partir de los valores obtenidos con de la identificación basado en el método de mínimos cuadrados, se desarrolla un programa en Matlab para calcular la resistencia de carga estimada en el modelo matemático ecuación (65) que incluye la utilización de las funciones de modelo ARX y parámetros del sensor. Este algoritmo se puede evidenciar en el Anexo F.

#### **4.5.4 Análisis de Datos**

Con los datos obtenidos del comportamiento de sensor por medio de la tarjeta de adquisición y ajuste de coeficiente de amortiguamiento se procede a graficar los valores almacenados por LabVIEW para establecer una comparación entre los datos medidos por el sistema y los calculados mediante el método de regresión; se grafica cada parámetro en función de la resistencia de carga y se imprimen los valores para tener un damping de 0.707. En el programa se utilizan todas las funciones desarrolladas en Matlab. Este algoritmo se puede evidenciar en el Anexo G.

#### **4.5.5 Coeficiente de Amortiguamiento con Resistencia de Carga**

Se ajusta el geófono con resistencia de carga y se almacenan los datos del comportamiento del sensor, se grafican cada una de las pruebas para determinar el valor del damping (coeficiente de amortiguamiento) y se calcula la media para determinar la respuesta del geófono después de ser ajustado con ayuda de las funciones realizadas en Matlab. Este algoritmo se puede evidenciar en el Anexo G.

## 5 CAPÍTULO V: ANALISIS Y RESULTADOS.

Para analizar la respuesta de los parámetros del geófono, la disposición después de su ajuste y el nivel del sistema de identificación con respecto a la prueba desarrollada se observó la actuación del sistema frente a una excitación (impulso) con una resistencia de carga de  $10k\Omega$  sobre todo su rango; para esto se desarrollaron cinco pruebas en diferentes lugares con el fin de probar el sistema de ajuste automático con resistencia de carga externa, para hacer la comparación entre un geófono ajustado y otro sin ajustar.

Las pruebas se toman en lugares donde hay vibración del suelo o cuando se induce de forma externa; el estudio se efectuó en un puente vehicular, en una vía en reparación que utiliza un pisón saltarín de compactación, en un lugar donde se induce una explosión, dejando caer un objeto y el comportamiento en una falla geológica.

### 5.1 Procedimiento general de las pruebas

A continuación, se presenta el procedimiento en el cual se efectúan las pruebas con el sistema de adquisición desarrollado:

- Se conecta la tarjeta al computador portátil y se ubica el sensor.
- Se Verificación la conectividad.
- Se abren el programa de labview para la adquisición de la señal.
- Se direcciona el archivo hacia la carpeta donde se guardan los datos leídos.
- Se ejecuta el caso del sensor sin ajustar con la variación de la resistencia de  $10k\Omega$ .
- Se selecciona el caso de ajuste del sensor con la resistencia estimada.
- Se toman nuevamente los datos con el sensor ya ajustado.

## 5.2 Experimento puente

La prueba del puente se realizó en la carrera 7 entre la calle 1 y 1a centro de la ciudad de Popayán, entre las 12 y 1pm hora pico donde hay mayor flujo vehicular ver figura 39, se utilizó un computador portátil, tarjeta de adquisición y ajuste, geófono y cable de conexión. El experimento se desarrolló con el fin de sensar las vibraciones emitidas por los vehículos, ubicando el geófono sobre el puente; haciendo un procesamiento de señal por medio de algoritmos que ayudan a efectuar una mejor caracterización y ajuste. Es de tener en cuenta que las pruebas se repitieron 6 veces bajo condiciones similares donde el resultados de sus parámetros estudiados se ven registrados en la (tabla 3). Para verificar si el dispositivo cumple con el objetivo propuesto donde se grafica el experimento uno en el trabajo principal y los restantes se pueden evidenciar en anexos A.

Las graficas estan integradas por:

- Una lectura de la señal para observar la vibración captada por el sensor sin ajustar y ajustado.
- Comportamiento del sensor sin ajustar frente a la variación de una resistencia externa.
- Variación del damping y frecuencia natural con el sensor ajustado y resistencia de carga que lo ubica en un coeficiente de amortiguamiento cercano a 0.707 en 250 pruebas que se repiten dentro de un experimento.
- Porcentaje de ajuste en el experimento.





Figura 39: prueba puente carrera 7 entre calle 1y 1<sup>a</sup>.

### 5.2.1 Análisis de la prueba

En principio se gráfico la lectura arrojada por el sensor sin ajustar a través de Matlab, para observar si el geófono está realizando la toma de muestra de forma correcta. La figura 40 muestra las vibraciones producidas por el paso de vehiculos de distinto tamaño y velocidad, con un periodo de muestreo de 1ms; donde la amplitud de la vibración está expresada en voltaje (v).

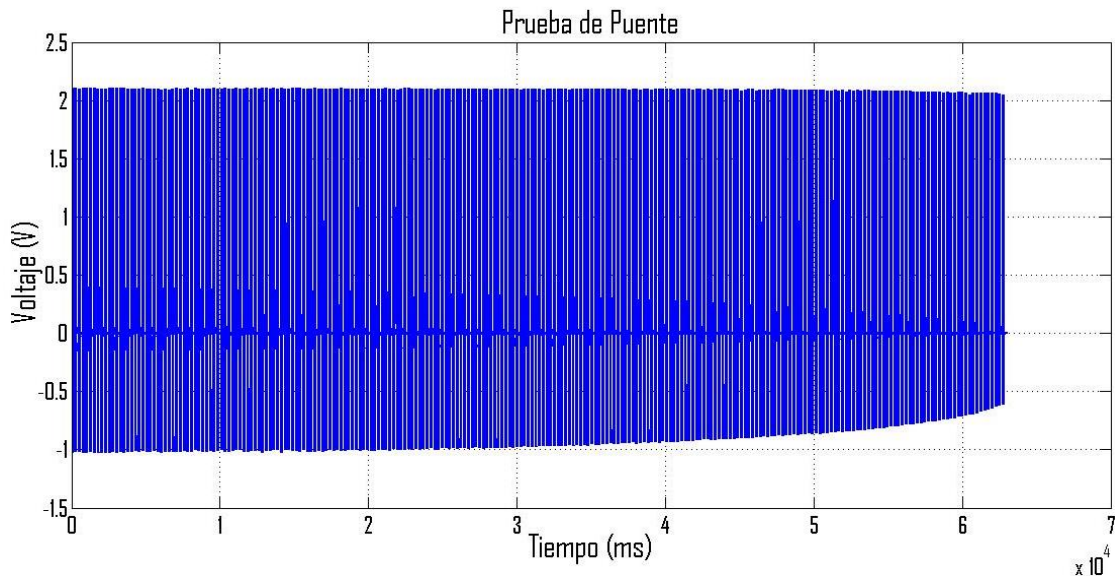


Figura 40: lectura experimento puente sin ajuste

Fuente Propia.

Para tener una mejor apreciación del evento se debe hacer uso de la herramienta zoom de Matlab; debido a la cantidad de datos tomados que no permiten observar en detalle este suceso ver figura 41.

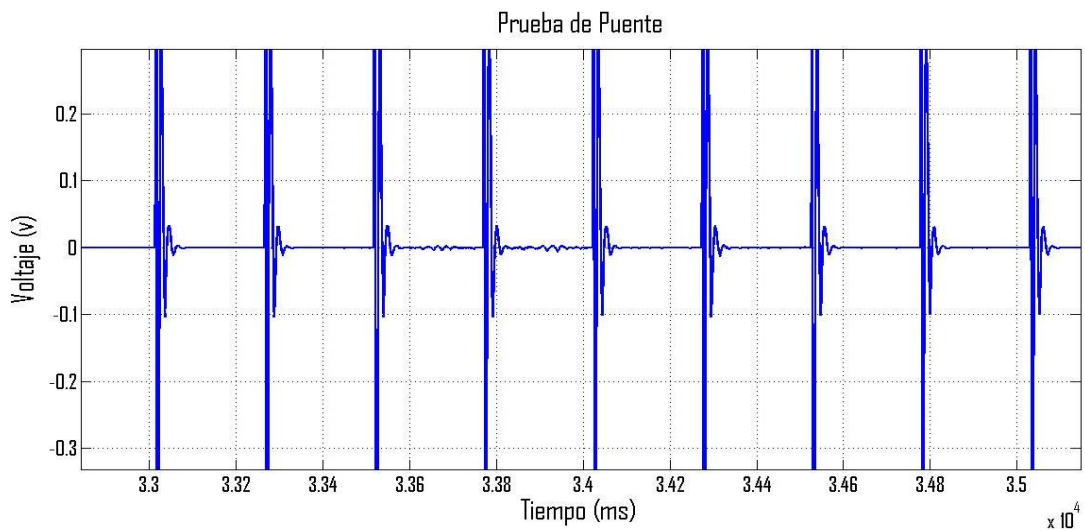


Figura 41: Lectura experimento puente sin ajuste ampliada

Fuente Propia.

En la figura 42 se evidencia la lectura del geófono ajustado frente a las vibraciones del puente ocasionadas por el paso de vehículos. Es de tener en cuenta que el sensor sísmico esté calibrado garantiza una mejor lectura de los datos obtenidos más no significa que disminuya la amplitud de la señal, pues esta depende de la intensidad de la vibración producida por el evento.

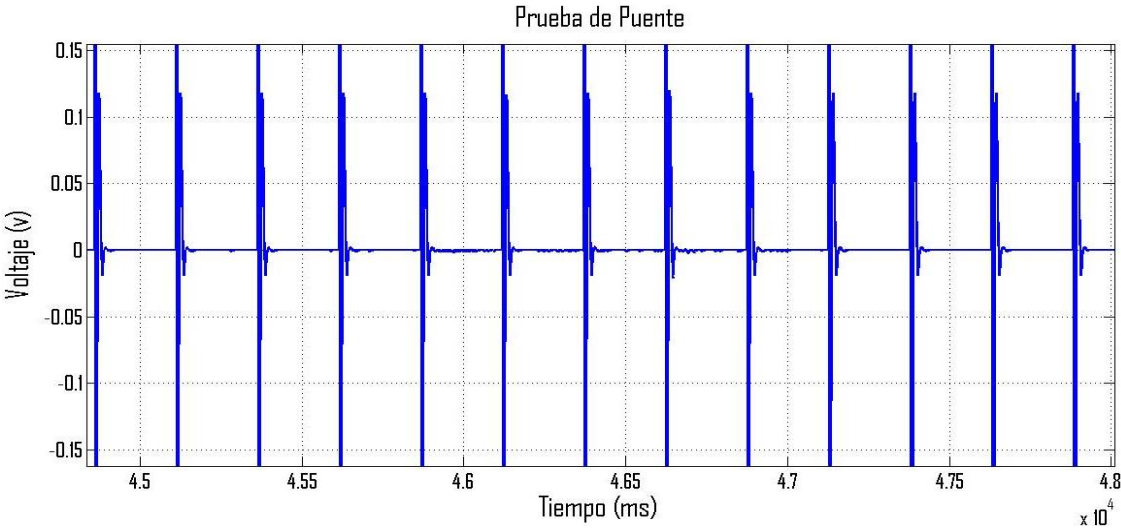


Figura 42: Lectura experimento puente ampliada geofono ajustado

Fuente Propia.

En la figura 43 muestra el comportamiento del damping y la frecuencia natural a medida que la resistencia de carga tiende a su valor máximo de 10 K $\Omega$ ; los valores obtenidos por el algoritmo de identificación muestran las vibraciones que se registran en un puente cuando transitan diferentes vehículos. En esta imagen se puede determinar que el coeficiente de amortiguamiento relativo no está ajustado, debido a que está por debajo de 0.707.

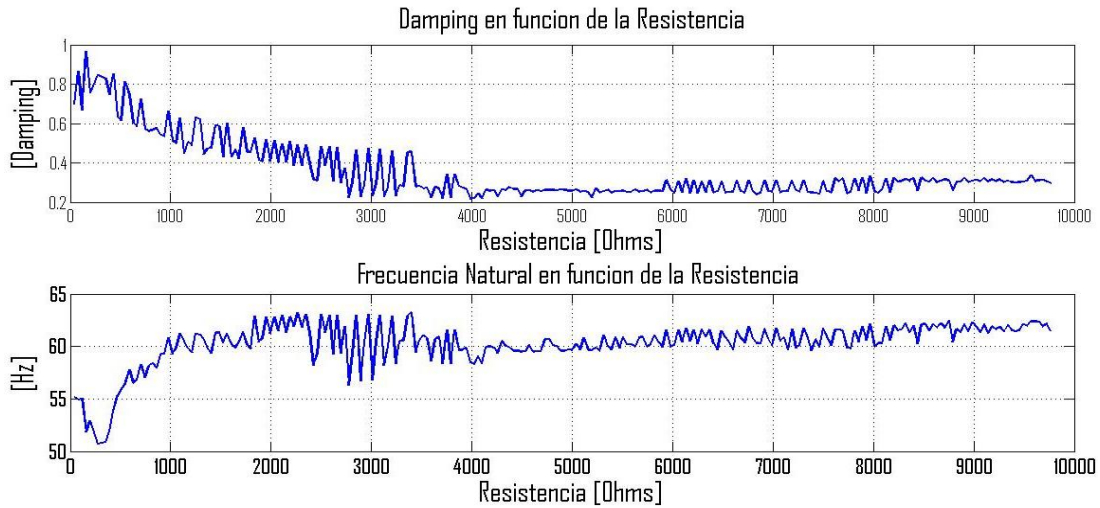


Figura 43: Damping y frecuencia natural en función de la resistencia de 10kΩ.

Fuente Propia.

La figura 44 muestra una variación del coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia natural en cada una de las muestras esto se debe a que el sensor se ve afectado por el ruido ambiental existente en el medio y las vibraciones que se generan con el paso de vehículos de diferente peso y velocidad, el algoritmo trata de compensar dichas variaciones al ajustar de manera continua la resistencia de carga, sin embargo, la media del damping calculado es de 0.7401 (tabla 3); para casos relacionados el fabricante establece una tolerancia del 5 %, la medida de los parámetros del instrumento permite observar que las compensaciones hechas por el algoritmo están dentro de los valores establecidos. En el ajuste se estimó una resistencia calculada con la ecuación (65), donde el promedio de resistencia es 374.84Ω (tabla 3).

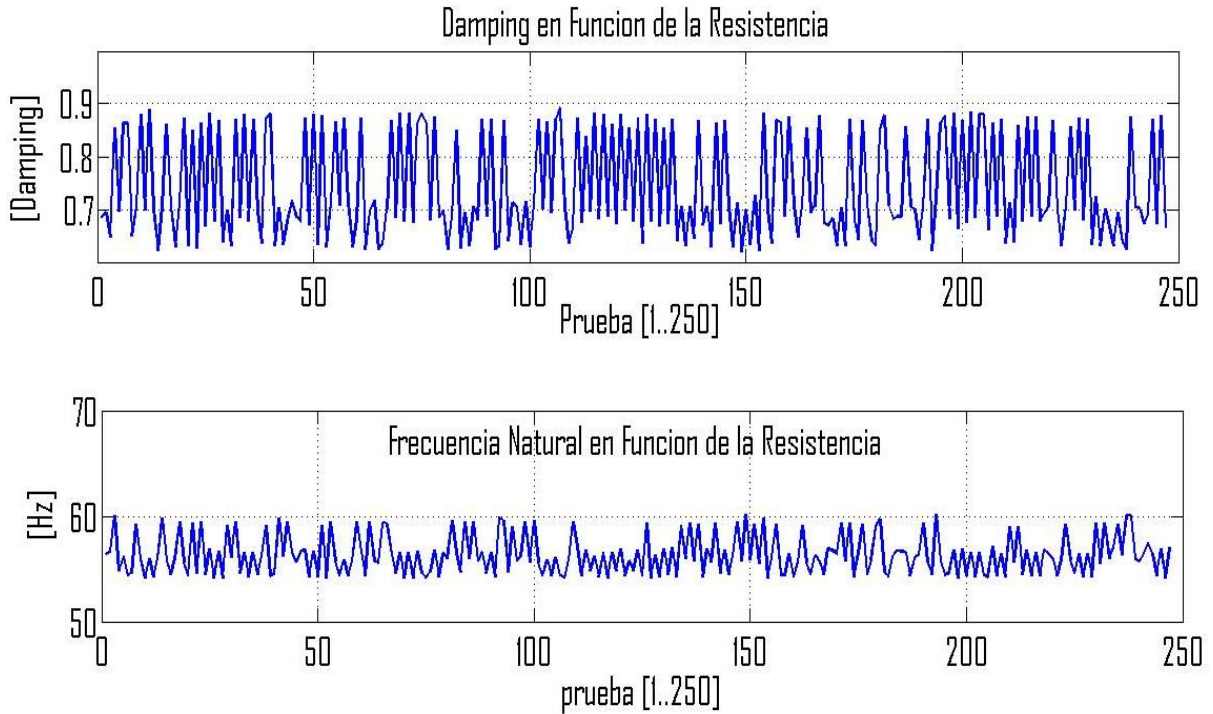


Figura 44: Variación del damping y Frecuencia Natural en 250 pruebas.

Fuente Propia.

La figura 45 muestra el porcentaje de confiabilidad con un promedio de 93.6185% (tabla 3), lo que demuestra una fiabilidad muy alta en la identificación del modelo, esto permite determinar una buena estimación de la resistencia de carga para alcanzar un damping de 0.707; también se puede evidenciar el cambio que se presenta cuando un vehículo de carga pesada pasa por el puente ocasionando la disminución del porcentaje de ajuste, el sistema logra compensar este evento y regresa a un ajuste.

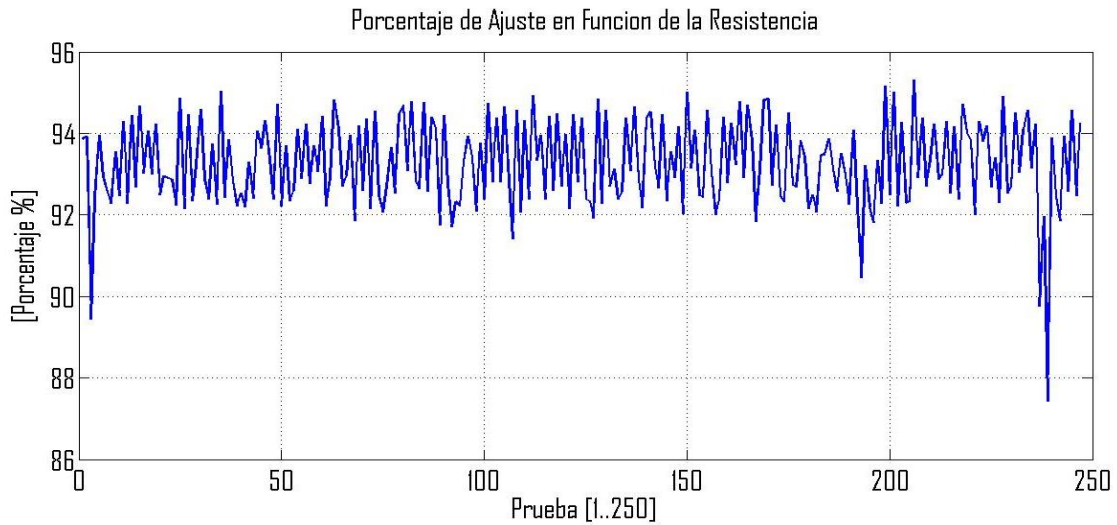


Figura 45: Porcentaje de ajuste en 250 pruebas

Fuente Propia.

Numero de prueba	Resistencia calculada por el sistema $\Omega$	Damping promedio	Frecuencia Natural promedio	Porcentaje de ajuste promedio
1	374.84	0.7401	56.3179	93.6185
2	372.18	0.7305	58.8029	92.4737
3	370.39	0.7248	56.5454	94.5463
4	366.52	0.7282	57.1611	93.4123
5	336.02	0.6822	54.3612	92.8126
6	372.57	0.7423	60.1482	93.541

Tabla 3: Valores prueba Puente.

Fuente Propia

### 5.3 Experimento Saltarín

El experimento se desarrolló en la calle 1ª entre carrera 3ª y 2ª donde estaban efectuando trabajo en vía, ubicando el sensor en la carcasa para mayor captación

a una distancia aproximada de 2 metros ver figura 46 – 47, en el estudio se utilizó un computador portátil, tarjeta de adquisición y ajuste, geófono y cable de conexión. El experimento se desarrolló con el fin de censar las vibraciones emitidas por el saltarín; la distancia aproximada que se desplaza el compactador es de 3 metros; la señal es procesada por medio de algoritmos que ayudan a efectuar una mejor caracterización y ajuste. Es de tener en cuenta que las pruebas se repitieron 6 veces bajo condiciones similares donde el resultado de sus parámetros promedio estudiados se ven registrados en la (tabla 5 y 6). Para verificar si el dispositivo cumple con el objetivo propuesto donde se grafica el experimento uno en el trabajo principal y los restantes se pueden evidenciar en anexos B.

Las graficas estan integradas por:

- Una lectura de la señal para observar la vibración captada por el sensor sin ajustar y ajustado.
- Comportamiento del sensor sin ajustar frente a la variación de una resistencia externa.
- Variación del damping y frecuencia natural con el sensor ajustado y resistencia de carga que lo ubica en un coeficiente de amortiguamiento cercano a 0.707, en 250 pruebas que se repiten dentro de un experimento. La señal obtenida es segmentada en intervalos de 20 pruebas ver (tabla 5 y 6), donde se agrupan los experimentos por su similitud de acuerdo a la vibración captada debido al recorrido que efectúa el operario que manipula la herramienta de compactación.
- Porcentaje de ajuste en el experimento.



Figura 46: prueba pisón saltarín calle 1ª entre carrera 3ª y 2ª.



Figura 47: prueba pisón saltarín calle 1ª entre carrera 3ª y 2ª



### 5.3.1 Análisis de la prueba

En principio se gráfico la lectura arrojada por el sensor sin ajustar a través de Matlab, para observar si el geófono está realizando la toma de muestra de forma correcta. La figura 48 muestra las vibraciones producidas por el saltarin de compactación de distinto tamaño y velocidad, con un periodo de muestreo de 1ms; donde la amplitud de la vibración está expresada en voltaje (v).

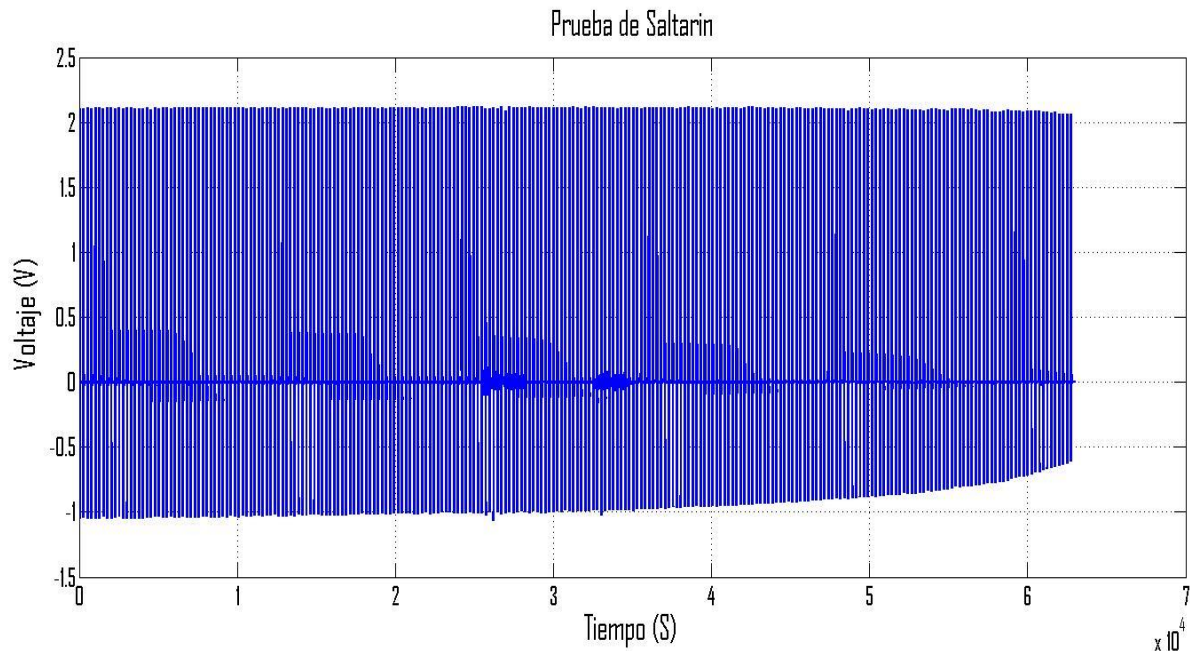


Figura 48:Lectura experimento saltarin sin ajuste

Fuente Propia.

Para tener una mejor apreciación del evento se debe hacer uso de la herramienta zoom de Matlab; debido a la cantidad de datos tomados que no permiten observar en detalle este suceso ver figura 49.

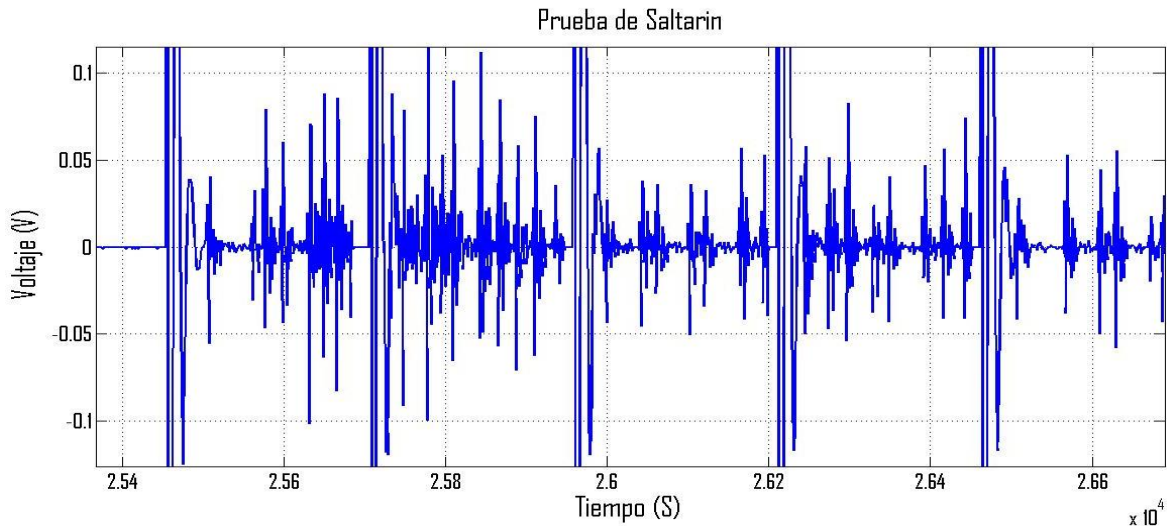


Figura 49: Lectura experimento saltarin sin ajuste ampliada.

Fuente Propia.

En la figura 50 se evidencia la lectura del geófono ajustado frente a las vibraciones ocasionadas por el uso del compactador. Es de tener en cuenta que el sensor sísmico esté calibrado garantiza una mejor lectura de los datos obtenidos más no significa que disminuya la amplitud de la señal, pues esta depende de la intensidad de la vibración producida por el evento.

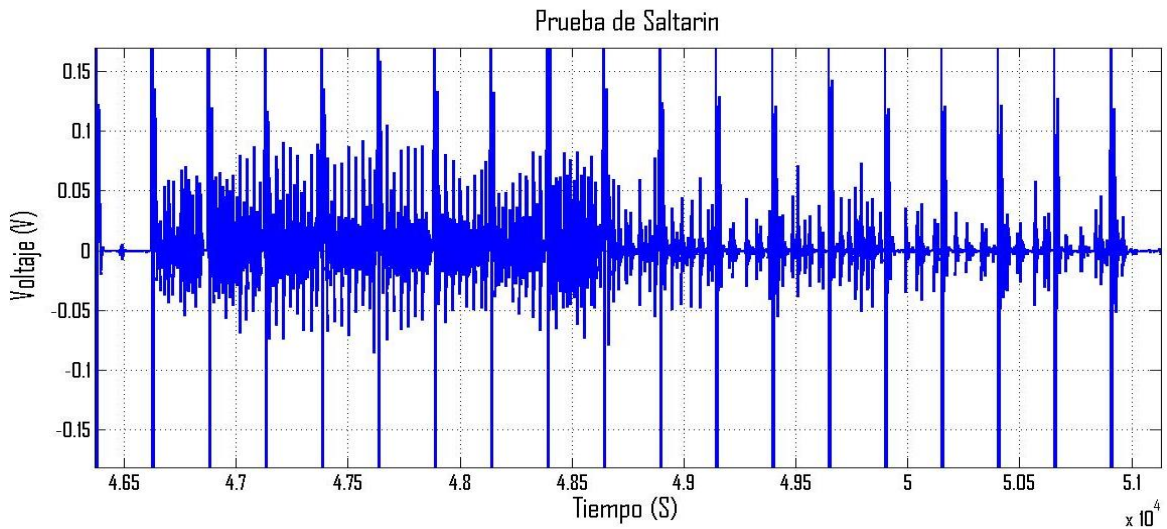


Figura 50: Lectura ampliada geofono ajustado experimento saltarin.

Fuente Propia.

La figura 51 muestra la variación de los parámetros de damping y frecuencia natural con relación a una resistencia de carga hasta llegar a su valor máximo de 10kΩ. Los valores obtenidos por el algoritmo de identificación describen la variación del damping y frecuencia natural, cuando aumenta la intensidad de las vibraciones por la presencia de rocas que hacen que la presión se concentre en un solo lugar con más fuerza, la amplitud de la vibración de las rocas será mayor que la amplitud de la fuente de vibración debido a una condición conocida como resonancia. En esta imagen se puede determinar que el coeficiente de amortiguamiento relativo no está ajustado, debido a que está por debajo de 0.707.

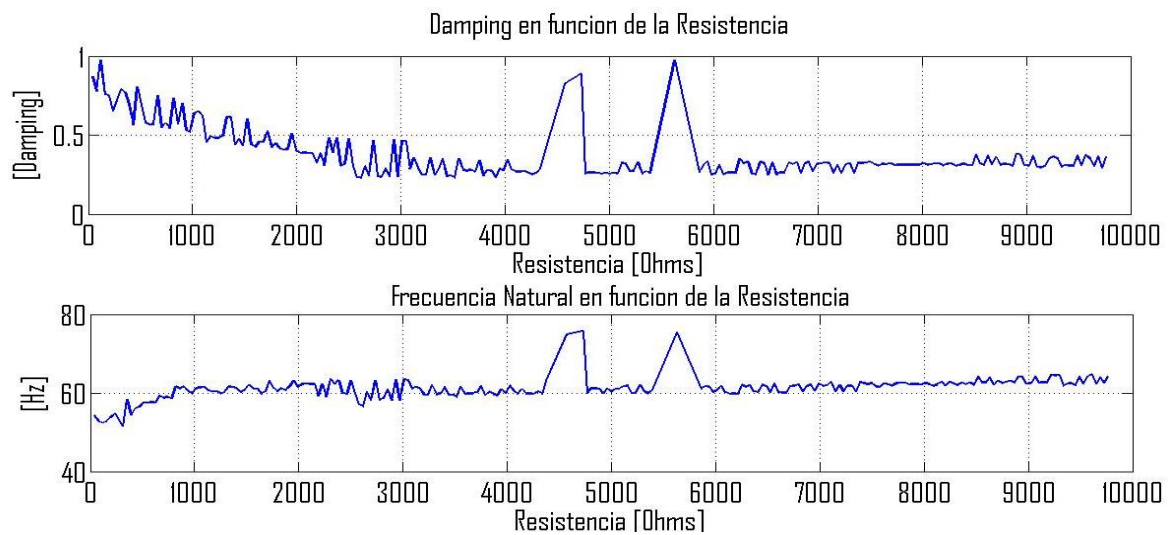


Figura 51: Variación del damping y Frecuencia natural

Fuente Propia.

La figura 52 muestra una variación del coeficiente de amortiguamiento y frecuencia natural en cada una de las muestras, esto se debe a que el sensor se ve afectado por el ruido ambiental existente en el medio, las vibraciones generadas por el pisón y el aumento de presión por presencia de rocas, el algoritmo trata de compensar dichas variaciones al ajustar de manera continua la resistencia de carga, sin embargo, la media del damping calculado es de 0 (tabla 4); para casos relacionados el fabricante establece una tolerancia del 5 %, la medida de los parámetros del instrumento permite observar que las compensaciones hechas por el algoritmo están dentro de los valores establecidos. En el ajuste se estimó una resistencia

calculada con la ecuación (65), donde el promedio de resistencia es  $335.93 \Omega$  ver (tabla 4).

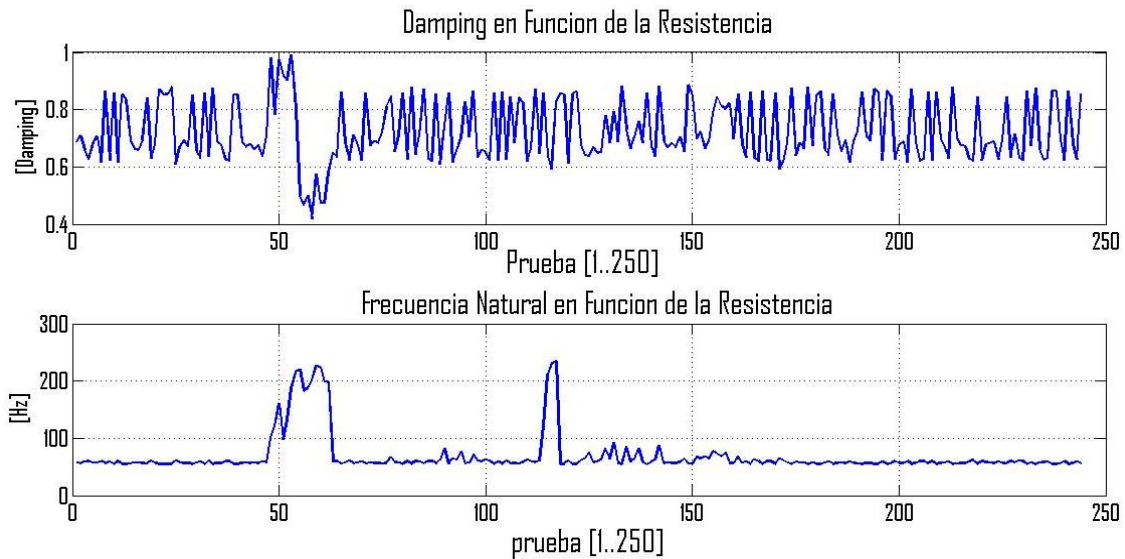


Figura 52: Variación del Damping y frecuencia natural

Fuente Propia.

La figura 53 muestra el porcentaje de confiabilidad de 93.8227% (tabla 4), lo que demuestra una fiabilidad muy alta en la identificación del modelo, esto permite determinar una buena estimación de la resistencia de carga para alcanzar un damping de 0.707; también se puede evidenciar el cambio que se presenta cuando aumenta la intensidad de las vibraciones por la presencia de rocas que hacen que la presión se concentre en un solo lugar con más fuerza, la amplitud de la vibración de las rocas ocasionando la disminución del porcentaje de ajuste, el sistema logra compensar este evento y regresa a un ajuste.

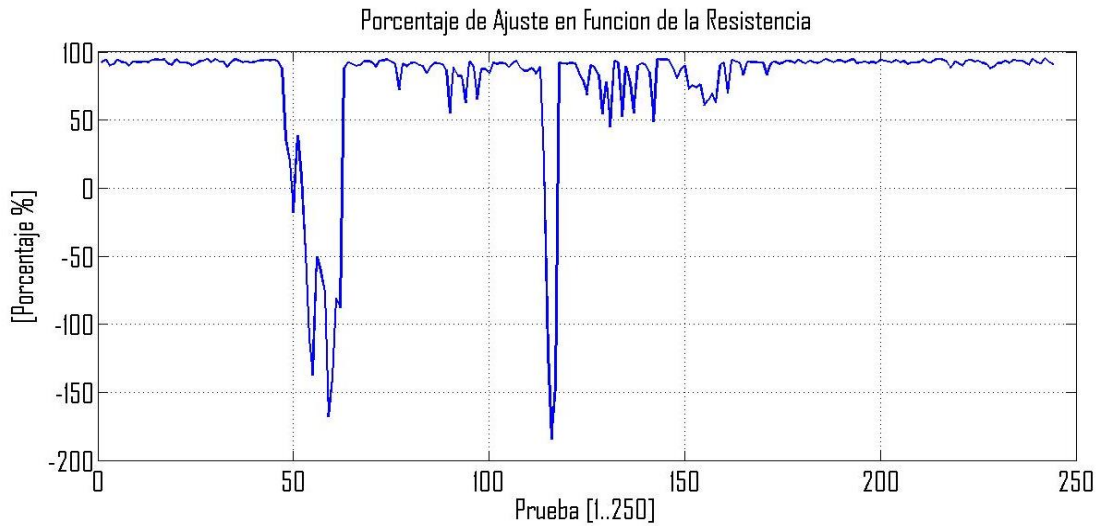


Figura 53: Porcentaje de ajuste en 250 pruebas.

Fuente Propia.

<b><i>Resistencia promedio (R)</i></b>	<b><i>Damping promedio</i></b>	<b>Porcentaje de Ajuste</b>
335.93 $\Omega$	0.7218	93.8227

Tabla 4: Valores prueba Saltarín.

Fuente Propia

<b>intervalo</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Damping</b>
T1	5185 $\Omega$	118.96 Hz	0.3456
T2	54686 $\Omega$	97.27 Hz	0.3374
T3	4674 $\Omega$	96.25 Hz	0.3224

Tabla 5: Valores promedios prueba Saltarín geofono sin ajustar.

Fuente Propia

intervalo	Resistencia	Frecuencia	Damping
T1	169.27 $\Omega$	66.436 Hz	0.70119
T2	189.64 $\Omega$	67.71 Hz	0.7136
T3	157.57 $\Omega$	70.51Hz	0.7250

Tabla 6:Valores promedios prueba Saltarín geofono ajustado.

Fuente Propia

#### 5.4 Experimento Pólvora

El experimento se efectuó una sola vez por no contar con los elementos y permisos necesarios. La prueba se desarrolla vía el cerro de las tres cruces utilizando 15 gramos de pólvora enterrada a 15 cm para cada caso, con el fin de generar vibraciones; para tener una buena captación de las ondas, el sensor se enterró a 10 cm aproximadamente a una distancia de 2 metros del explosivo ver figura 54, luego se enciende la mecha para que efectúe la explosión.

Esta prueba se efectuó para los dos casos (geófono sin ajustar y ajustado) bajo condiciones similares donde el resultados de sus parámetros se ven registrados en la (tabla 7), verificando si el dispositivo cumple con el objetivo propuesto, donde el resultado es graficado.

Las graficas estan integradas por:

- Una lectura de la señal para observar la vibración captada por el sensor sin ajustar y ajustado.
- Comportamiento del sensor sin ajustar frente a la variación de una resistencia externa.
- variación del damping y frecuencia natural con el sensor ajustado con una resistencia de carga que lo ubica en un

coeficiente de amortiguamiento cercano a 0.707 en 250 pruebas dentro de un experimento.

- Porcentaje de ajuste en el experimento.



Figura 54: prueba explosión

Fuente Propia

#### 5.4.1 Análisis de la prueba

En principio se gráfico la lectura arrojada por el sensor sin ajustar a través de Matlab, para observar si el geófono está realizando la toma de muestra de forma correcta. La figura 55 muestra como la pólvora vibra al ser detonada, con un periodo de muestreo de 1ms; donde la amplitud de la vibración está expresada en voltaje (v).

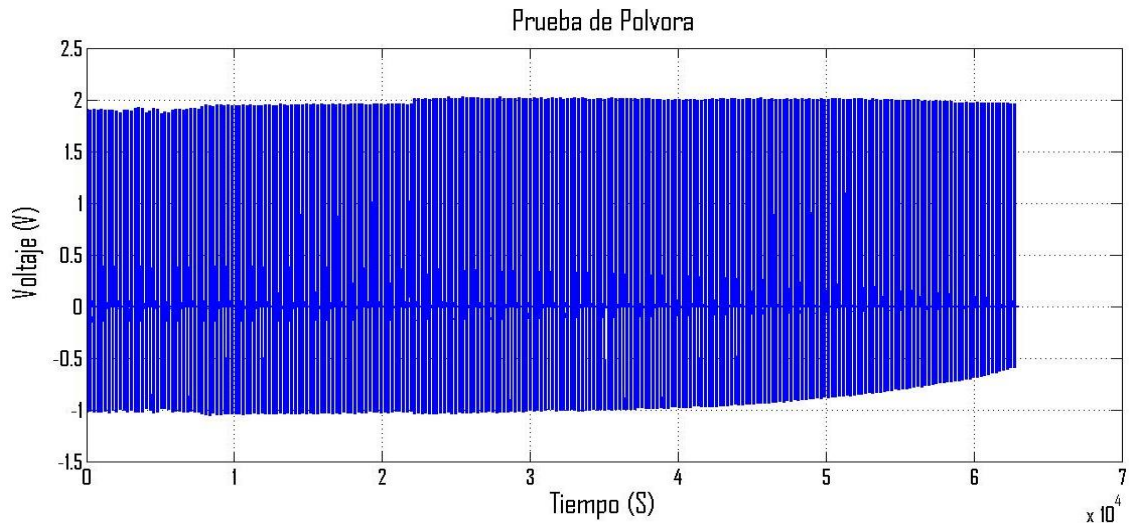


Figura 55: lectura experimento polvora sin ajuste

Fuente Propia.

Para tener una mejor apreciación del evento se debe hacer uso de la herramienta zoom de Matlab; debido a la cantidad de datos tomados que no permiten observar en detalle este suceso ver figura 56.

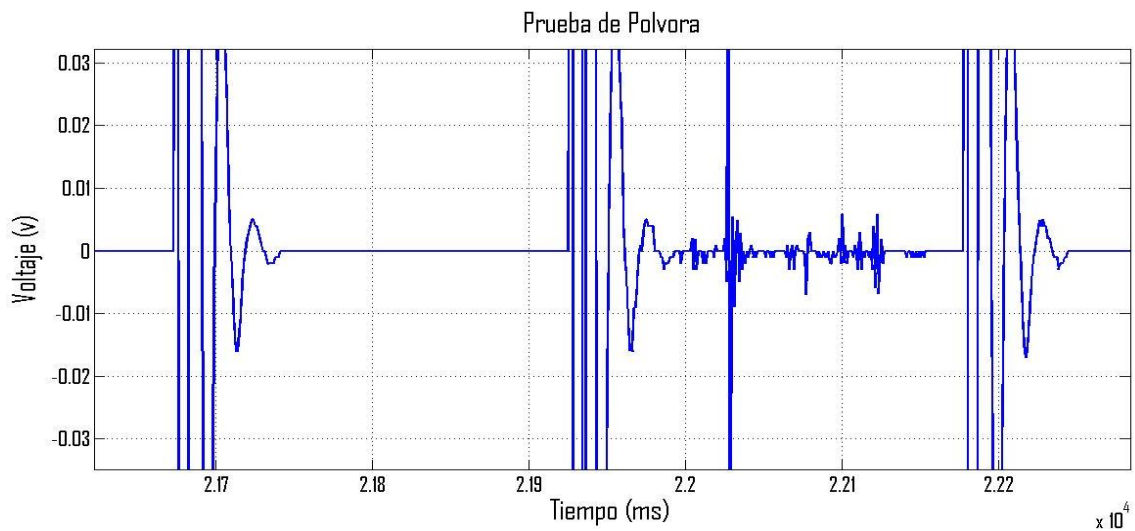


Figura 56: Lectura experimento polvora sin ajuste ampliada

Fuente Propia.

En la figura 57 se evidencia la lectura del geófono ajustado frente a las vibraciones ocasionadas por la detonación. Es de tener en cuenta que el sensor sísmico esté



calibrado garantiza una mejor lectura de los datos obtenidos más no significa que disminuya la amplitud de la señal, pues esta depende de la intensidad de la vibración producida por el evento.

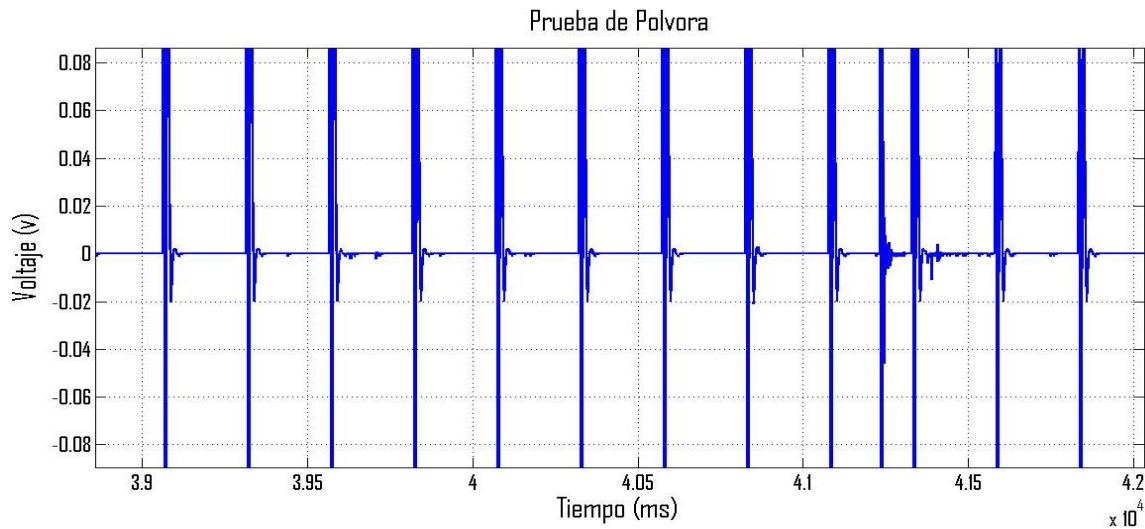


Figura 57: Lectura del geofono ajustado pólvora ampliada

Fuente Propia.

La figura 58 muestra el comportamiento del damping y la frecuencia natural a medida que la resistencia de carga tiende a su valor máximo de 10 K $\Omega$ ; los valores obtenidos por el algoritmo de identificación muestran las vibraciones que se registran en el lugar donde se efectuó la explosión. En esta imagen se puede determinar que el coeficiente de amortiguamiento relativo no está ajustado debido a que está por debajo de 0.707.

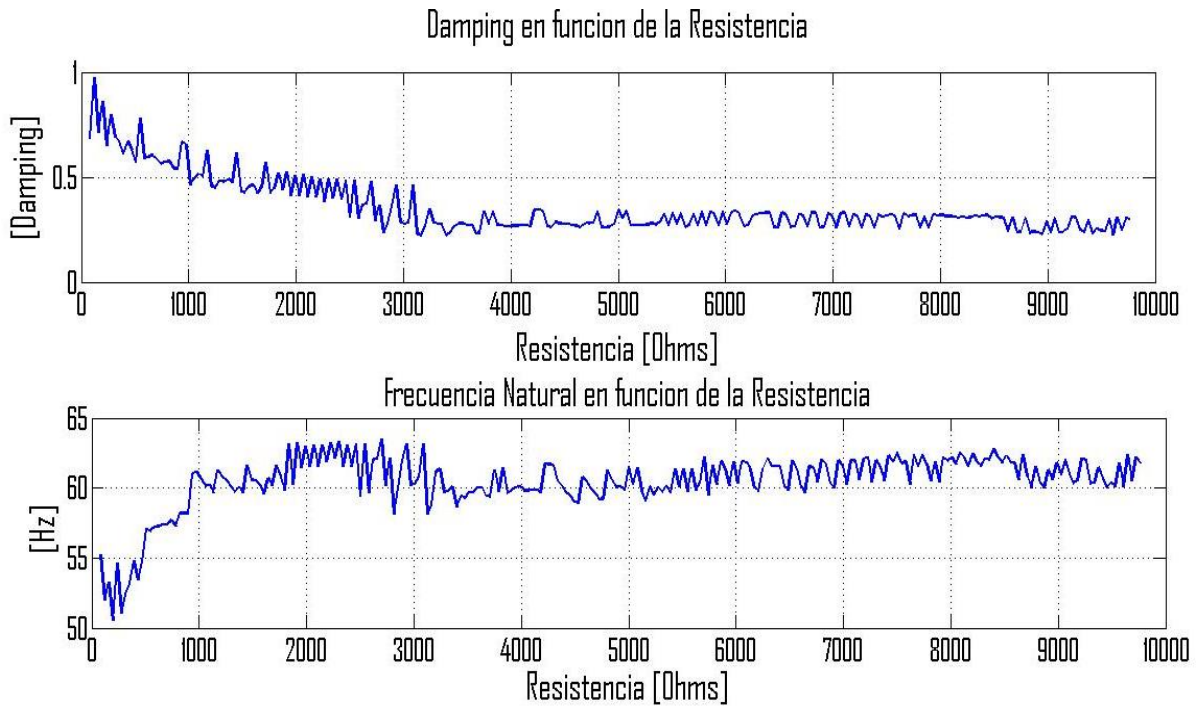


Figura 58: Variación del damping y Frecuencia natural en función de la resistencia de 10k $\Omega$

Fuente Propia.

La figura 59 se observa una variación del coeficiente de amortiguamiento y frecuencia natural en cada una de las muestras esto se debe a que el sensor se ve afectado por el ruido ambiental existente en el medio y las vibraciones que se generan por la explosión de la pólvora, el algoritmo trata de compensar dichas variaciones al ajustar de manera continua la resistencia de carga, sin embargo, la media del damping calculado es de 0.7248 (tabla 7); para casos relacionados el fabricante establece una tolerancia del 5 %, la medida de los parámetros del calculada con la ecuación (65), donde el promedio de resistencia es 335.93  $\Omega$

(tabla7). instrumento permite observar que las compensaciones hechas por el algoritmo están dentro de los valores establecidos.

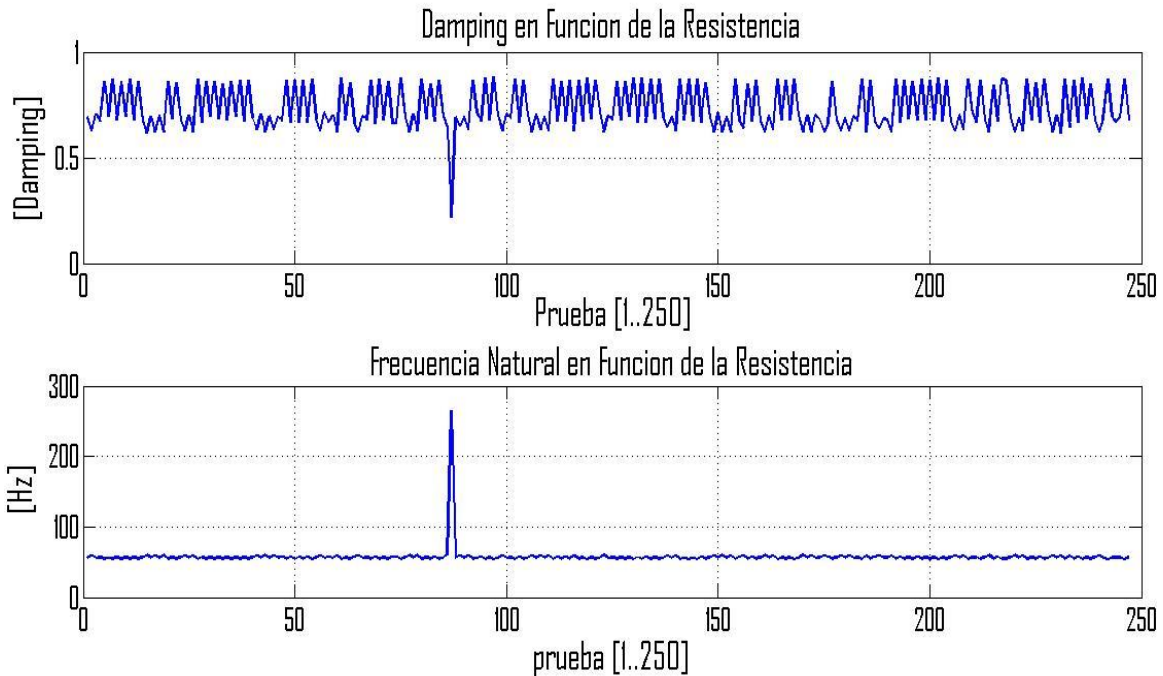


Figura 59: Variación del Damping y frecuencia natural en 250 pruebas.

Fuente Propia.

La figura 60 muestra el porcentaje de confiabilidad con un promedio de 93.4292% (tabla 7), lo que demuestra una fiabilidad muy alta en la identificación del modelo; a pesar que en la prueba 87 se evidencia la explosión que hace disminuir el porcentaje a valores negativos; el algoritmo logra ubicar el porcentaje a su valor anterior mostrando una fiabilidad muy alta en modelo de identificación, esto permite determinar una buena estimación de la resistencia de carga para alcanzar un damping de 0.707.

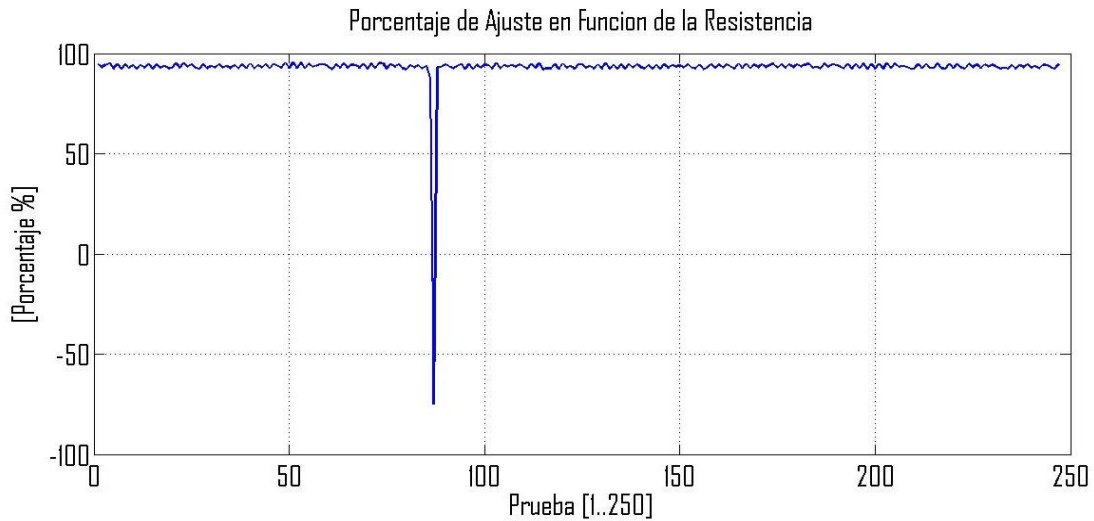


Figura 60: Porcentaje de Ajuste en 250 pruebas

Fuente Propia.

<b><i>Resistencia promedio (R)</i></b>	<b><i>Damping promedio</i></b>	<b>Porcentaje de Ajuste</b>
335.93 $\Omega$	0.7248	93.4292

Tabla 7: Valores prueba Pólvara

Fuente Propia

### 5.5 Experimento Roca de 10 kg

Esta prueba se realizó en un lugar plano y aislado de ruidos, enterrando la carcasa con el sensor en el suelo, donde se dejó caer una piedra de 10kg a una altura de 1.50 metros; el geófono estaba ubicado a 15 cm ver figura 61 del impacto registrando la vibración, de esta forma se repite la prueba 6 veces bajos condiciones similares donde el resultados de sus parámetros se ven registrados en la (tabla 8), para verificar si el dispositivo cumple con el objetivo propuesto donde se grafica el experimento uno en el trabajo principal y los restantes se pueden evidenciar en la parte de anexo C.



Figura 61:prueba Roca 10 kg

Fuente propia

Las graficas estan integradas por:

- Una lectura de la señal para observar la vibración captada por el sensor sin ajustar y ajustado.
- Comportamiento del sensor sin ajustar frente a la variación de una resistencia externa.
- Variación del damping y frecuencia natural con el sensor ajustado y resistencia de carga que lo ubica en un coeficiente de amortiguamiento cercano a 0.707 en 250 pruebas que se repiten dentro de un experimento.
- Porcentaje de ajuste en el experimento.

### 5.5.1 Análisis de la prueba

En principio se gráfico la lectura arrojada por el sensor sin ajustar a través de Matlab, para observar si el geófono está realizando la toma de muestra de forma correcta. La figura 62 muestra la vibración producida al dejar caer la roca, el estudio es tomado con un periodo de muestreo de 1ms; donde la amplitud de la vibración está expresada en voltaje (v).

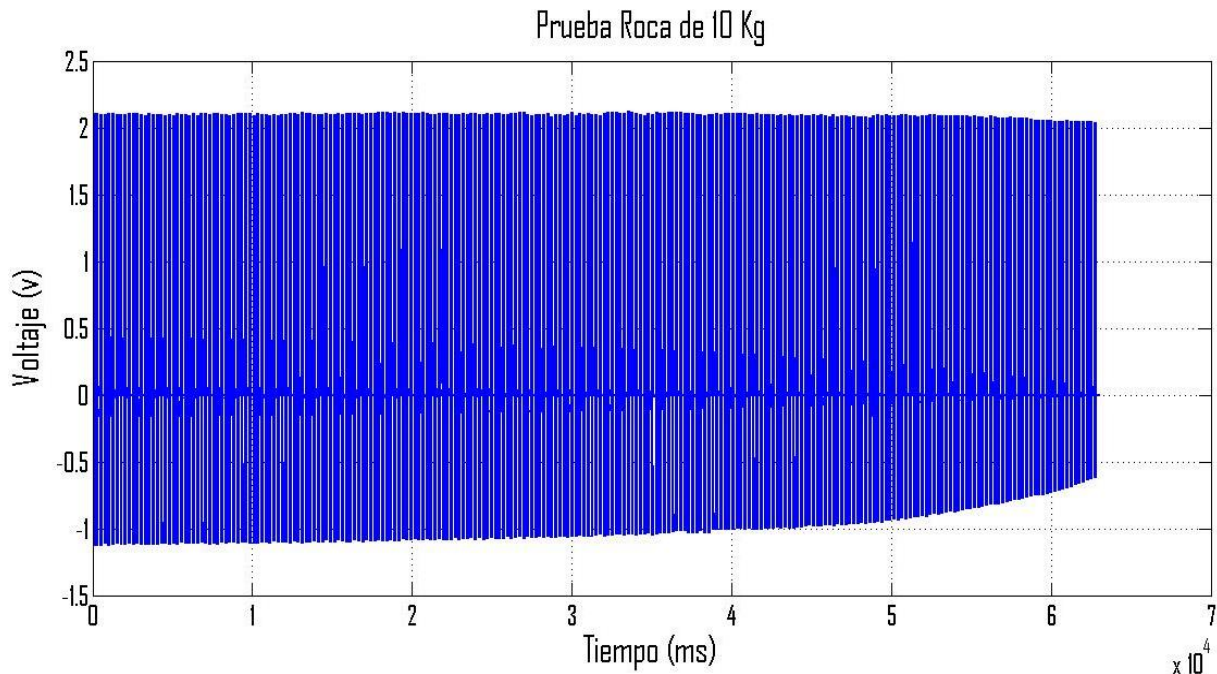


Figura 62: Lectura del geofono sin ajustar experimento roca 10kg

Fuente Propia.

Para tener una mejor apreciación del evento se debe hacer uso de la herramienta zoom de matlab; debido a la cantidad de datos tomados que no permiten observar en detalle este suceso ver figura 63.

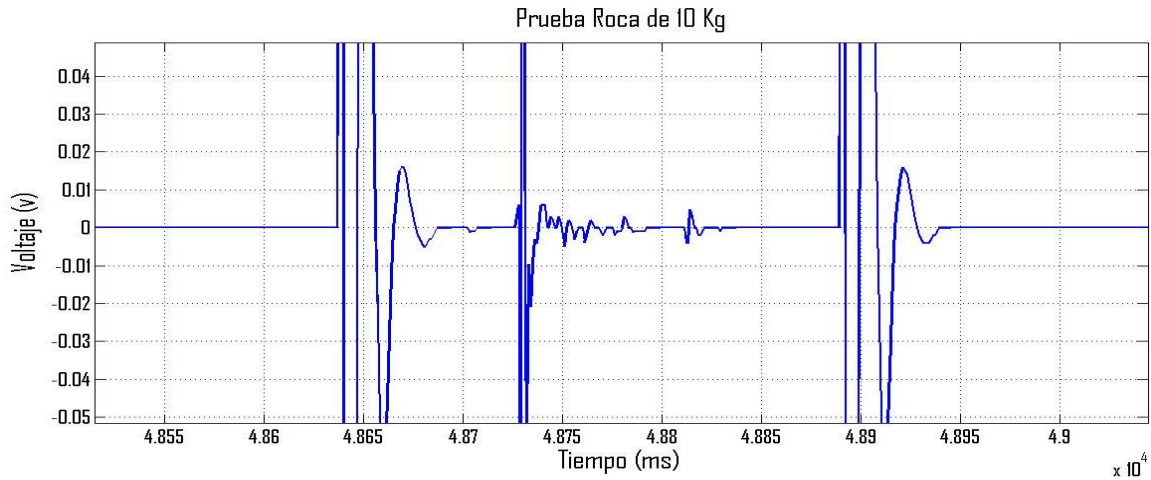


Figura 63: Lectura experimento roca 10kg sin ajuste ampliada

Fuente Propia.

En la figura 64 se evidencia la lectura del geófono ajustado frente a las vibraciones ocasionadas por la colisión de la roca cuando se deja caer. Es de tener en cuenta que el sensor sísmico esté calibrado garantiza una mejor lectura de los datos obtenidos más no significa que disminuya la amplitud de la señal, pues esta depende de la intensidad de la vibración producida por el evento.

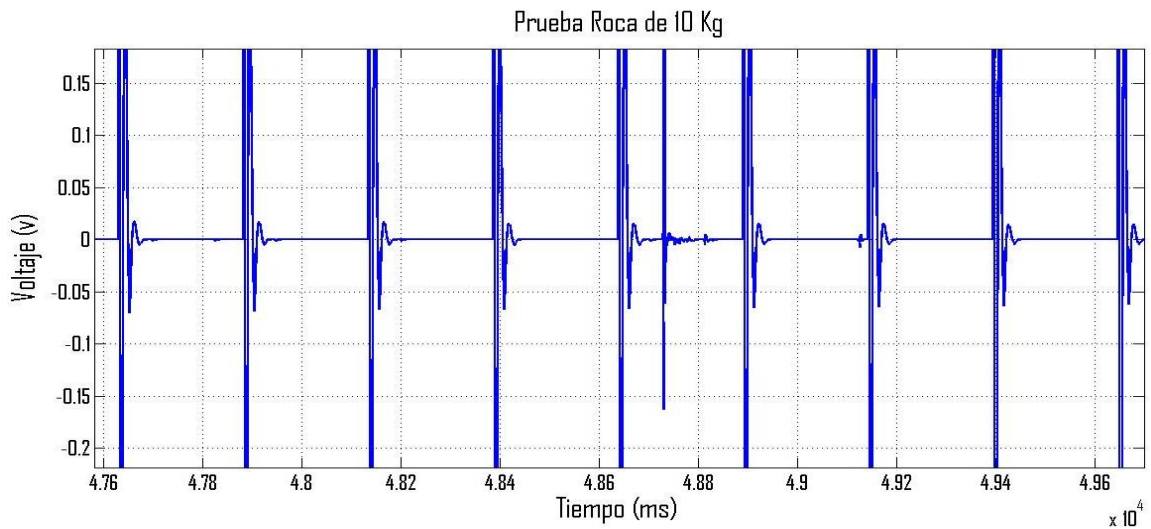


Figura 64: Lectura experimento roca 10kg del geofono ajustado

Fuente Propia.

En la figura 65 se muestra el comportamiento del damping y la frecuencia natural a medida que la resistencia de carga tiende a su valor máximo de 10 K $\Omega$ ; los valores obtenidos por el algoritmo de identificación muestran las vibraciones que se registran cuando se deja un objeto sobre el suelo. En esta imagen se puede determinar que el coeficiente de amortiguamiento relativo no está ajustado, debido a que está por debajo de 0.707.

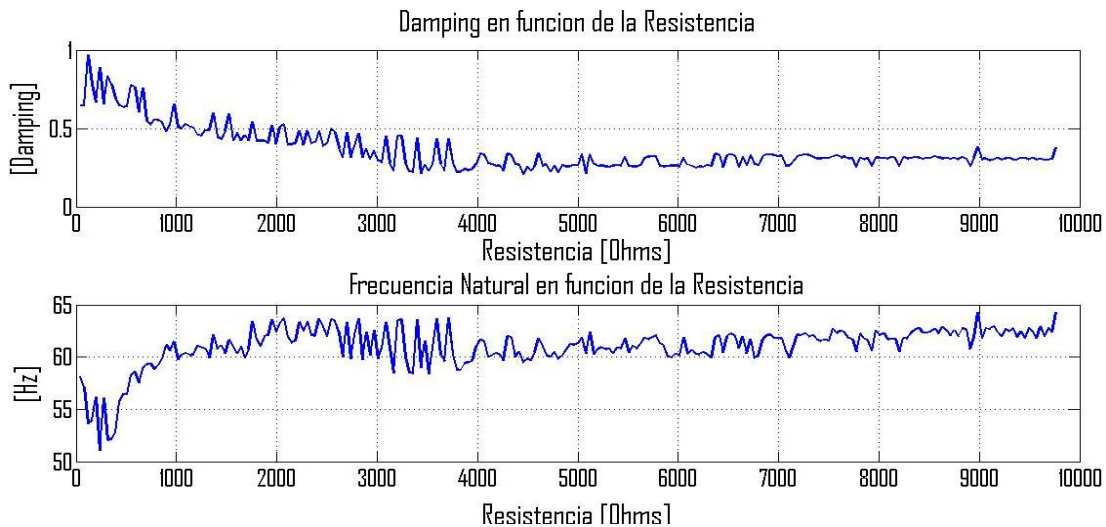


Figura 65: Variación del damping y Frecuencia natural

Fuente Propia.

La figura 66 se observa una variación del coeficiente de amortiguamiento y frecuencia natural en cada una de las muestras, esto se debe a que el sensor se ve afectado por el ruido ambiental existente en el medio y las vibraciones que se generan por la colisión de la roca en el suelo, el algoritmo trata de compensar dichas variaciones al ajustar de manera continua la resistencia de carga, sin embargo, la media del damping calculado es de 0.6995 (tabla 8); para casos relacionados el fabricante establece una tolerancia del 5%, la medida de los parámetros del instrumento permite observar que las compensaciones hechas por el algoritmo están dentro de los valores establecidos. En el ajuste se estimó una resistencia calculada con la ecuación (65), donde el promedio de resistencia es 316.10 $\Omega$  (tabla 8).



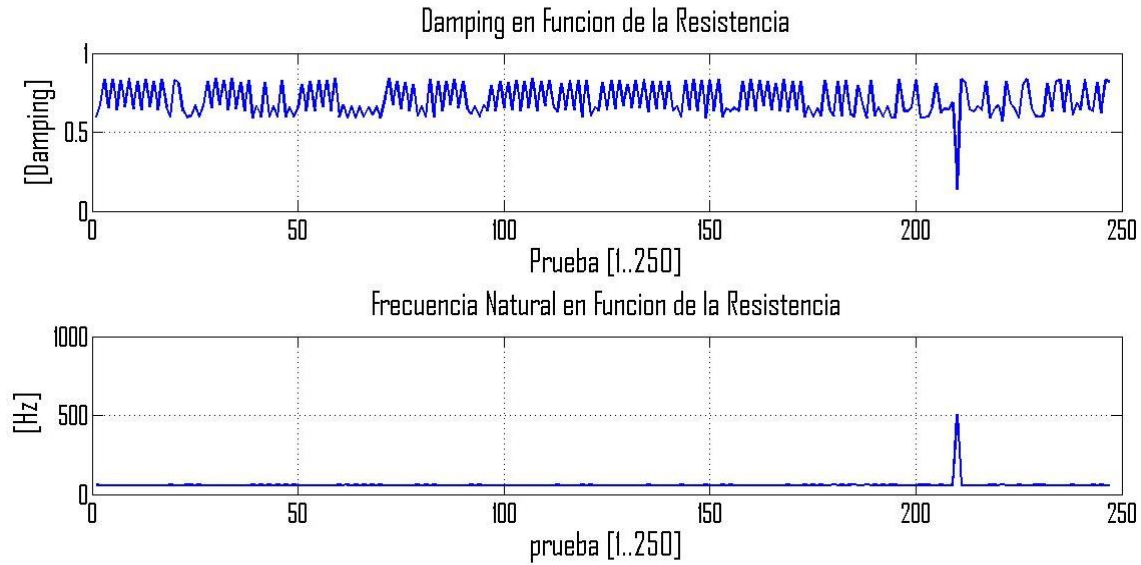


Figura 66: Variación del Damping y frecuencia natural en 250 pruebas  
Fuente Propia.

La figura 67 muestra el porcentaje de ajuste y confiabilidad con un promedio de 93.5244% (tabla 8), lo que demuestra una fiabilidad muy alta en la identificación del modelo; a pesar de que en la prueba 210 se evidencia la caída de la roca ocasionando que descienda a valores negativo, el algoritmo logra ubicar el porcentaje de ajuste a su valor anterior mostrando una fiabilidad muy alta en modelo de identificación, esto permite determinar una buena estimación de la resistencia de carga para alcanzar un damping de 0.707.

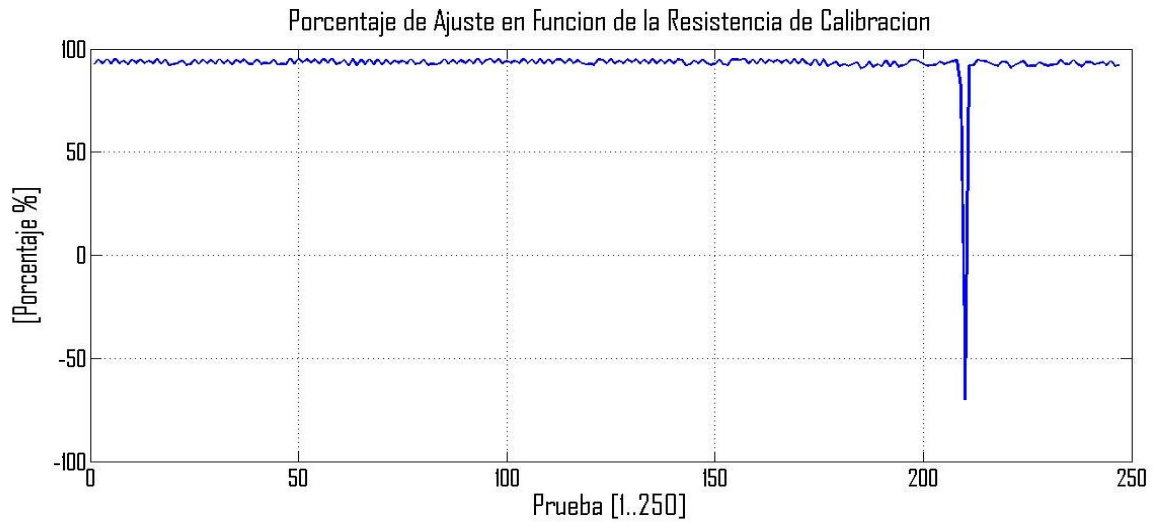


Figura 67: Porcentaje de Ajuste en 250 pruebas.

Fuente Propia.

# prueba	Resistencia promedio calculada por el sistema $\Omega$	Damping promedio	Frecuencia Natural promedio	% de ajuste promedio
1	316.10	0.6995	59.1986	93.5244
2	280.72	0.7305	58.8029	92.4737
3	285.15	0.7267	56.5764	93.4132
4	280.69	0.7282	57.2524	93.323
5	283.57	0.6822	54.3612	94.126
6	290.51	0.7342	60.238	93.741

Tabla 8: Valores prueba Roca 10Kg.

Fuente Propia

## 5.6 Experimento Falla Geologica

Esta prueba se desarrolló en la carrera 19b entre calle 11b y 12; barrio Pajonal de la ciudad de Popayán ver figura 68, este lugar fue escogido ya que pasa una falla geológica (ver anexo E Mapa falla geológicas) y se pretendía observar si había presencia de vibraciones del suelo; es de anotar que es poco probable que se registraran movimientos pronunciados en el terreno según información de INGEOMINAS, pese a estar en una fractura de la corteza terrestre, el experimento se efectuó ubicando el geófono sobre el lugar donde pasa la falla, buscando captar el comportamiento del sensor; haciendo un procesamiento de la señal por medio de algoritmos que ayuda a efectuar una mejor caracterización y ajuste.

Las pruebas se repitieron 6 veces bajo condiciones similares donde el resultados de sus parámetros se ven registrados en la tabla 9, para verificar si el dispositivo cumple con el objetivo propuesto donde se grafica el experimento uno en el trabajo principal y los restantes se pueden evidenciar en la parte de anexos gráficas.

Las graficas estan integradas por:

- Una lectura de la señal para observar la vibración captada por el sensor sin ajustar y ajustado.
- Comportamiento del sensor sin ajustar frente a la variación de una resistencia externa.
- Variación del damping y frecuencia natural con el sensor ajustado y resistencia de carga que lo ubica en un coeficiente de amortiguamiento cercano a 0.707 en 250 pruebas que se repiten dentro de un experimento.
- Porcentaje de ajuste en el experimento.



Figura 68: Falla geológica

### 5.6.1 Análisis de la prueba

En principio se gráfico la lectura arrojada por el sensor sin ajustar a través de Matlab, para observar si el geófono está realizando la toma de muestra de forma correcta. La figura 69 muestra las vibraciones producidas por el paso de personas y vehículos más no como consecuencia de la falla, el estudio fue tomado con un periodo de muestreo de 1ms; donde la amplitud de la vibración está expresada en voltaje (v).

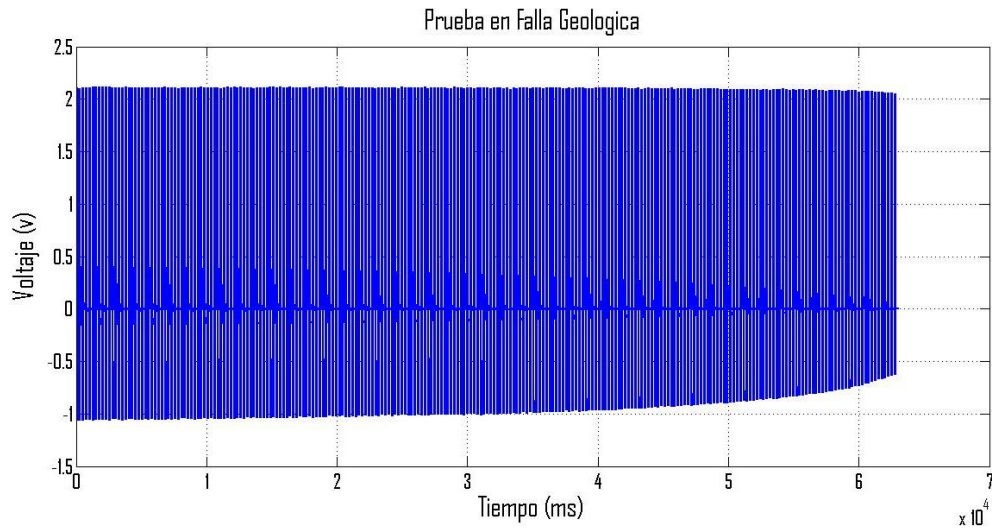


Figura 69: Lectura experimento falla geologica geofono sin ajustar  
Fuente Propia.

Para tener una mejor apreciación del evento se debe hacer uso de la herramienta zoom de Matlab; debido a la cantidad de datos tomados que no permiten ver en detalle este suceso ver figura 70.

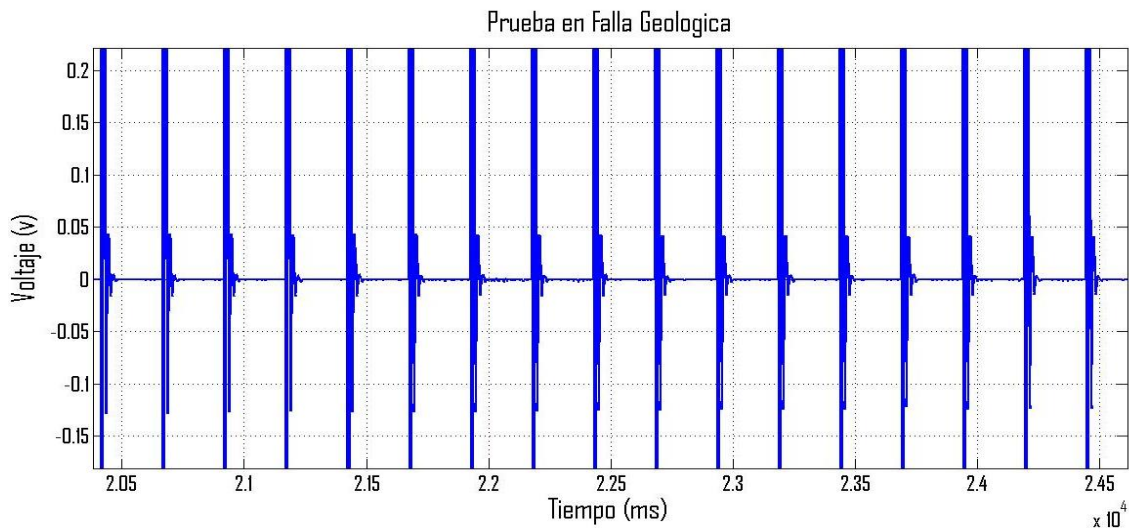


Figura 70: Lectura del experimento falla geologica del geofono sin ajustar  
ampliada

Fuente Propia.

En la figura 71 se evidencia la lectura del geófono ajustado frente a las vibraciones ocasionadas por el paso de vehículos y transeúntes. Es de tener en cuenta que el sensor sísmico esté calibrado garantiza una mejor lectura de los datos obtenidos más no significa que disminuya la amplitud de la señal, pues esta depende de la intensidad de la vibración producida por el evento.

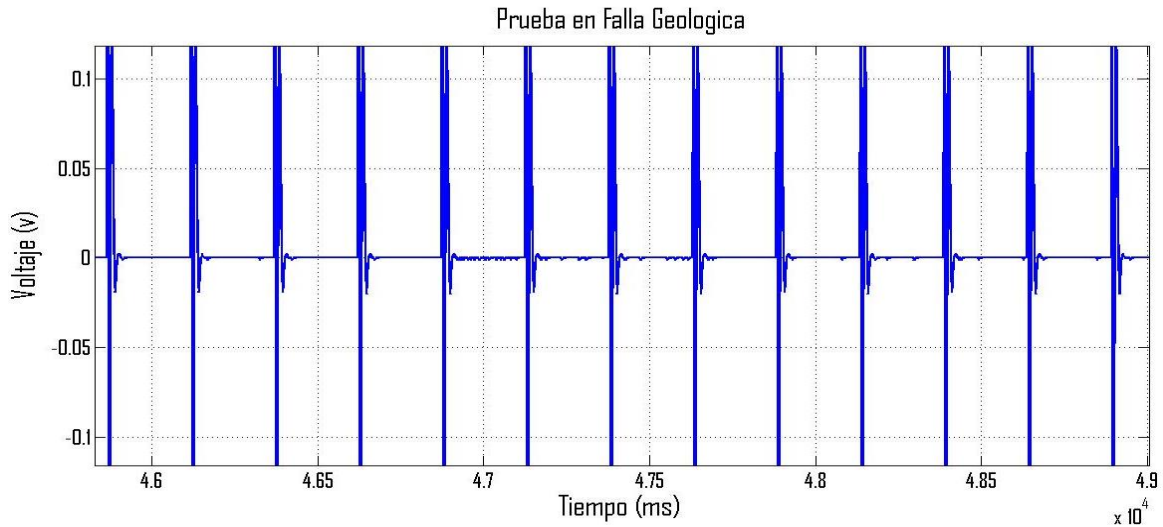


Figura 69: Lectura del geófono ajustado experimento falla geológica

Fuente Propia.

En la figura 72 se muestra el comportamiento del damping y la frecuencia natural a medida que la resistencia de carga tiende a su valor máximo de 10 K $\Omega$ ; los valores obtenidos por el algoritmo de identificación muestran las vibraciones que se registran en una fractura de corteza terrestre o falla geológica. En esta imagen se puede determinar que el coeficiente de amortiguamiento relativo no está ajustado, debido a que está por debajo de 0.707.

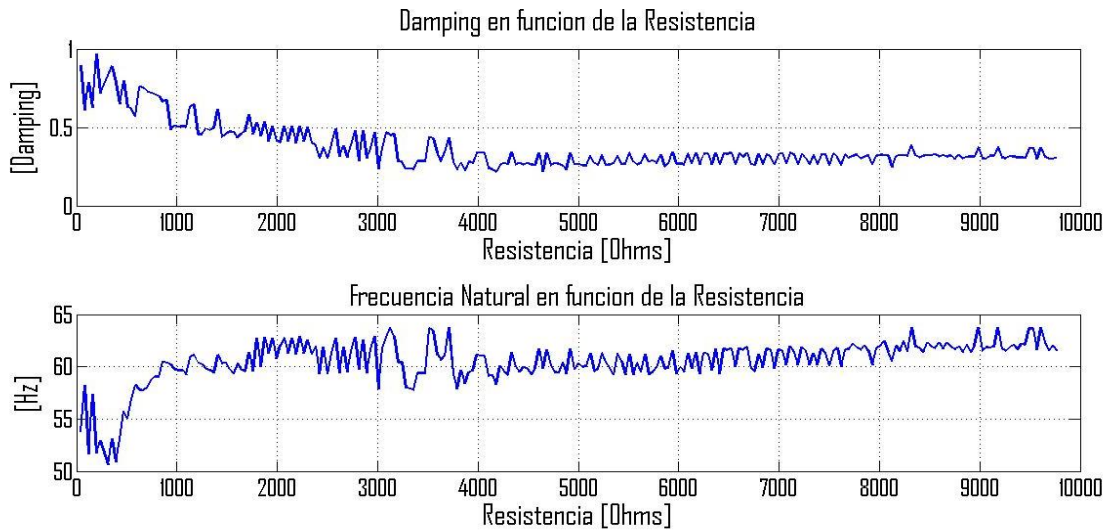


Figura 70: Variación del damping y Frecuencia natural

Fuente Propia.

La figura 73 se observa una variación del coeficiente de amortiguamiento y frecuencia natural en cada una de las muestras esto se debe a que el sensor se ve afectado por el ruido ambiental existente en el medio y las vibraciones generadas en la fractura terrestre sumadas a las oscilaciones ocasionadas por el tránsito de vehículos y transeúntes , el algoritmo trata de compensar dichas variaciones al ajustar de manera continua la resistencia de carga, sin embargo, la media del damping calculado es de 0.7245 (tabla 9); para casos relacionados el fabricante establece una tolerancia del 5%, la medida de los parámetros del instrumento permite observar que las compensaciones hechas por el algoritmo están dentro de los valores establecidos. En el ajuste se estimó una resistencia calculada con la ecuación (65), donde el promedio de resistencia es  $370.39\Omega$  (tabla 9).

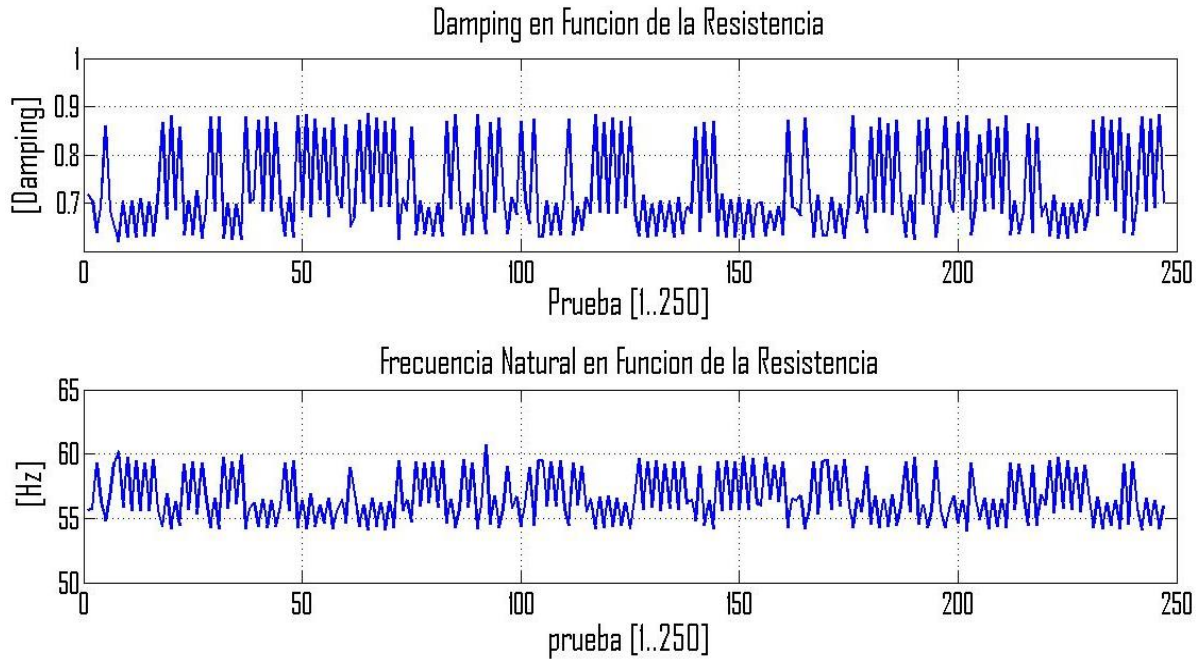


Figura 71: Variación del Damping y frecuencia natural en 250 pruebas.

Fuente Propia.

La figura 74 muestra el porcentaje de ajuste y confiabilidad con un promedio de 93.6185% (tabla 9), lo que demuestra una fiabilidad muy alta en la identificación del modelo; a pesar de que en la prueba 92 se evidencia el paso de un vehículo de carga pesada ocasionando que descienda el porcentaje; el algoritmo hace el ajuste mostrando una fiabilidad muy alta en modelo de identificación, esto permite determinar una buena estimación de la resistencia de carga para alcanzar el damping deseado.



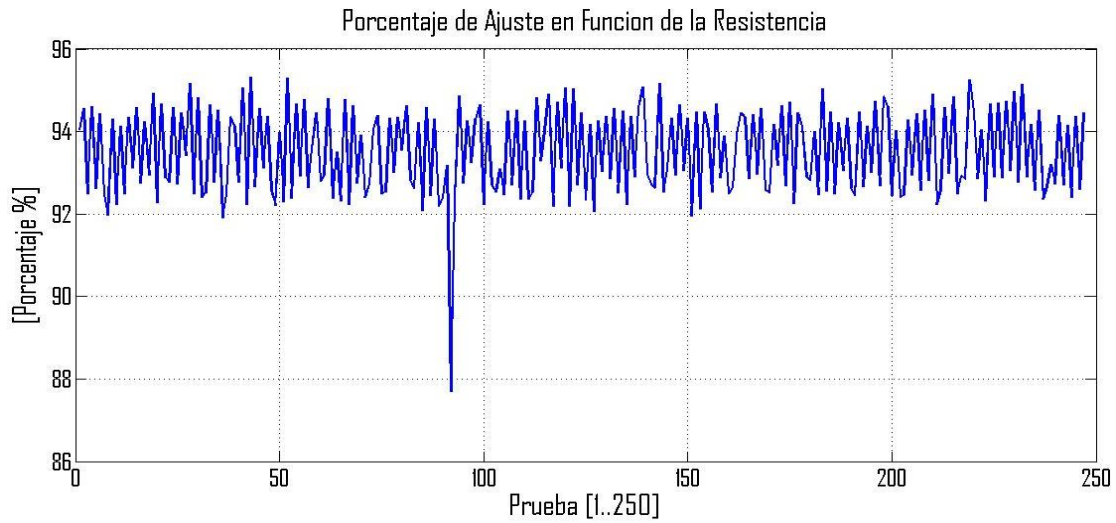


Figura 72: Porcentaje de Ajuste en 250 pruebas.

Fuente Propia.

<b>Numero de prueba</b>	<b>Resistencia calculada por el sistema <math>\Omega</math></b>	<b>Damping promedio</b>	<b>Frecuencia Natural promedio</b>	<b>Porcentaje de ajuste promedio</b>
1	370.39	0.7245	56.5454	93.6185
1	372.18	0.7305	58.8029	92.4737
2	370.39	0.7248	56.5454	93.4844
3	366.52	0.7282	57.1611	93.4123
4	336.02	0.6822	54.3612	92.8126
5	343.76	0.7124	54.327	94.183

Tabla 9: Valores prueba Falla Geológica.

Fuente Propia

## **5.7 Comparación sensor ajustado y sin ajustar**

Después de efectuar las pruebas y considerando el coeficiente de amortiguamiento relativo(damping) en un valor cercano a 0.707 se puede determinar el efecto que causa la aplicación del algoritmo de ajuste con un porcentaje error en una medida del 5%. Esto se puede evidenciar en cada prueba con el sensor ajustado y sin ajustar.

De esta manera se observa que el porcentaje de ajuste en la identificación con el método de mínimos cuadrados que está entre 94-95% de nivel de confiabilidad; además cuando baja el porcentaje el damping varía, esto se debe a las perturbaciones o aumento de las vibraciones. Durante el desarrollo del presente trabajo el geófono fue sometido a mucha manipulación en especial golpes debido al traslado del instrumento durante el desarrollo de las pruebas, sin embargo, se evidencia que el sistema responde según los parámetros establecidos.

## 6 CAPITULO VI: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 Conclusiones

- Se estableció un modelo experimental para determinar los parámetros del geófono (coeficiente de amortiguamiento relativo y frecuencia natural) mediante el método de mínimos cuadrados aplicado en la caracterización del sensor.
- Por medio del desarrollo hardware y software es posible determinar los parámetros del sensor (damping y frecuencia natural), utilizando la tarjeta de desarrollo Psoc; que permite desarrollar e integrar muchas herramientas para realizar pruebas electrónicas en línea; es decir, que reducen el uso de hardware externo, debido a que en su tecnología interna posee módulos que disminuyen el ruido externo y eléctrico.
- A través de la experimentación se determinó que pese a que el sistema ajusta el sensor dentro del rango establecido la presencia de ruido externo y las vibraciones inducidas hace que varíe el coeficiente de amortiguamiento. EL nivel de precisión y ajuste es fundamental para el cálculo de la resistencia de carga; es decir, si el nivel es mayor del 90% el valor de la resistencia se acerca a un valor preciso y por ende a un coeficiente de amortiguamiento más cercano a 0.707.
- Este proyecto contribuye a la generación de conocimiento desarrollados a través de la carrera, adicionando nuevas áreas de investigación en el desarrollo de este prototipo; tomando los diseños aquí presentes como base para realizar mejoras o rediseños a trabajos futuros.

## **6.2 Recomendaciones**

- para guardar los datos se recomienda crear una carpeta donde se hará el direccionamiento, evitando que cuando la prueba inicie se pierdan datos y se tenga que repetir.
- Se recomienda cuando se empiece el censado de la señal se debe verificar la correcta conexión de la tarjeta y el sensor ya que el sistema solo dispone de 10 segundos de espera para generar un error y tendrá que repetirse los pasos de direccionamiento de carpeta.
- es aconsejable que al hacer uso del geófono se verifique las especificaciones del sensor que determine el fabricante para que los valores estén dentro del rango de medida y no se tomen datos de forma errónea.

## **6.3 Trabajos Futuros**

1. Tarjeta de adquisición de datos del geófono que cense las variables físicas (como humedad, temperatura) y GPS que pueda enviar las coordenadas donde se encuentre ubicado el sensor para uso de alarma para derrubios.
2. Tarjeta de adquisición de señales del geófono con enlace con latte panda para poder visualizar y hacer tratamiento de datos a través de Matlab.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Rodríguez, A. R., & del Castillo, H. (2006). Ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas (Vol. 1). Editorial Limusa.
- [2] Pesca Coronado, G. R. Propuesta didáctica para la enseñanza aprendizaje del fenómeno de la refracción de las ondas mecánicas y su aplicación para el estudio del interior de la tierra (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- [3] Carlos E. Bello, Carlos A. Ortiz, Johnattan J. Pérez. (2012), Geófono lector de movimiento que salva vidas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial-Departamento de Ingeniería de Eléctrica y Electrónica.
- [4] Ahumada, N., & Gascón, M. (2005). Vientos, terremotos, tsunamis y otras catástrofes naturales: historia y casos latinoamericanos. Editorial Biblos.
- [5] Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). Ciencias de la Tierra. Una introduc.
- [6] Kamata, M. (2004, November). High precision geophone calibration. In the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 17th International Acoustic Emission Symposium, Tokyo, Japan.
- [7] Estrada, L. (2008). Apuntes de prospección Sísmica. Cátedra de Geofísica. Universidad Nacional De Tucumán.
- [8] Willmore, P. L. (1959). The application of the Maxwell impedance bridge to the calibration of electromagnetic seismographs. Bulletin of the Seismological Society of América, 49(1), 99-114.
- [9] Humire Guarachi, F. A. (2013). Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos: aplicación a la microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago.

- [10] Fulla, M. R., Palacio-Bedoya, J. L., Flórez-Velásquez, C. A., & Aristizábal-Tique, V. H. (2013). Módulo Inalámbrico para el sensado de Vibraciones Superficiales en Suelos. Tecno Lógicas.
- [11] Peña, J. A. (2011). Estudios geofísicos en yacimientos arqueológicos andaluces. Periodo 1985-2010.
- [12] Huamán Egoávil, C., Aguilar Chuquimuni, R., & de Investigaciones Sísmicas, C. P. J. (2002). Implementación del equipo de adquisición de datos de prospección sísmica. In Curso Internacional Microzonificación y su Aplicación en la Mitigación de Desastres, 3 (pp. 1-61). CISMID.
- [13] Ruiz. (2012), Método Sísmico de Reflexión, capítulo 2, Scribd San Francisco CA 2012
- [14] Rosales Climent, I. C. (2001) Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia.
- [15] Ardila, B. H. (2012). Diseño y construcción de un sistema de Adquisición de Señales Sísmicas con la capacidad de transmitir información de manera Inalámbrica.
- [16] Cisneros Mera, C. R., López, E., Leonel, W., Lara, M., & Eduardo, O. (2005). Calibrador digital de sensores sísmicos.
- [17] 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.
- [18] Harper, G. E. (2005). *El ABC* de las instalaciones eléctricas residenciales. Editorial Limusa.

- [19] Contreras Pérez, W. J. (2009). Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones: Aplicación en minas Ares.
- [20] Contreras Pérez, W. J. (2009). Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones: Aplicación en minas Ares.
- [21] Ramírez, E. T. (2008). Distorsion armonica. *Autom. Product. Y Calid. SaCV*, (222), 1-31.
- [22] Cárdenas, R (2014) Fundamentos de Control de Sistemas 2014, Apuntes del curso de control automático
- [23] Wielandt, E. (2002). Seismic sensors and their calibration. *New Manual of Seismological Observatory Practices*, 51.
- [24] Rodgers, P. W., Martin, A. J., Robertson, M. C., Hsu, M. M., & Harris, D. B. (1995). Signal-coil calibration of electromagnetic seismometers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(3), 845-850.
- [25] Roset, X., Nogueras, M., García, A., Del Rio, J., & Sarria, D. (2009, May). Geophone Calibration by means of hyperbaric chamber. In *OCEANS 2009-EUROPE* (pp. 1-4). IEEE.
- [26] Di Giovambattista, R., Barba, S., & Marchetti, A. (1995). Amplitude response of a telemetered seismic system from seismometers to digital acquisition system. *Annals of Geophysics*, 38(1).
- [27] Martínez Palomino, Y. M. (2010). Monitoreo y análisis de corrientes de derrubios y sus lluvias desencadenantes en el pirineo oriental.
- [28] Barbecho, L., Edgar, M., & Matute Matute, G. A. (2011). Implementación de un calibrador para estaciones sísmicas analógicas y digitales (Bachelor's thesis).

- [29] Ramírez, M. E. E. Manual de Mesa de Calibración de Instrumentación Sísmica: ER-CT1.
- [30] Datasheet SM-24 Geophone Element.
- [31] Y. Herrera, N. Cooper y Mustagh Resources Ltd., Manual Para La Adquisición Y Procesamiento De Sísmica Terrestre Y Su Aplicación En Colombia, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [32] Carcasa para geófono SM-24. RT Clark Geophysical Equipment.
- [33] Datasheet Measurement Specialties sensor de temperatura y humedad HTU21D.
- [34] Datasheet EE2 EC2/EE2 Miniature Signal Relays – KEMET.
- [35] Datasheet Potenciómetro digital 2k AD5248 Analog Devices Inc.
- [36] Datasheet potenciómetro digita 10K MCP41010 Microchip.
- [37] Datasheet Arduino mega 2560.
- [38] Tarjeta de desarrollo PIC32-PINGUINO-MICRO Olimex.
- [39] Tarjeta de desarrollo PSoC® 5LP: CY8C58LP Cypress.
- [40] 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).
- [41] Kamata, M. (2005). High precision geophone calibration. *Journal of Acoustic Emission*, 23, 81-90.
- [42] 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.
- [43] 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.



[44] Rengifo, C. (2005). Identificación de Sistemas. Notas de Clase. Departamento de Electrónica, Control e Instrumentación Universidad del Cauca.

[45] Diaz, N. (2014). La Pseudoinversa en el proceso de Aprendizaje del Asociador Lineal. Trabajo de Investigación como para optar al título de Magister en Ciencias Matemáticas. Universidad del Valle.

[46] 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.

[47] Entorno de diseño integrado (IDE) PSoC Creator.

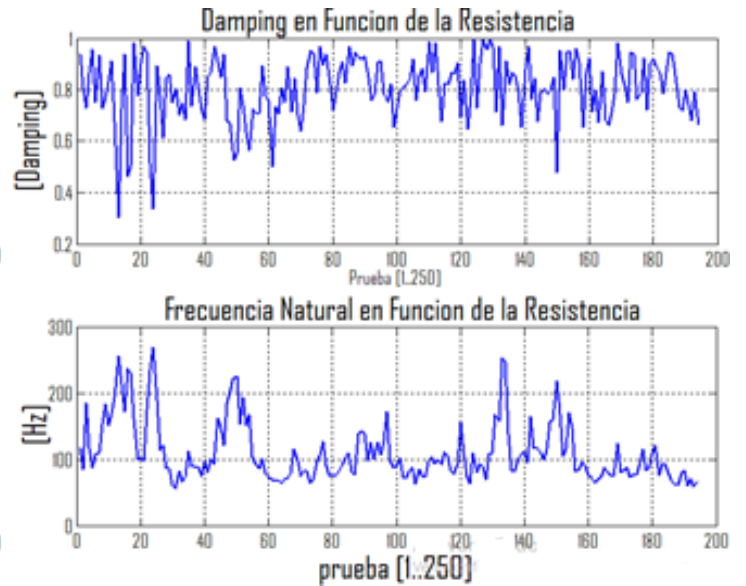
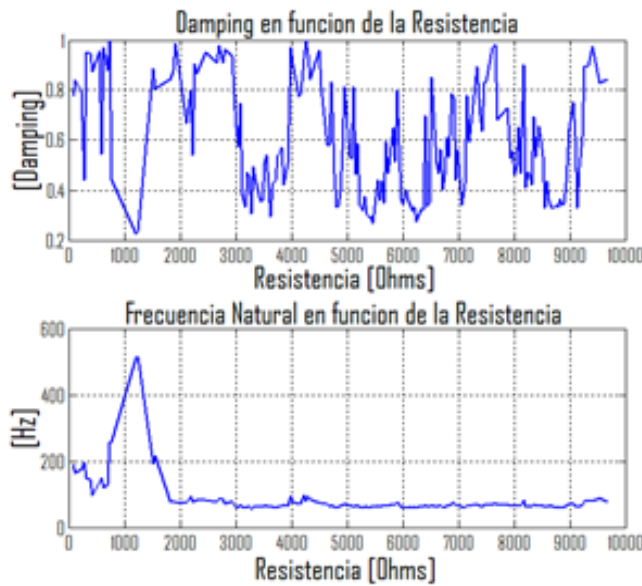
## Anexo A: Prueba Puento con sensor sin ajustar, ajustado y porcentaje de ajuste.

### Experimentos 1

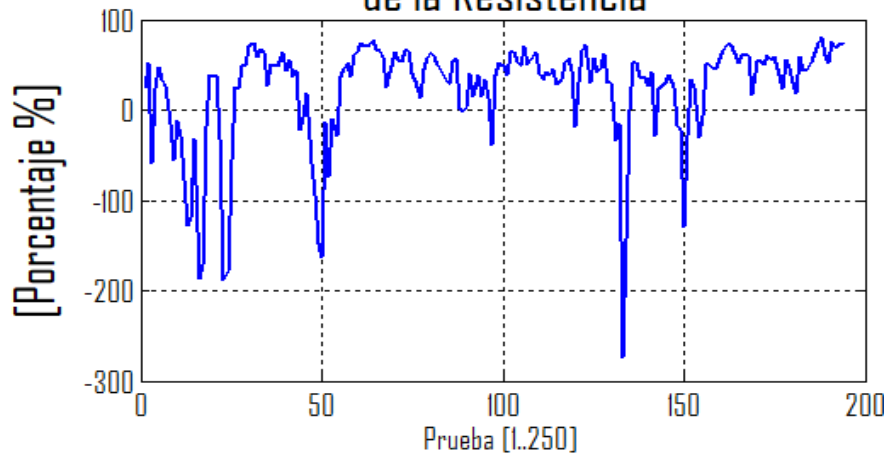
con sensor sin ajustar.

con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



### Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia

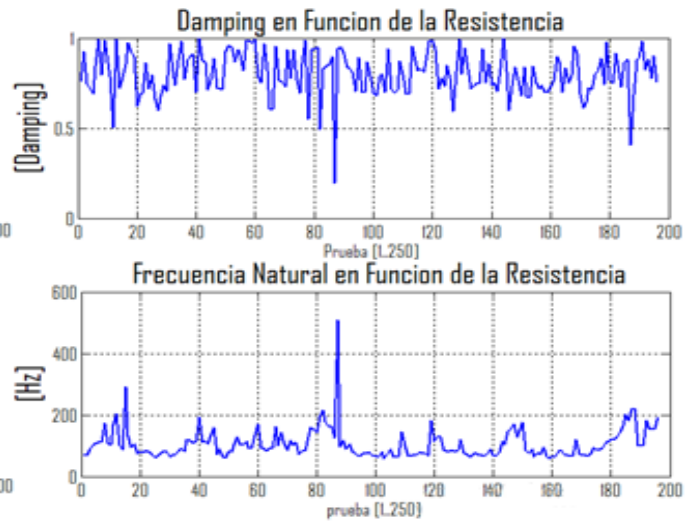
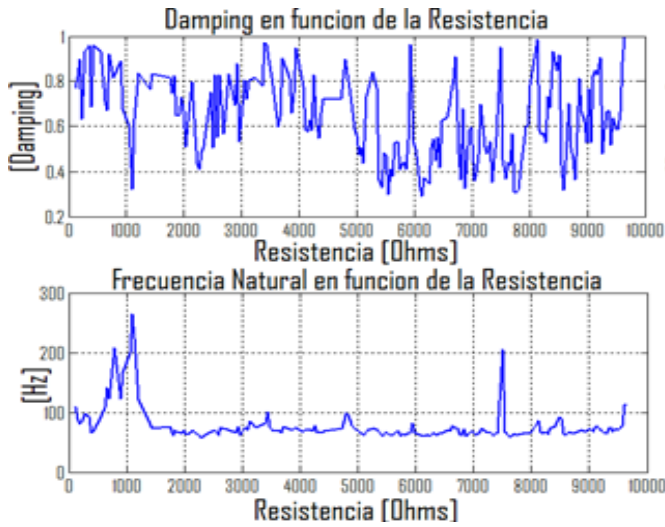


## Experimento 2

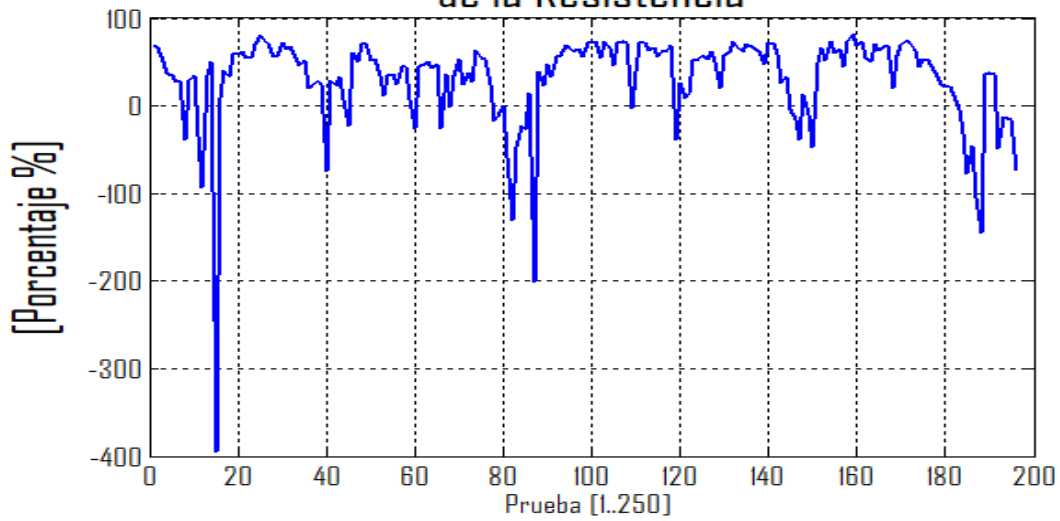
con sensor sin ajustar.

con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

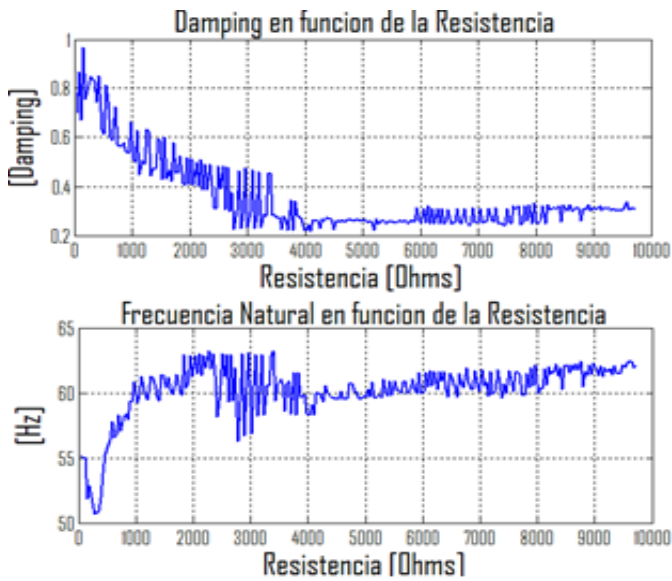


### Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia

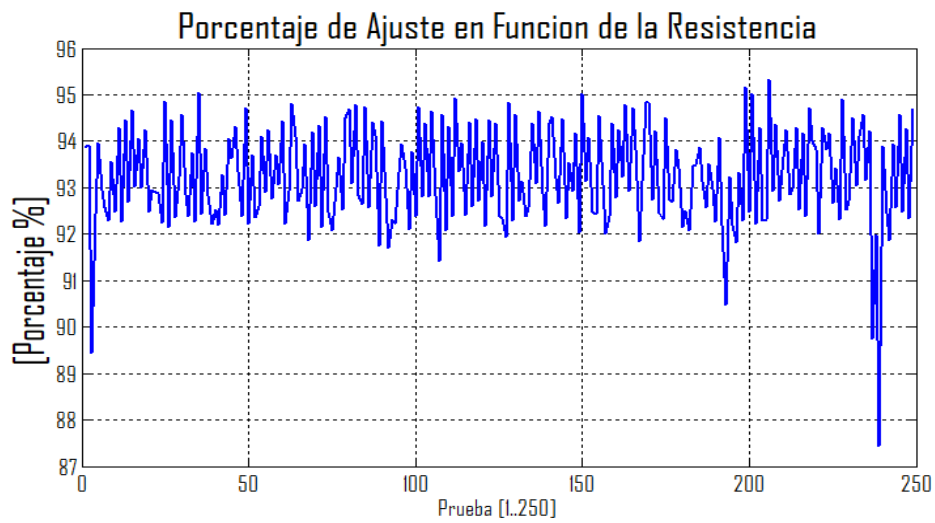
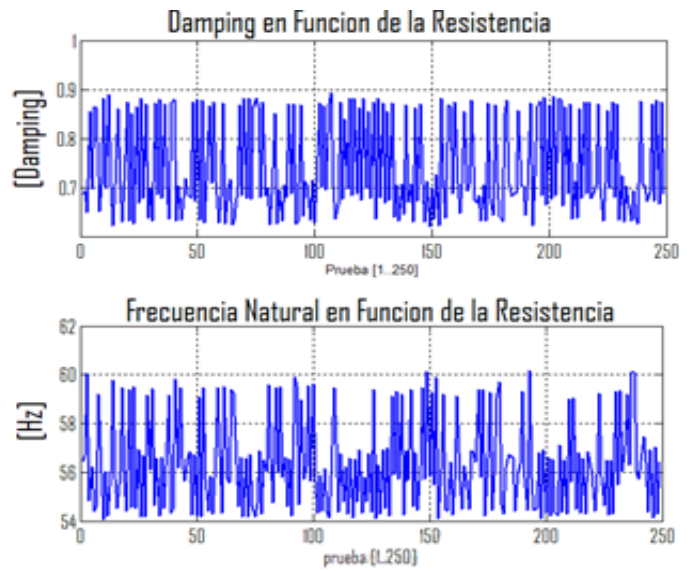


### Experimeto 3

con sensor sin ajustar.

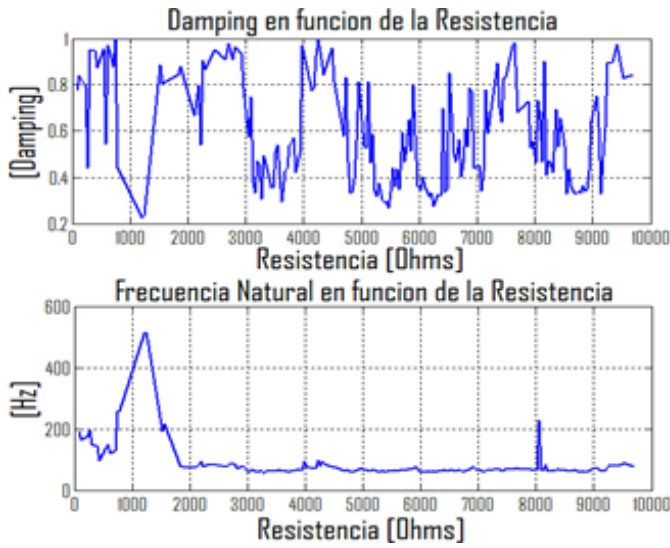


con sensor ajustado y porcentaje de ajuste.



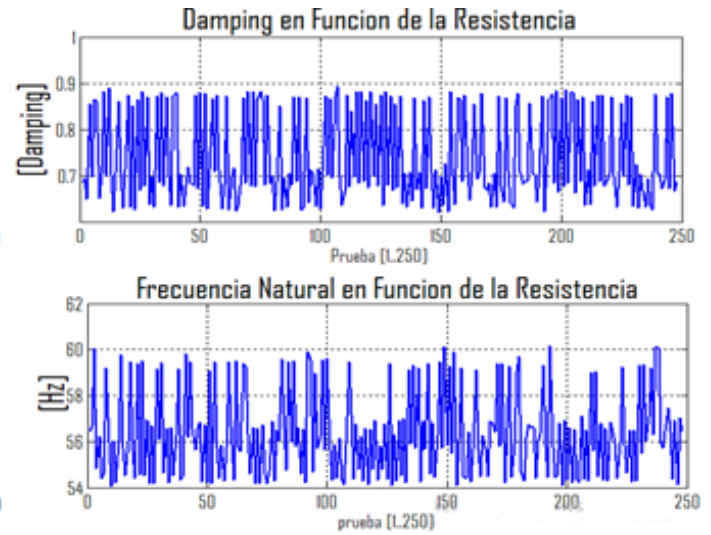
## Experimento 4

con sensor sin ajustar.

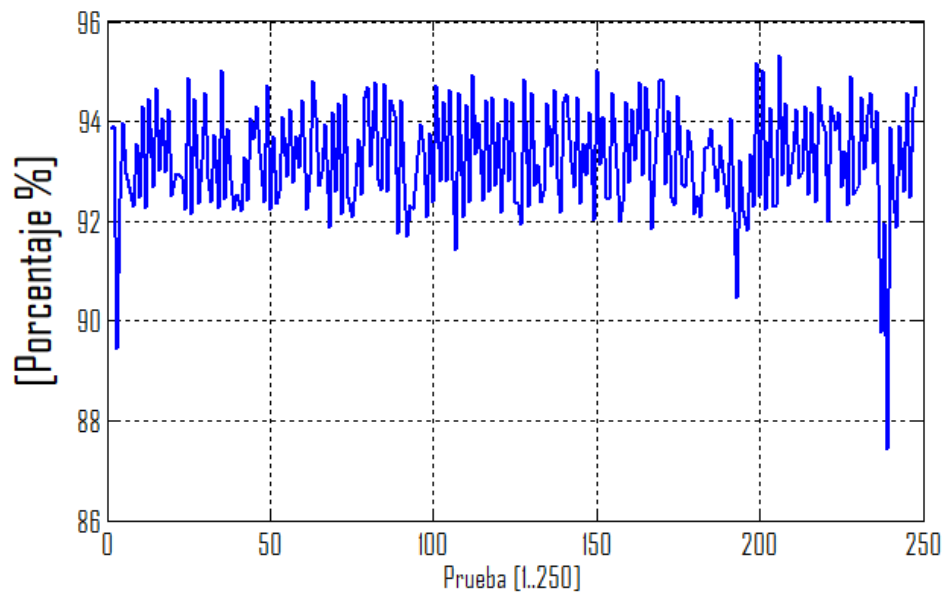


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

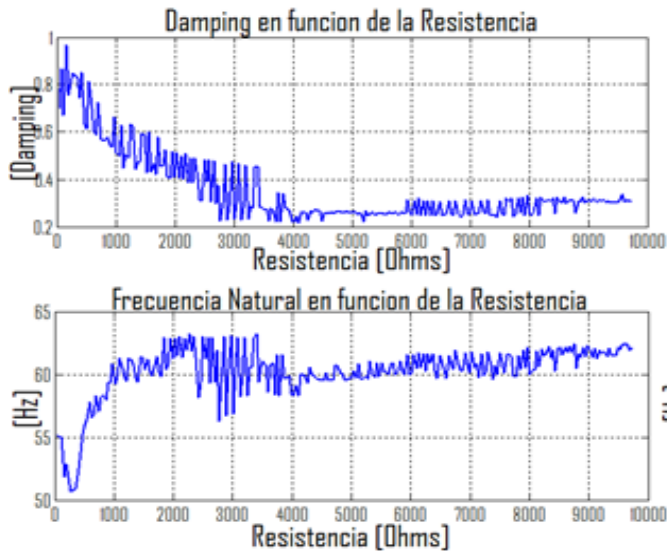


## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



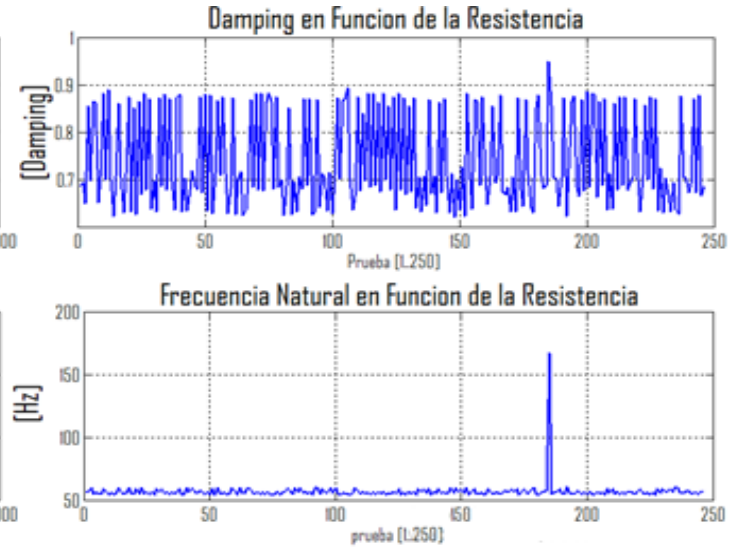
## Experimento 5

con sensor sin ajustar.

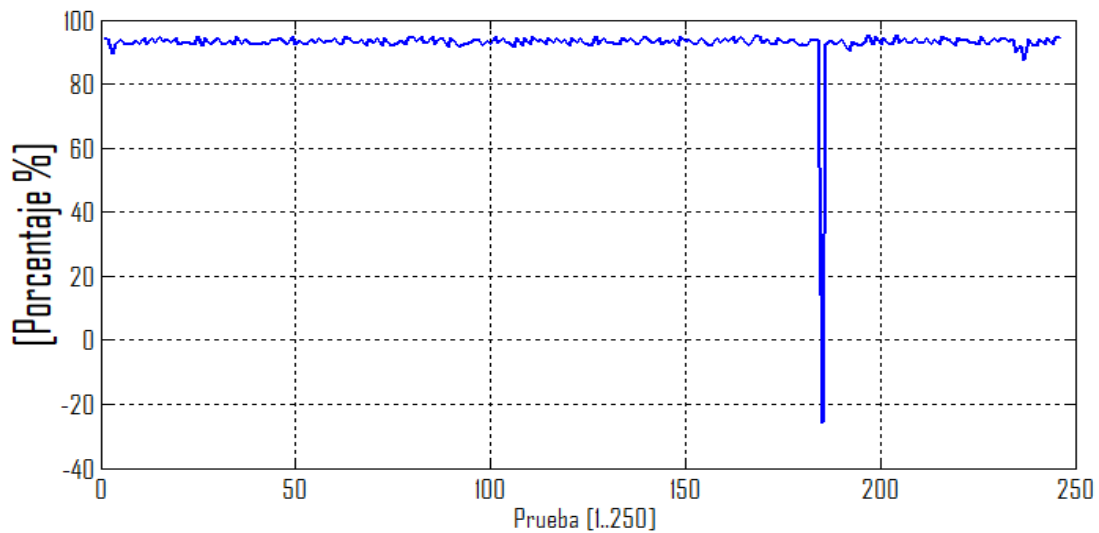


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia

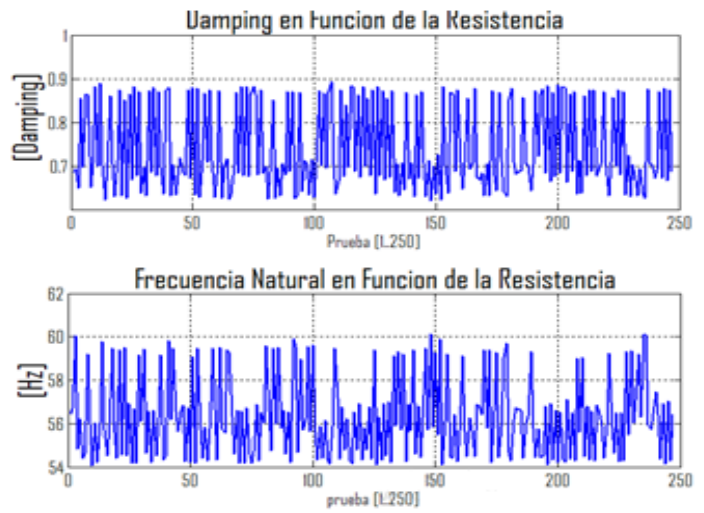
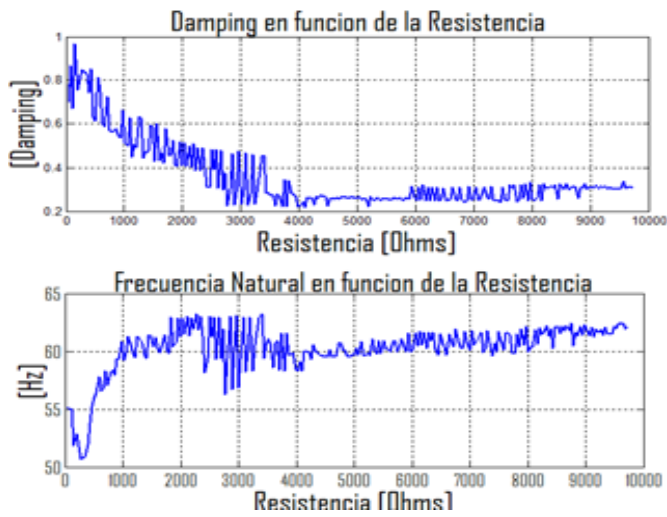


## Experimento 6

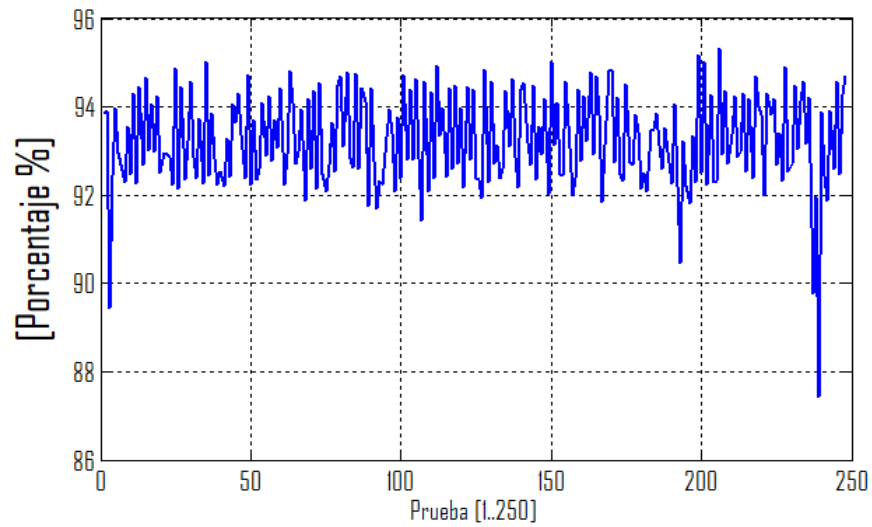
con sensor sin ajustar.

con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



### Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



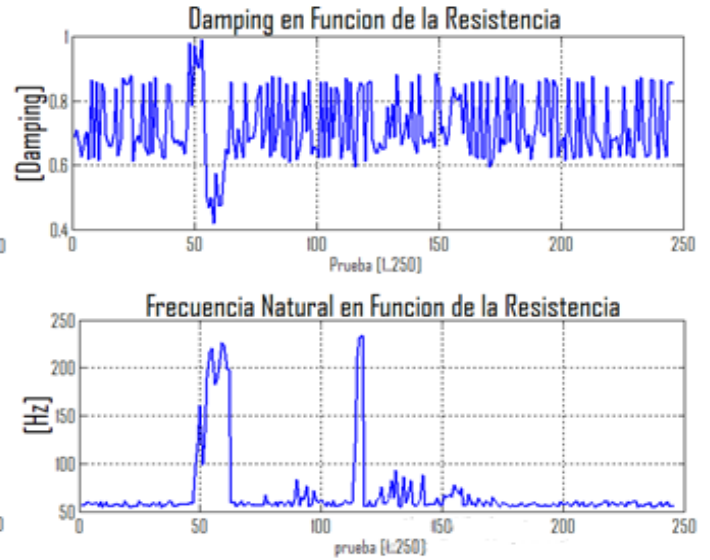
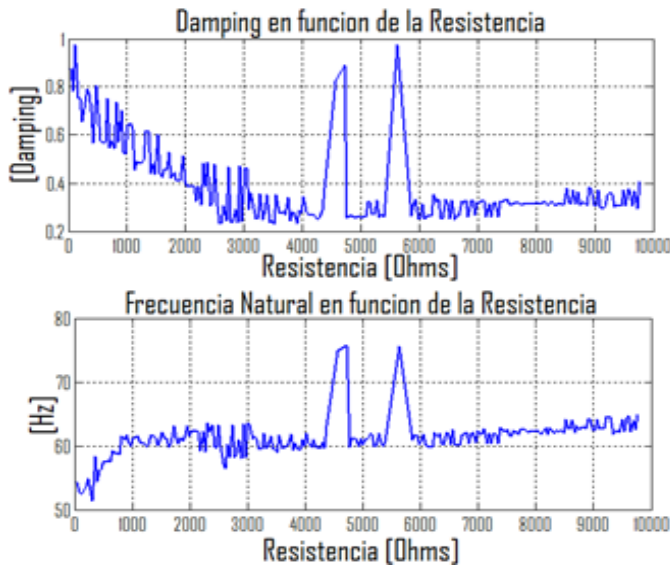
**Anexo B:** Prueba de Saltarín compactador con sensor sin ajustar, ajustado y porcentaje de ajuste.

**Experimentos 1**

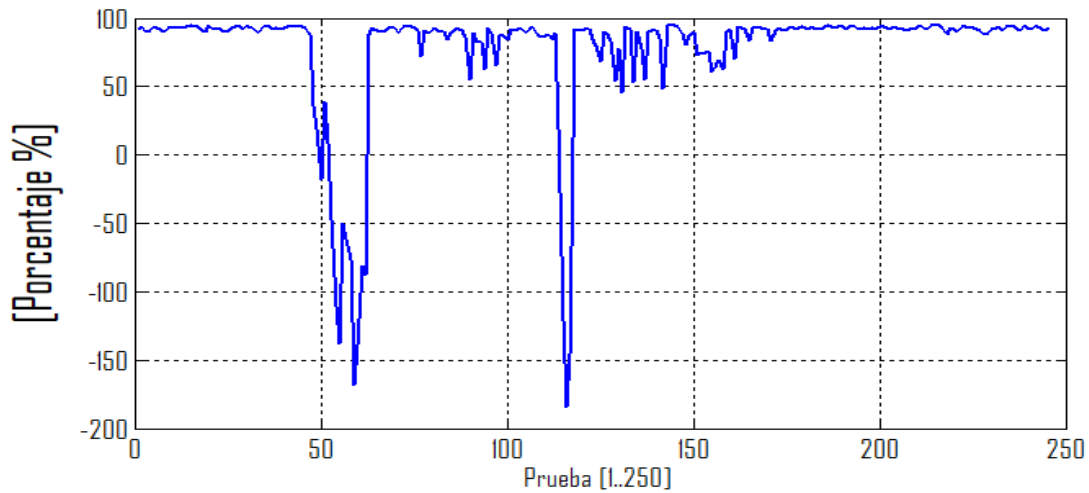
con sensor sin ajustar.

con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



**Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia**



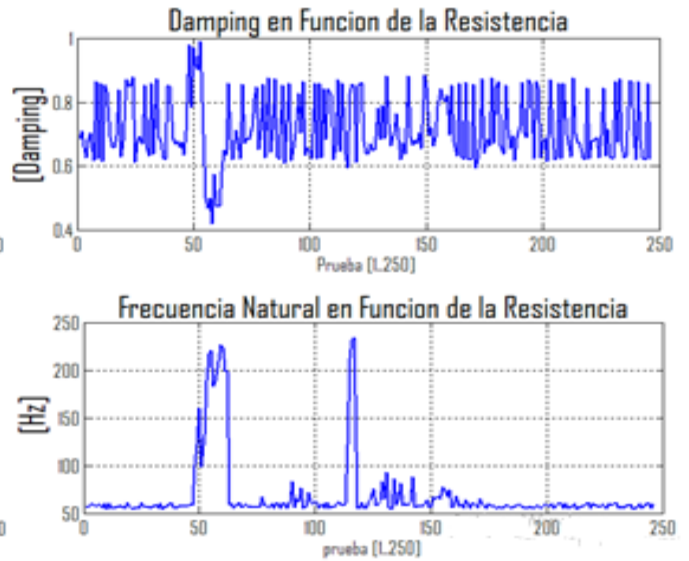
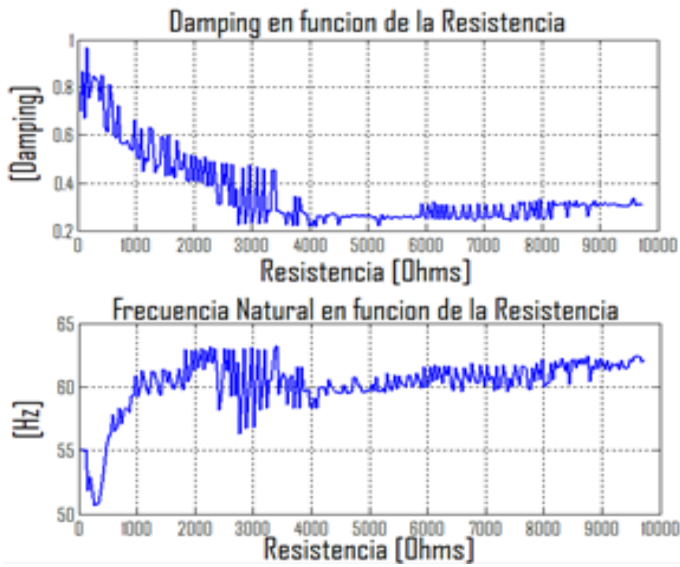


## Experimentos 2

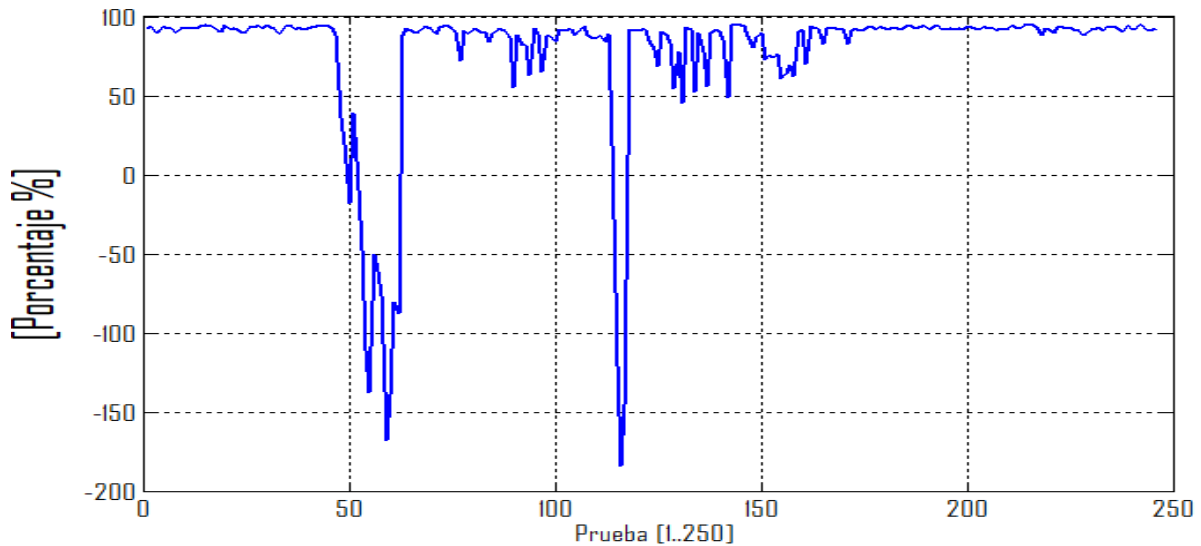
con sensor sin ajustar.

con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



### Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia

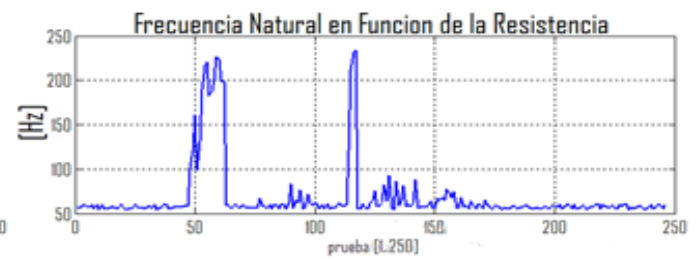
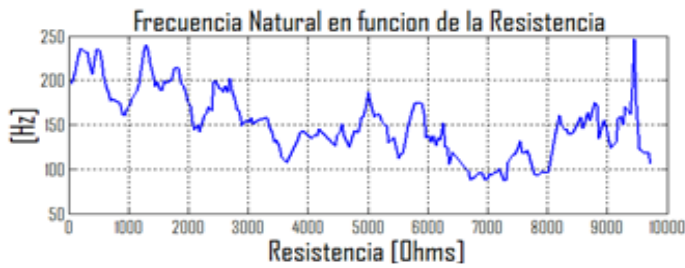
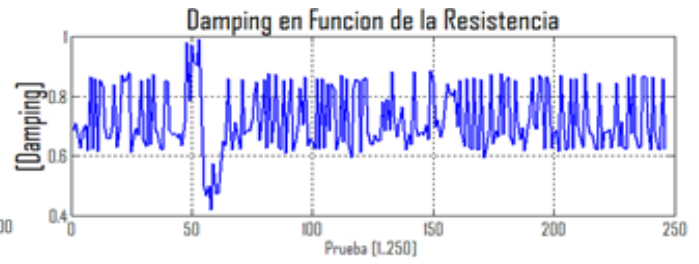
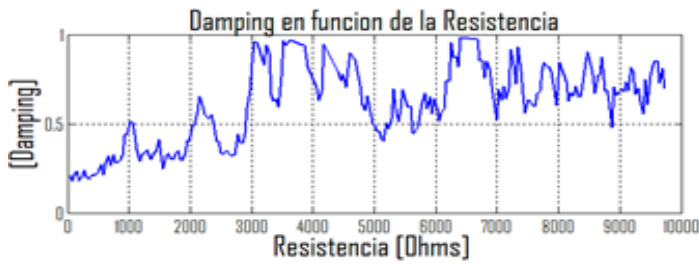


### Experimentos 3

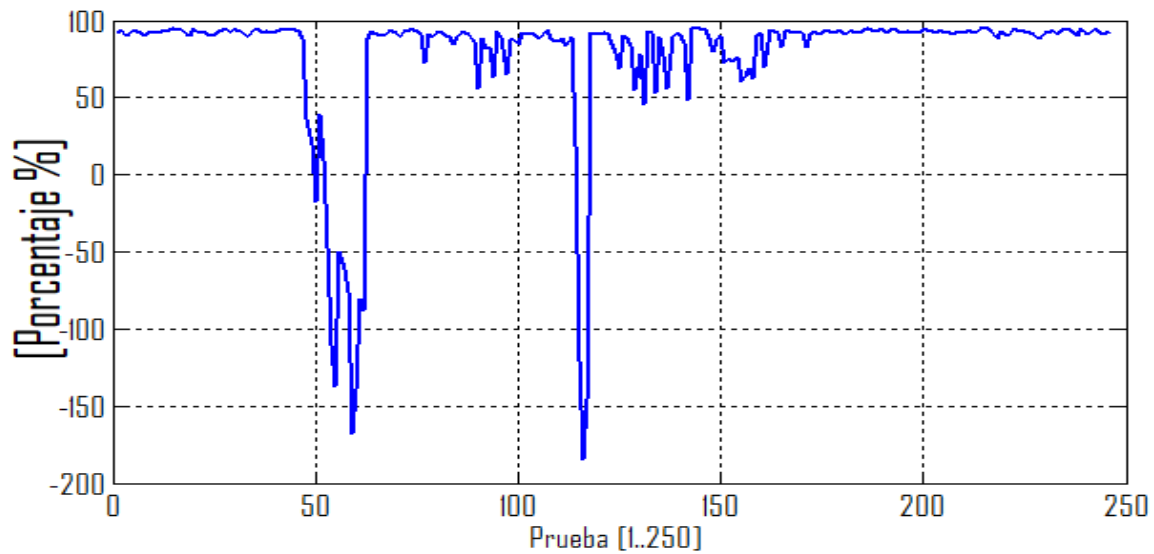
con sensor sin ajustar.

con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

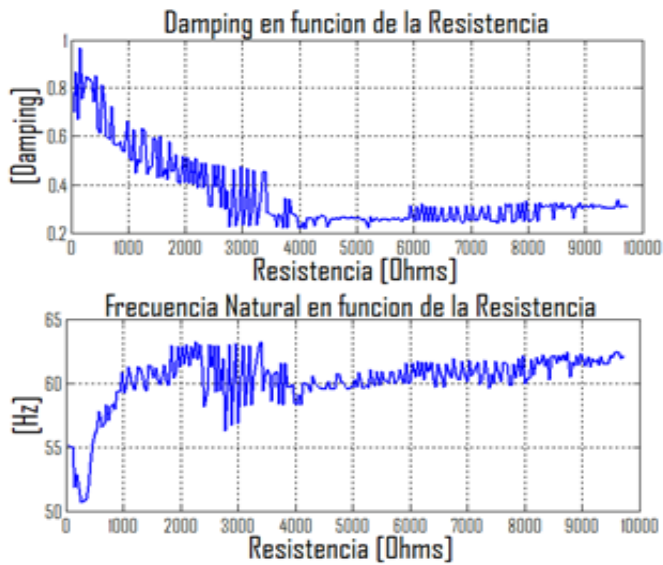


### Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



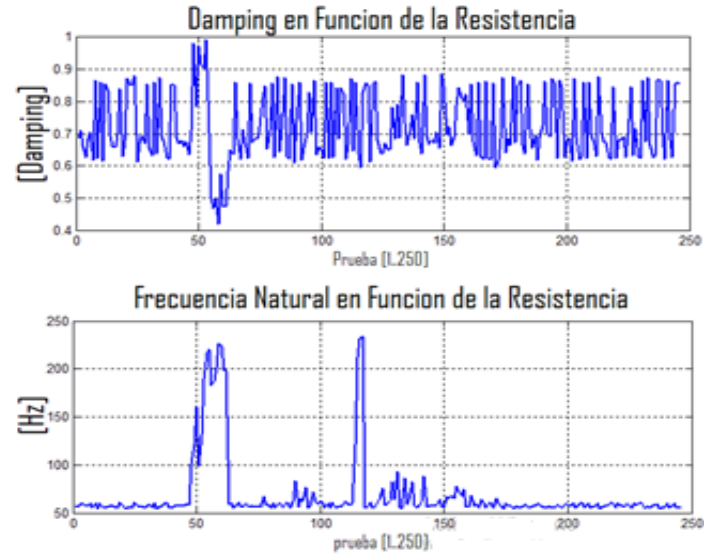
## xperimentos 4

con sensor sin ajustar.

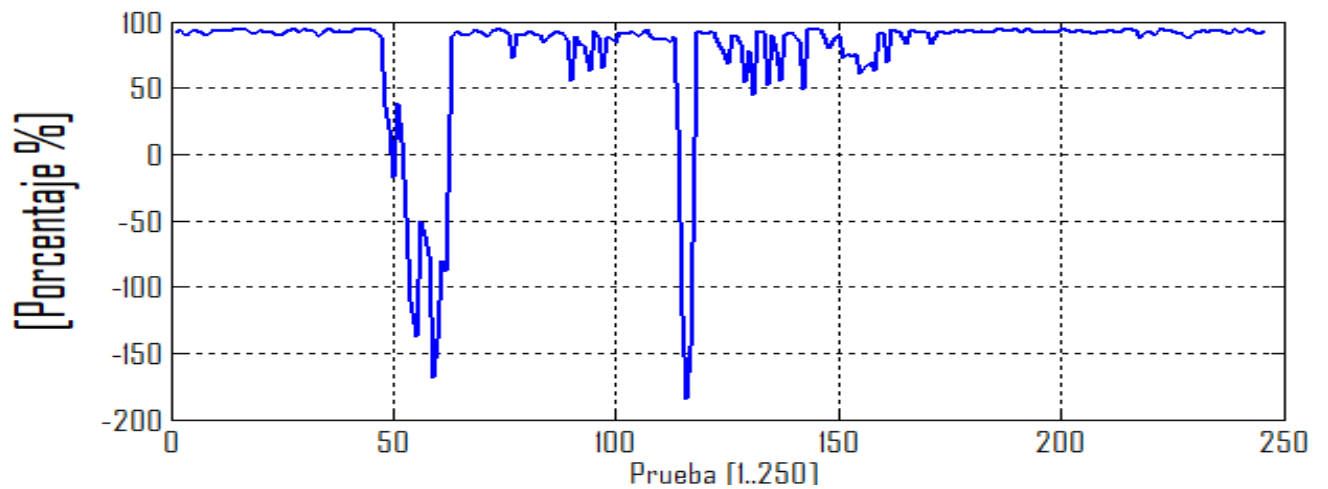


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

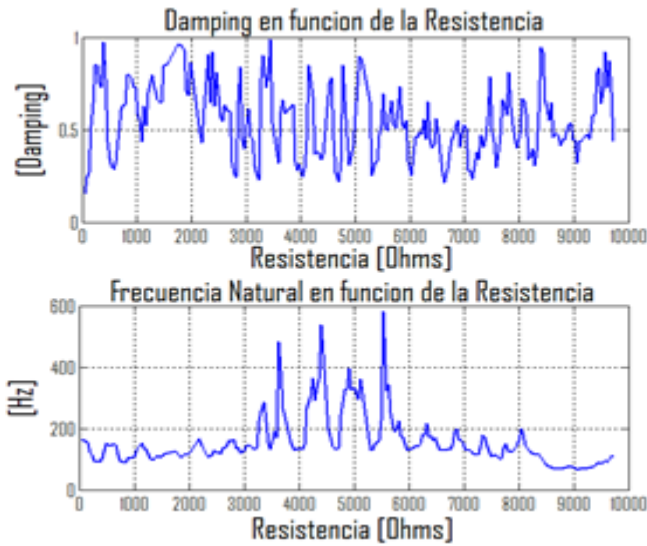


## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



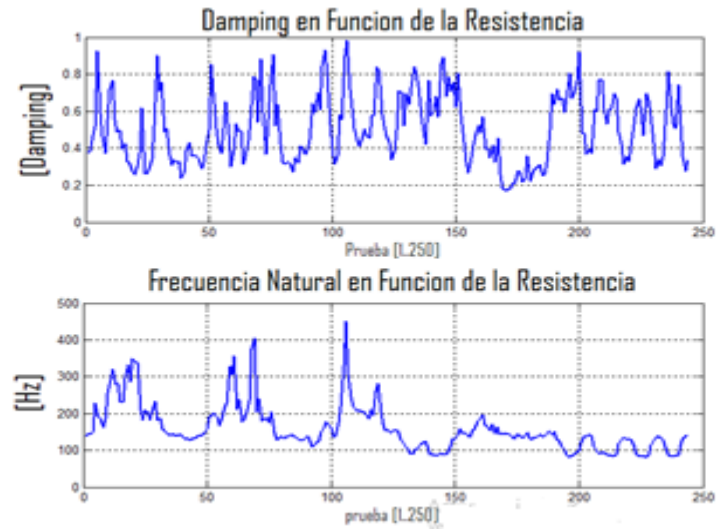
## Experimentos 5

con sensor sin ajustar.

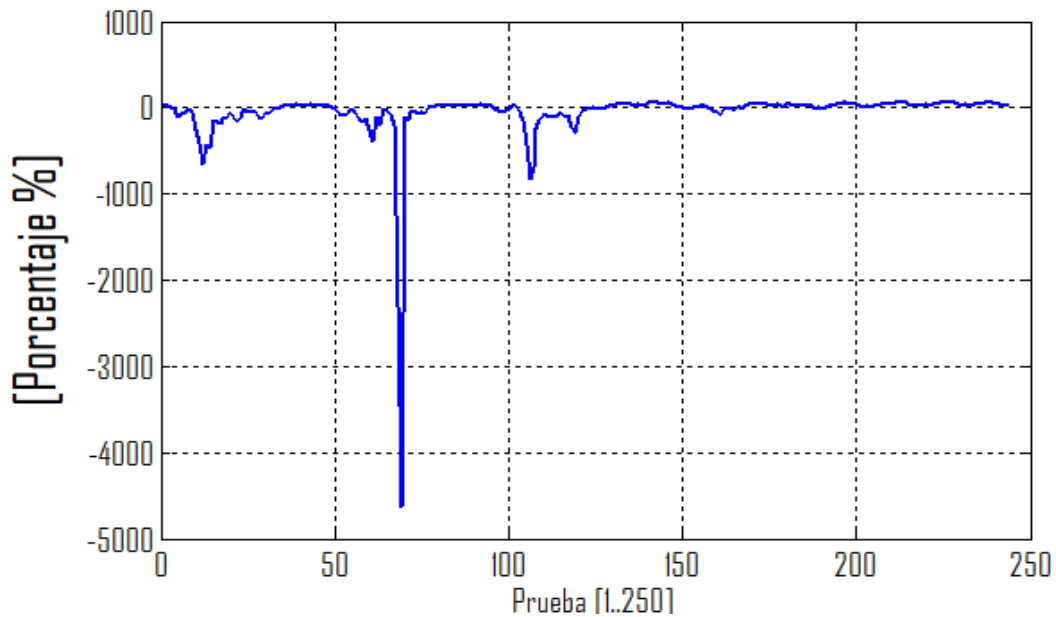


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

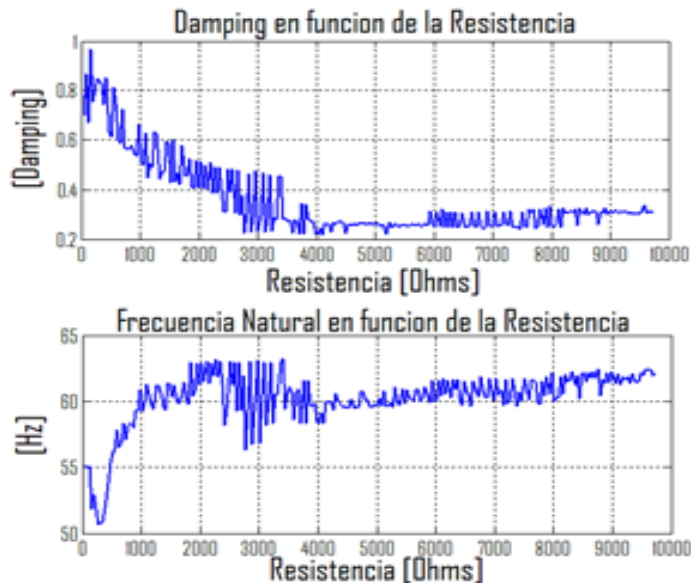


## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



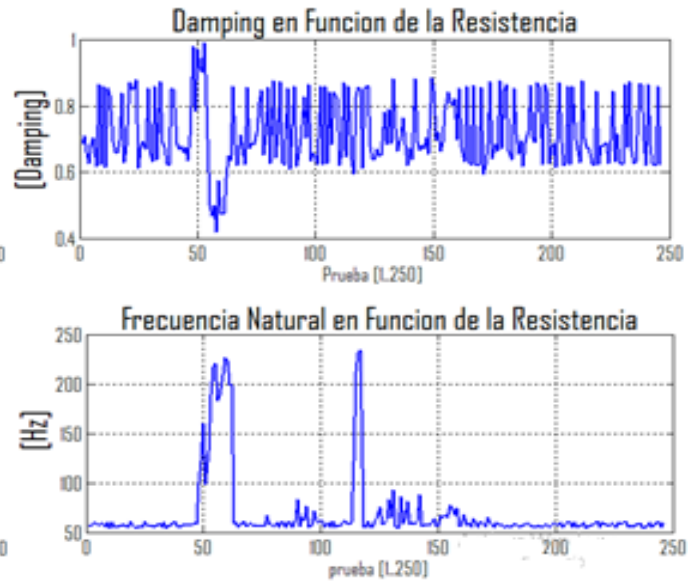
## Experimentos 6

con sensor sin ajustar.

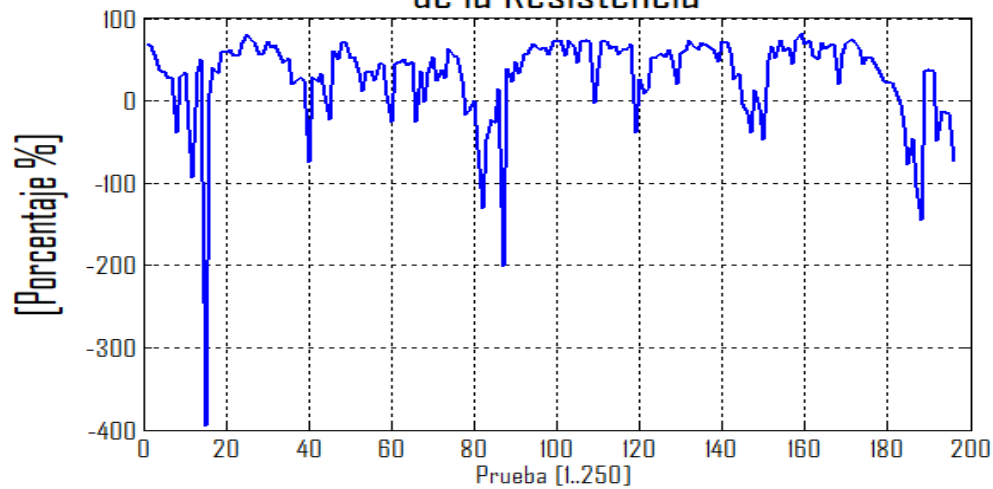


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



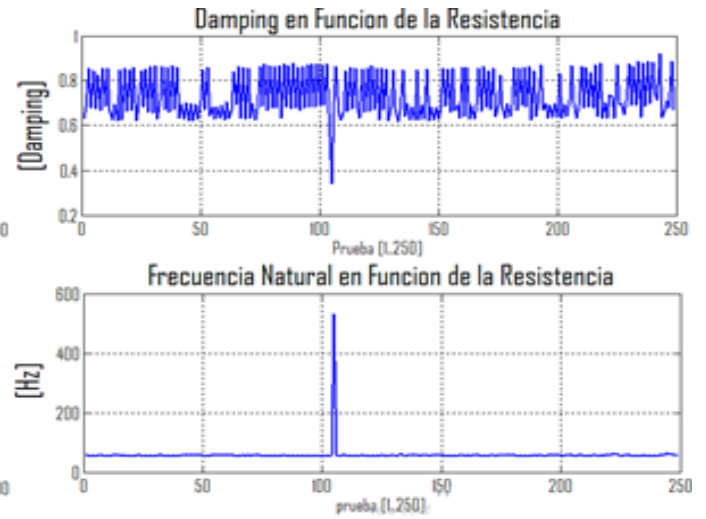
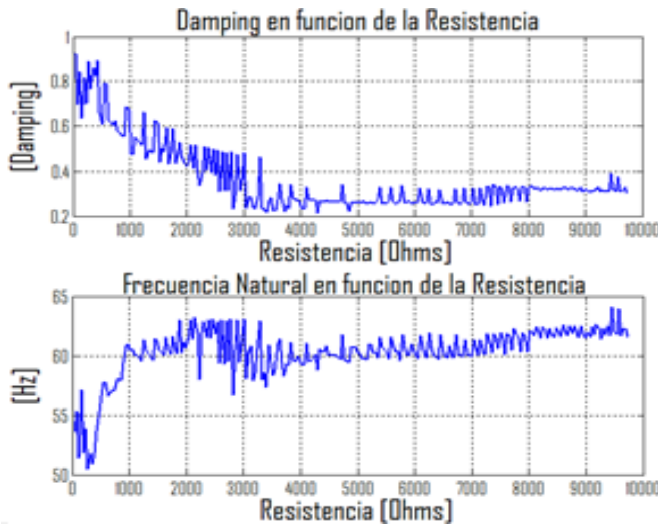
# Anexo C: Prueba Roca de 10Kg con sensor sin ajustar, ajustado y porcentaje de ajuste.

## Experimento 1

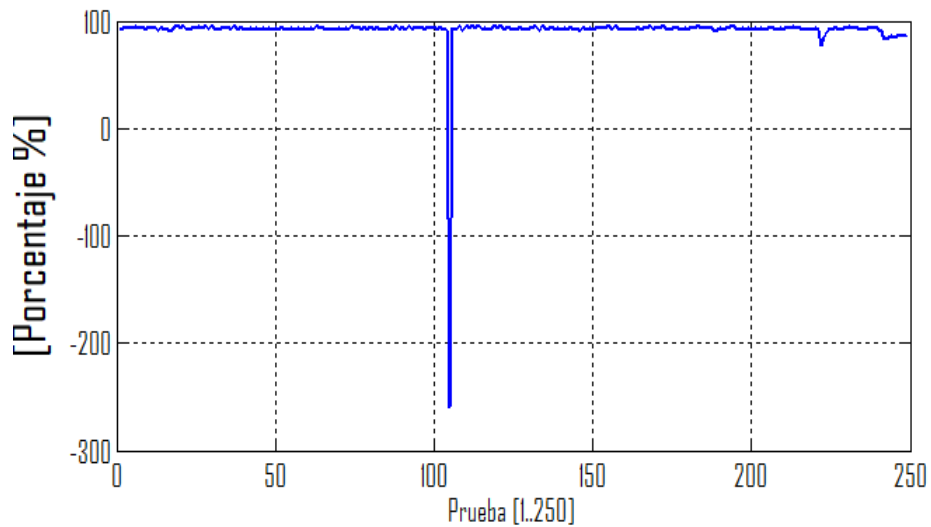
con sensor sin ajustar.

con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

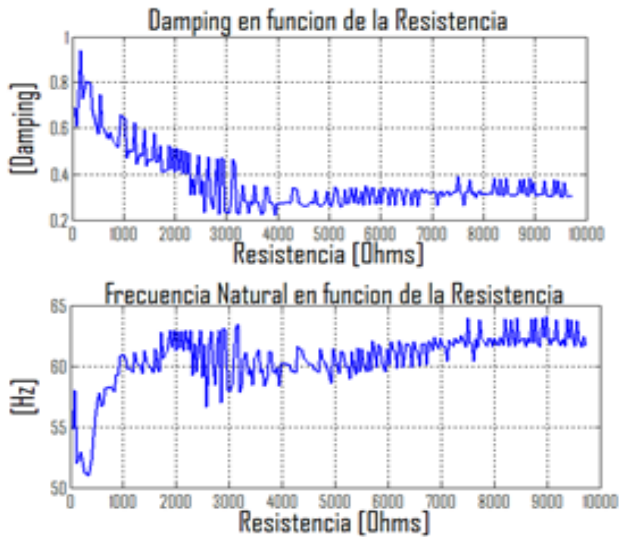


## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



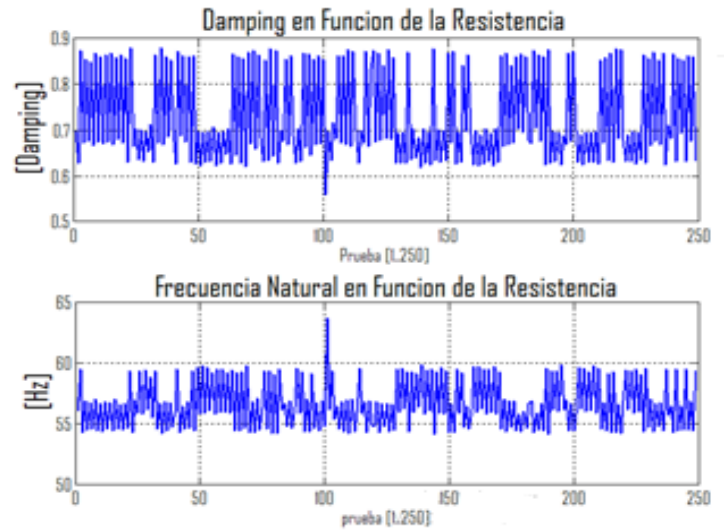
## Experimento 2

con sensor sin ajustar.

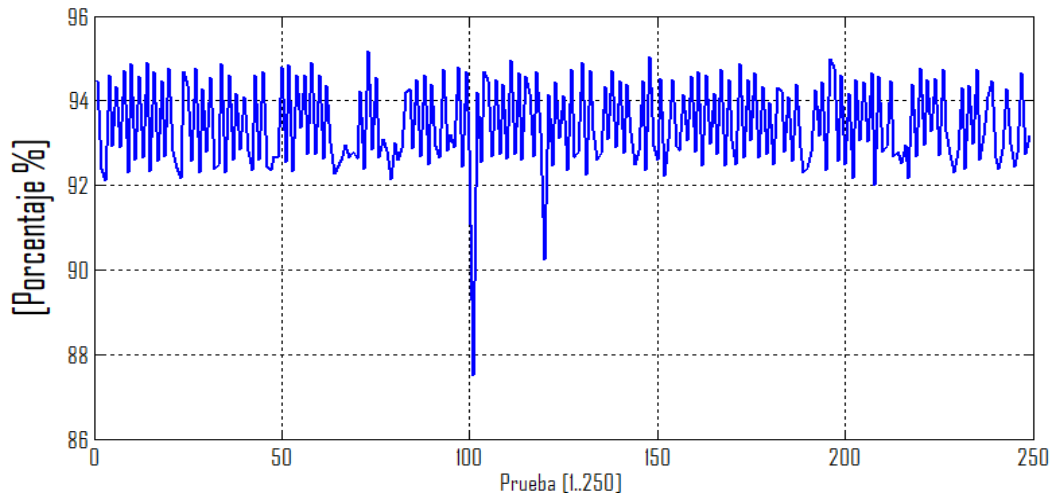


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

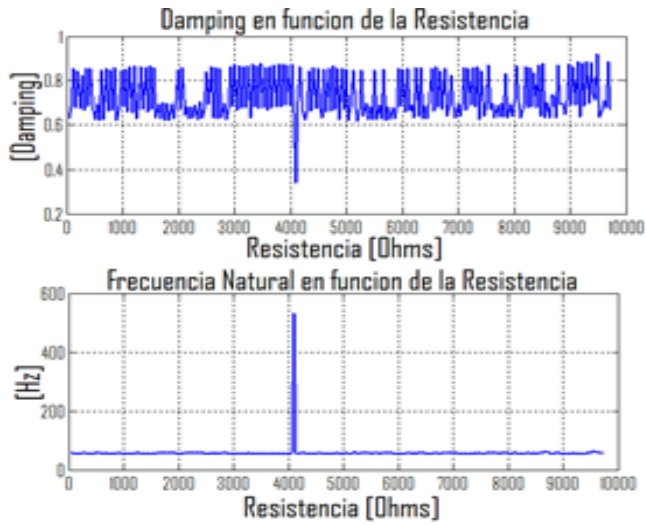


### Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



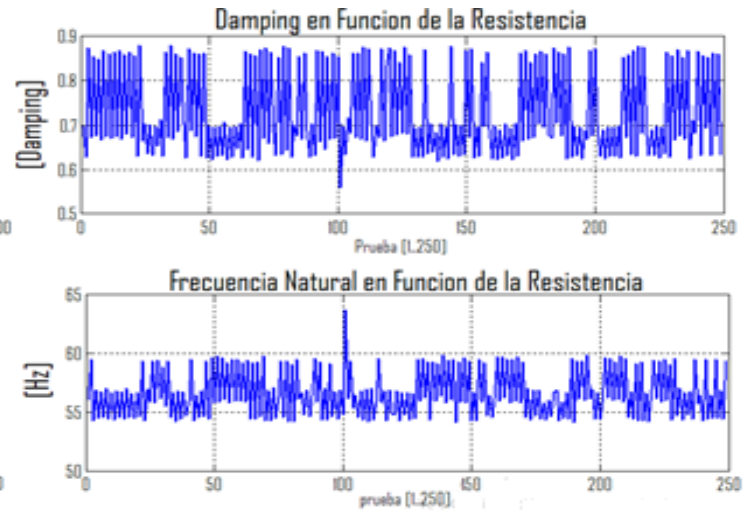
### Experimento 3

con sensor sin ajustar.

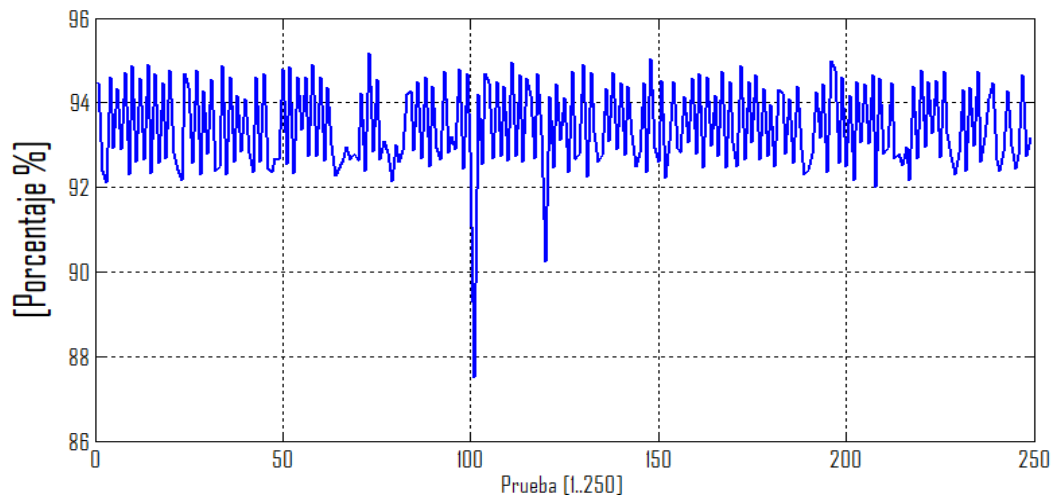


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



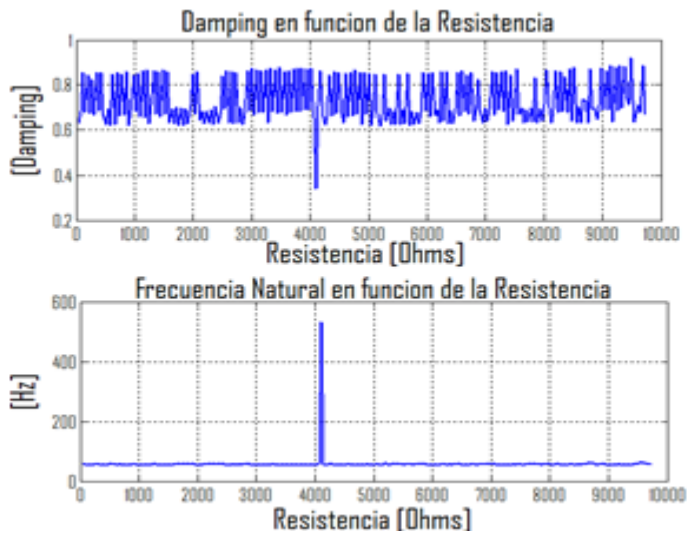
### Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia





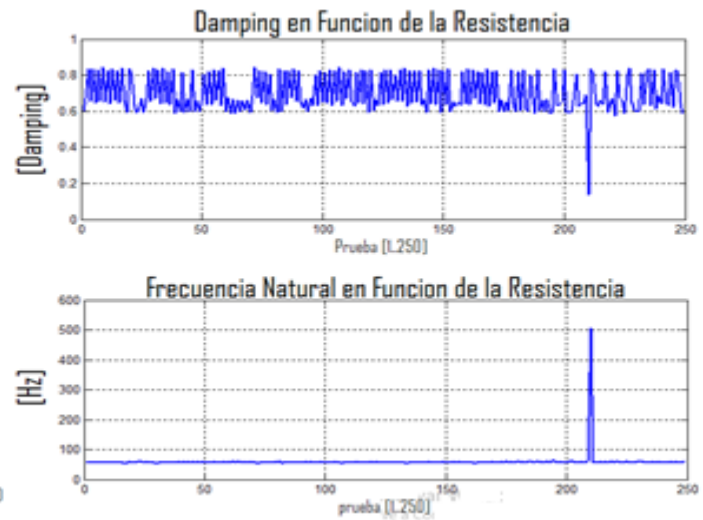
## Experimento 4

con sensor sin ajustar.

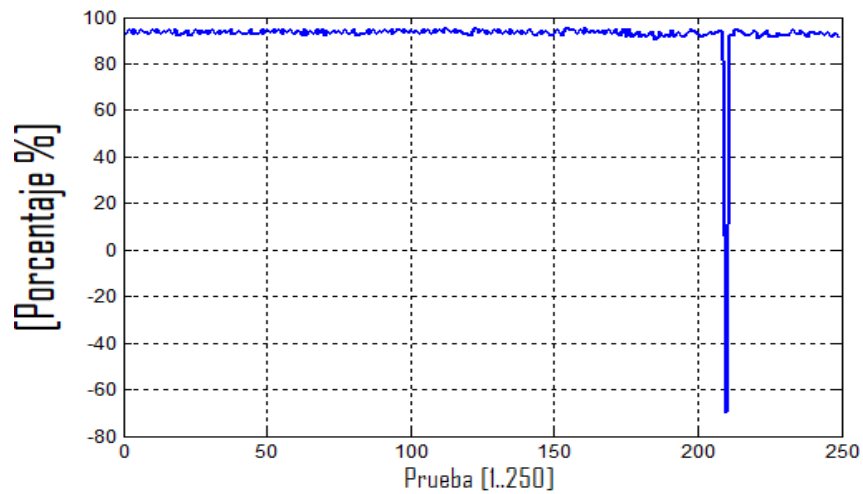


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

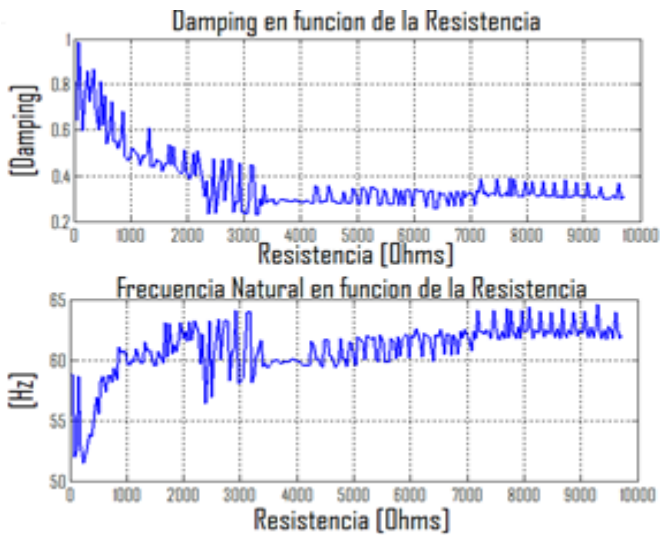


## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



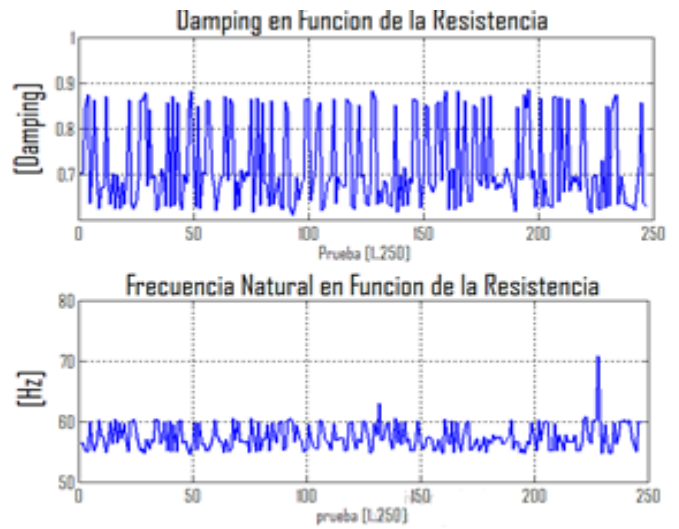
## Experimento 5

con sensor sin ajustar.

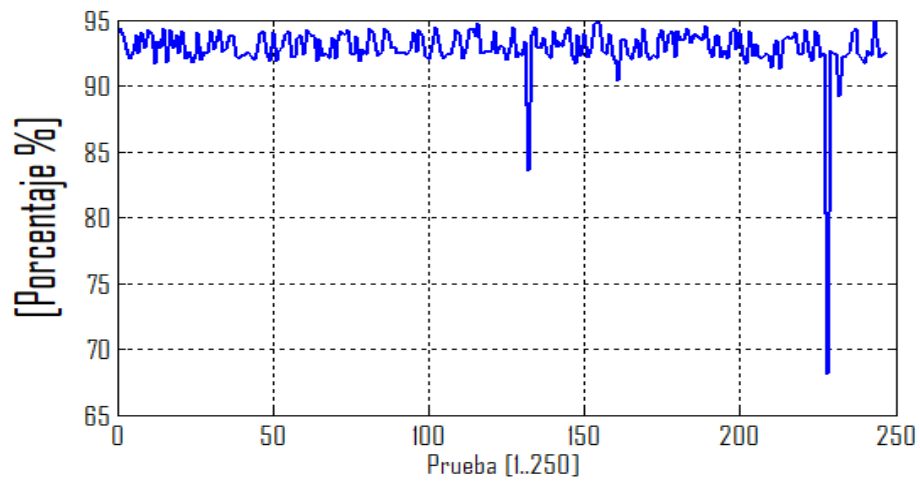


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

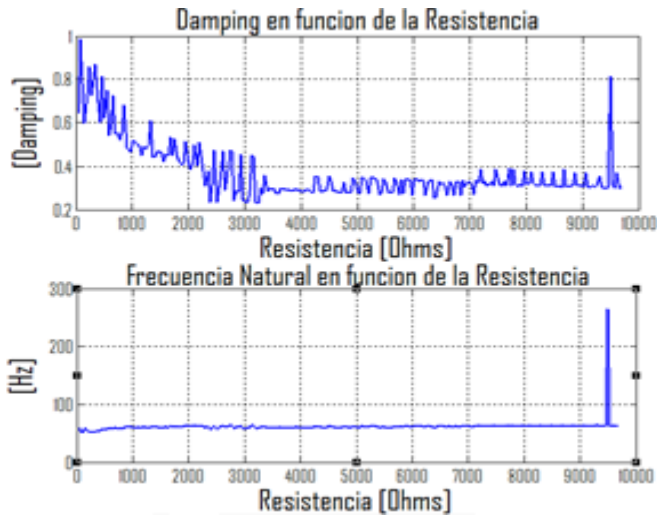


## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



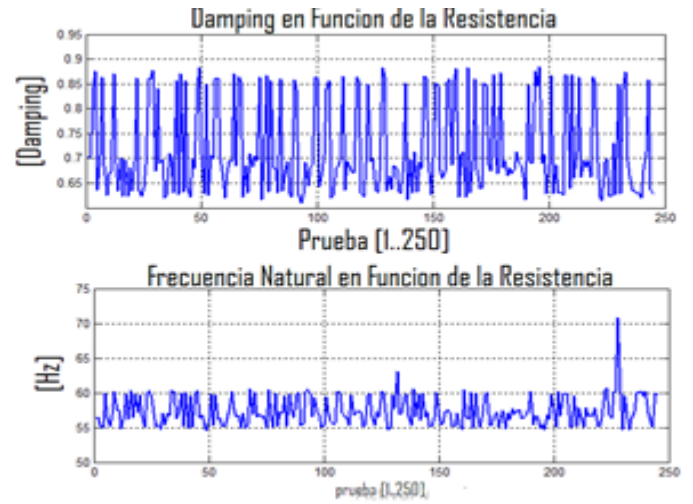
## Experimento 6

con sensor sin ajustar.

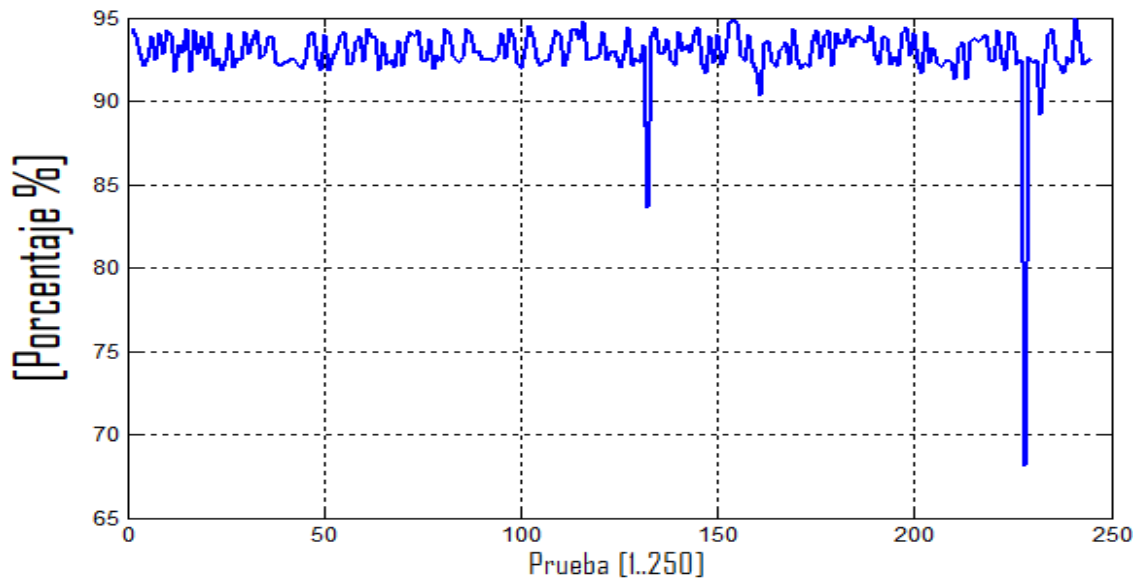


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



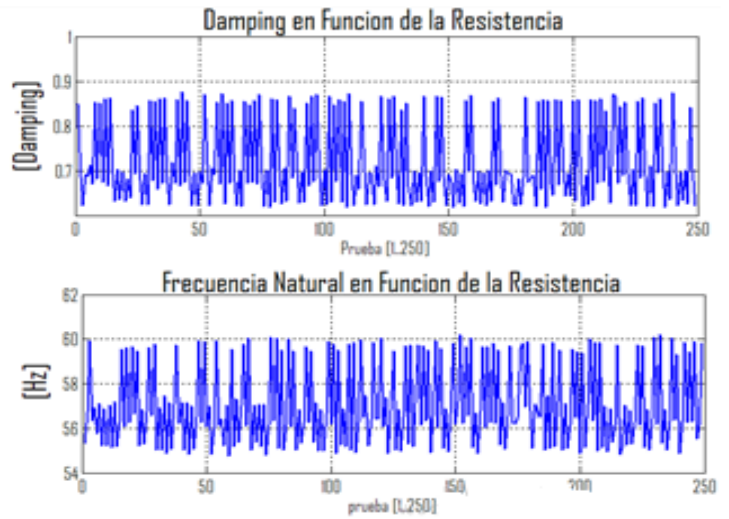
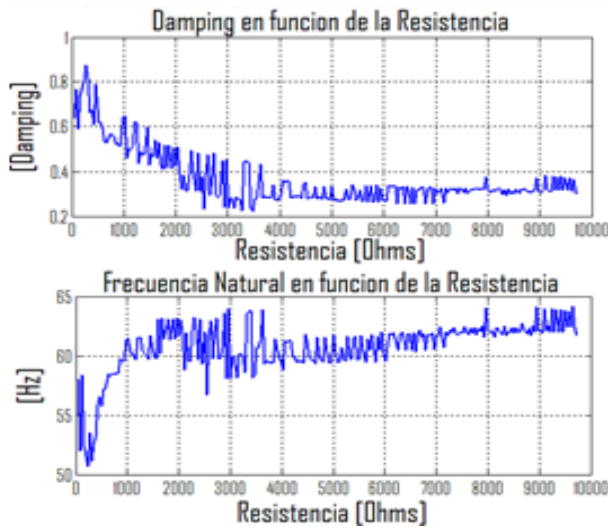
**Anexo D:** Prueba de Falla Geológica con sensor sin ajustar, ajustado y porcentaje de ajuste.

**Experimento 1**

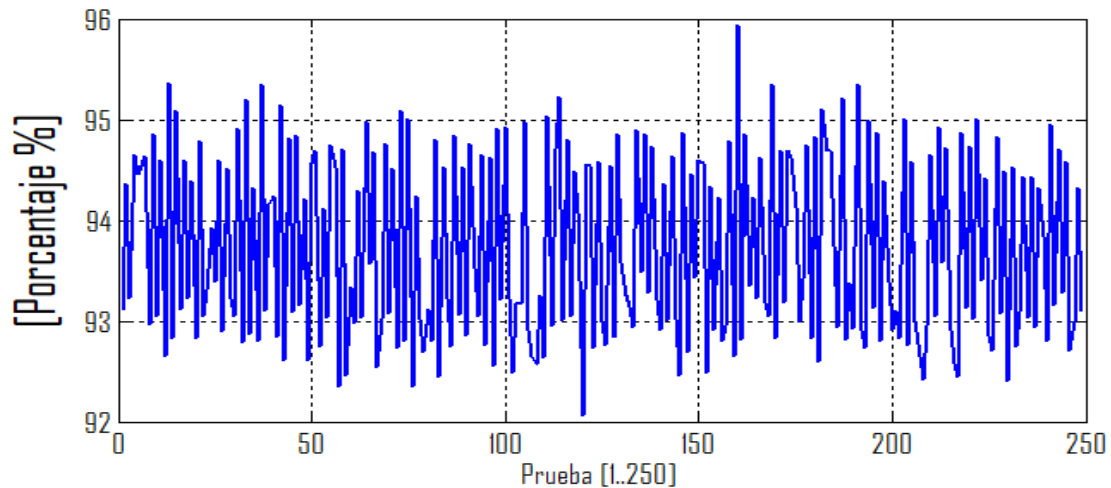
con sensor sin ajustar.

con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

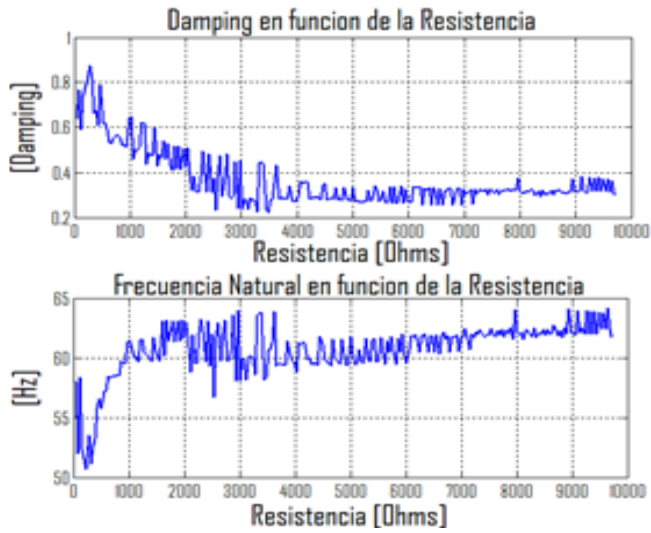


**Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia**



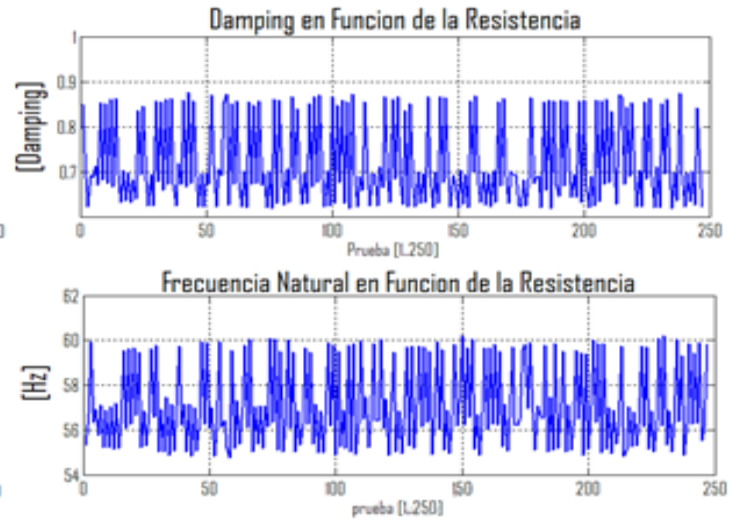
## Experimento 2

con sensor sin ajustar.

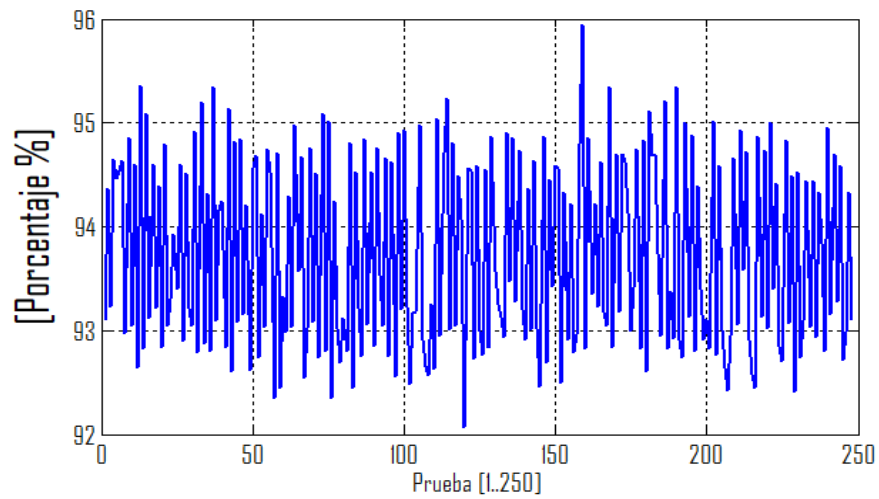


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

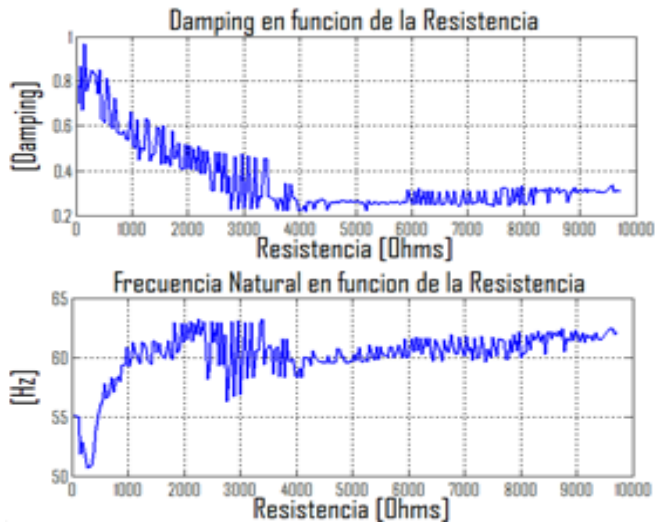


## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



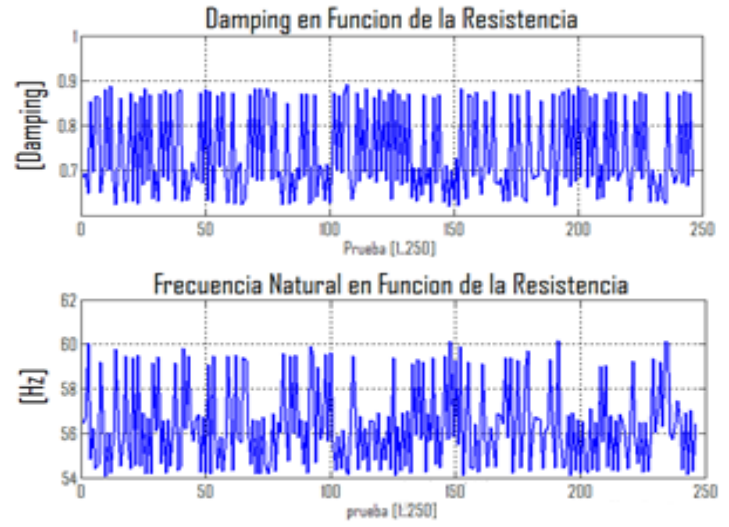
### Experimento 3

con sensor sin ajustar.

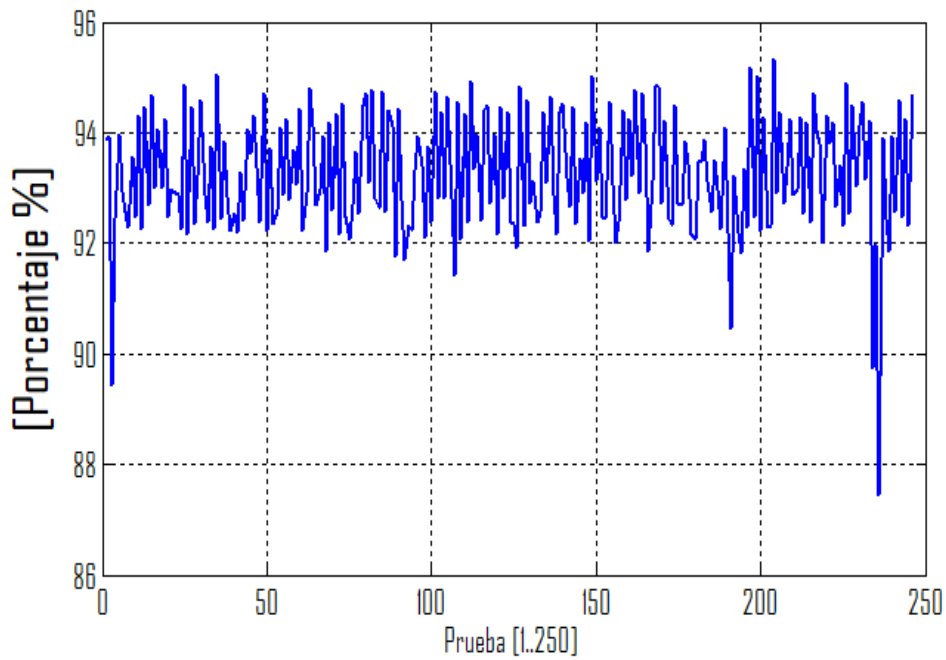


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

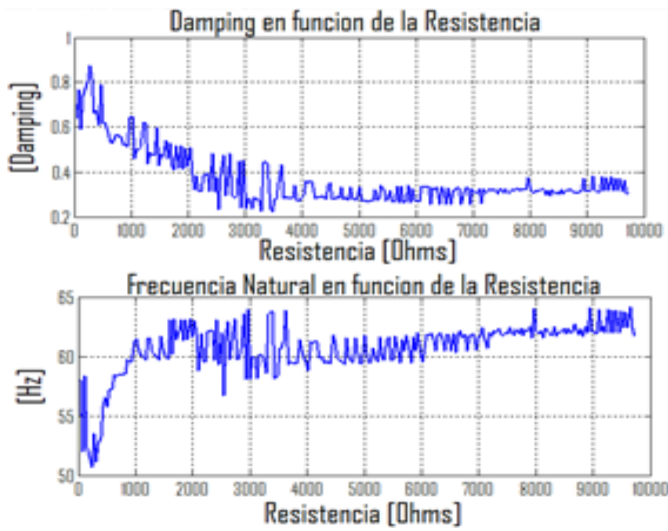


### Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



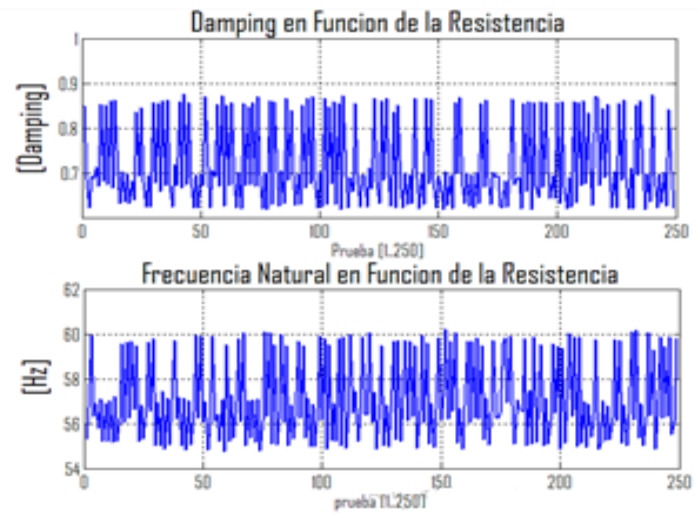
## Experimento 4

con sensor sin ajustar.

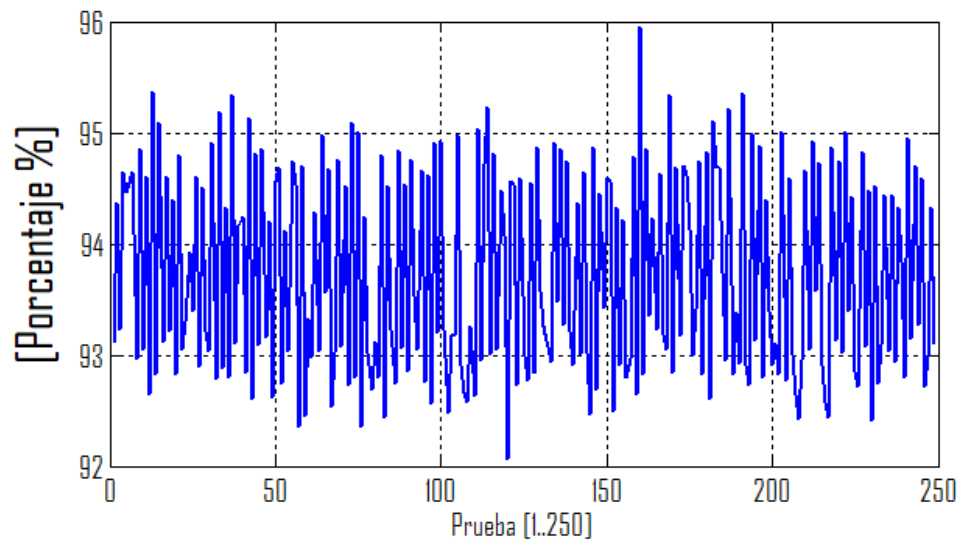


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.

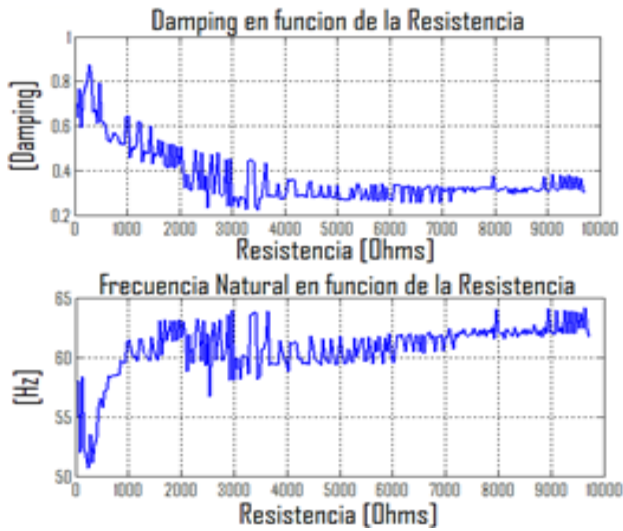


## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia



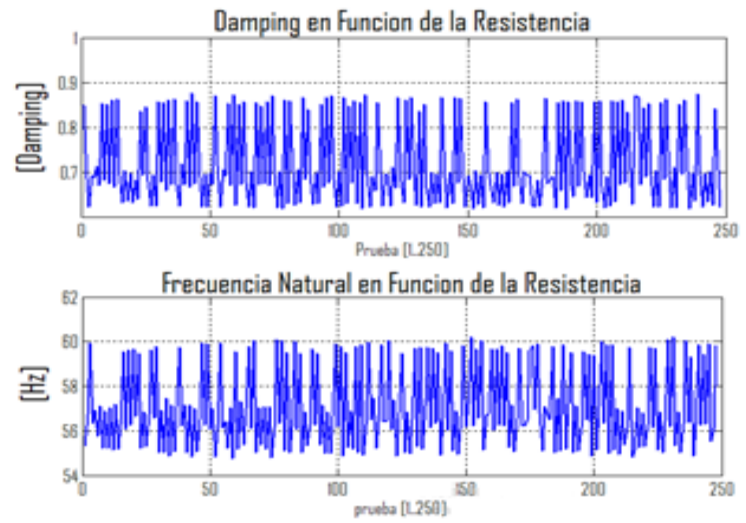
## Experimento 5

con sensor sin ajustar.

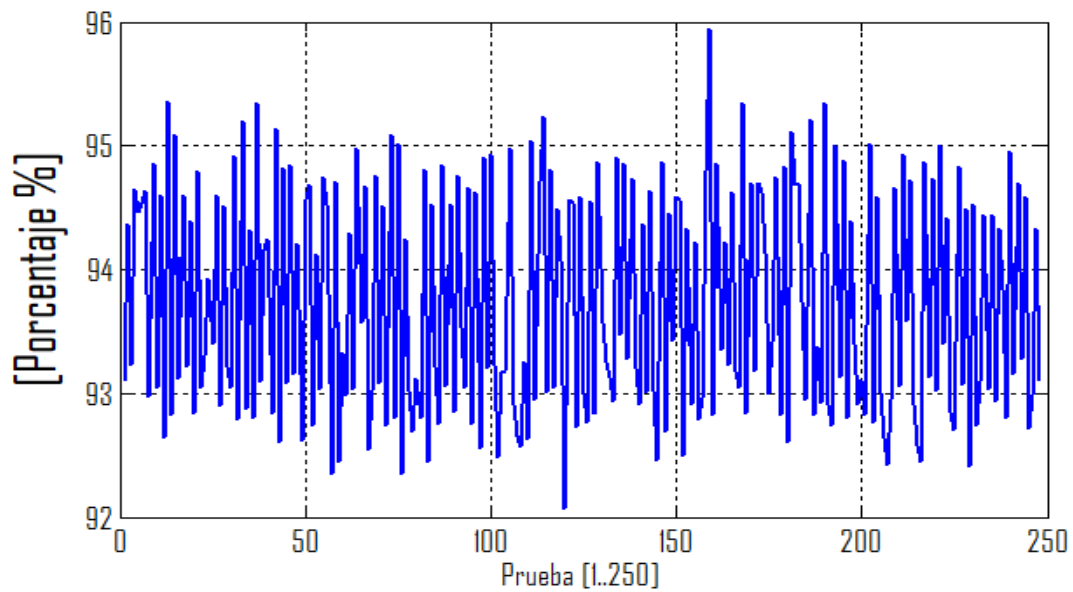


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



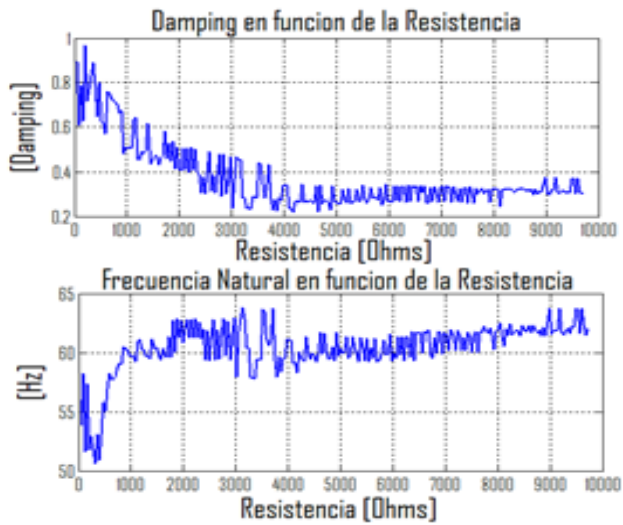
## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia





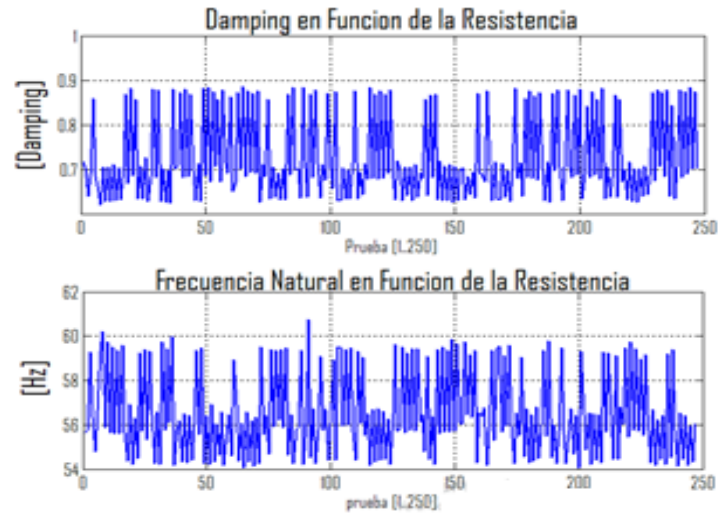
## Experimento 6

con sensor sin ajustar.

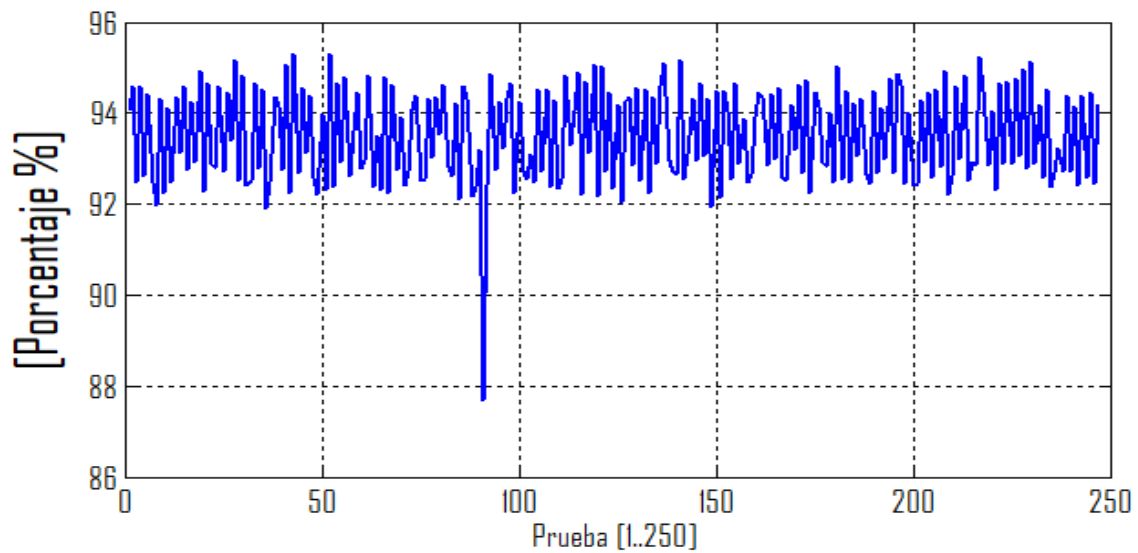


con sensor ajustado y porcentaje

de ajuste.



## Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia





**Anexo F:** Algoritmo para el cálculo de los parámetros del sensor sin ajustar.

```
clc;
clear all;
close all;
Fid = fopen('Calibra.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');
L=length(Fid)
Fid = Fid(1:L,2);
YAll = reshape(Fid,252,[]);
YAll = YAll(:,end:-1:1);
YAll(1:10,:) = [];
Ts = 1E-3;
% Funcion de Ajuste
Fit = @(X,Y) 100*(1 - norm(Y-X)/norm(Y-mean(Y)));
% 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;
%   R(i)           = 675;
    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('Fit level      : %10.4f \n',Fit_Level(i));
    fprintf('Damping        : %10.4f \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))         = [];

%% Parámetros
% Damping

```

```

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

%% Porcentaje de Ajuste
figure; plot (R, Fit_Level,'LineWidth',2); grid on;
title ('Porcentaje de Ajuste en funcion de la Resistencia');
xlabel ('Resistencia [Ohms]');
ylabel('[Porcentaje]');
Frecuencia = mean (Wno/(2*pi))
Damping=mean (Xio)
porcentaje= mean (Fit_Level)
% Calculo Xio y So^2
m = 11E-3;
r = 375;
Wo = mean (Wno);
AlphaR = @(R) 1. / (2*(r + R) *m*Wo);
Col_Alpha = Alpha(R);
Col_Ones = ones(size(Col_Alpha));
C = [Col_Ones, Col_Alpha];
Params = C\Xio;

```

```
% Calculo resistencia de Carga
```

```
Xi = Params(1);
```

```
SoSquare = Params(2);
```

```
Xideseado = sqrt(2)/2;
```

```
RNew = SoSquare / (2*m*Wo*(Xideseado - Xi)) - r;
```

```
fprintf('\n\n Para obtener un damping de %.3f se requiere una resistencia de %.2f  
ohms \n',Xidesired,RNew)
```

## Anexo G: Algoritmo para el cálculo de los parámetros del sensor ajustado.

```
clc;
clear all;
close all;

Fid          = fopen('calibra.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,252, []);
YAll        = YAll (: end: -1:1);
YAll (1:10, :)      = [];

Ts          = 1E-3;
%función fit
Fit         = @ (X, Y) 100*(1 - norm(Y-X) /norm(Y-mean(Y)));
% estimación modelo ARX
NMin        = 250;
NMax        = 498;
NExp        = NMax - NMin + 1;
% Modelo ARX
NData       = length (YAll (:,1));
R           = zeros(NExp,1);
Fit_Level   = zeros (NExp,1);
Xio         = zeros (NExp,1);
Wno         = zeros (NExp,1);
Order       = 5;
NumFilt     = (1/Order) * ones(1, Order);
DenFilt     = 1;
for i = 1:NExp,
    Y        = YAll(:,i);
    [A1,A2,YMeasured,YHat] = least_squares_estimation_arx_model(Y);
    NData    = length(YMeasured);
    Time     = (0:1:(NData-1))' * Ts;
    % Damping y FrecuenciaNatural
%   R(i)     = (49/256) * 10E3;
```

```

R(i) = (506.81/256) * 10E3;
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(Xio,'LineWidth',2); grid on;
title('Damping en Funcion de la Resistencia');
xlabel('Experiment [1..250]');
ylabel('Damping');
% Frecuencia Natural
subplot(2,1,2); plot(Wno/(2*pi),'LineWidth',2); grid on;

title('Frecuencia Natural en Funcion de la Resistencia');
xlabel('pruebas [1..250]');
ylabel(' [Hz]');

%% porcentaje de ajuste
figure; plot(Fit_Level,'LineWidth',2); grid on;
title('Porcentaje de Ajuste en Funcion de la Resistencia');
xlabel('Experiment [1..250]');
ylabel(' [Porcentaje %]');

```



## Anexo H: Obtencide parámetros del geófono

```
function [Xi,Wn] =
get_geophone_parameters_from_discrete_time_arx_model(a1,a2,Ts)
Options = {'Matlab','Arduino'};
Style = Options{1};
switch Style
case 'Matlab'
% Polos modelo ARX

P = roots([1 a1 a2]);
P1 = P(1);
% representacion polar
R = abs(P1);
Theta = angle(P1);
% Damping
Xi = sqrt(log(R)^2 / (log(R)^2 + Theta^2));
% Frecuencia Natural
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));
% Frecuencia Natural
Wn = Theta / (Ts*sqrt(1 - Xi^2));
end
end
```

## Anexo I: Modelo ARX

función [A1, A2, YMeasured, YHat] = least\_squares\_estimation\_arx\_model(Y)

```
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;
    %% 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
% Determinante
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

```

## Anexo J: Programa Psoc

```
#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)

void resistencia(int16 R);
void caracterizacion(void);
void regresion (char Set);
void Calibrada (char into);
void conversion (void);
void envio(int16);
int16 j;
char dat[15],Flag=0,Flag1=0;//se declaran las banderas
uint8 rxstate;
char buf[32];
char num[2];// se utiliza para deterinar si esta en el caso de calibrar cuando vale 0
o en modo normal cuando vale 1
int sum=240;
int resi;
uint16 cmd=0x1100;// para utilizacion de la resistencia digital
uint16 binData,binCode;
char leer[5];//vector de 5 posiciones para almacenarel numero de la resistencia
llega la resistencia y el caso si es uno o cero
char caso=1;
char n = 235;
int16 res,mVolts;
CY_ISR(Rx_Interrupt)//interrupcion cuando ocurra un evento el evento queda
guardado en letter yeste lo ingresa en el vector
{
    char mensaje;
    mensaje = Usart_GetChar();
    leer[j]=mensaje;
    j += 1;
    if (mensaje == '\n')
    {
        Flag1=1;
        j=0;
    }
}
```

```

}
CY_ISR(MY_ISR)
{
    Flag = 1;
}

int main(void)
{
    Timer_1_Init();    //INICIALIZA EL TIMER
    Timer_1_Start();
    CyGlobalIntEnable; //interrupciones globales
    isr_UartRx_StartEx(Rx_Interrupt);
        isr_1_StartEx(MY_ISR); //INICIALIZA LA INTERRUPCION
    SPIM_1_Start();
    Usart_Init();
    Usart_Start();

    Adc_Start();
    Adc_StartConvert();
    Adc_IsEndConversion(Adc_WAIT_FOR_RESULT);
    AMux_Start();
    memset(dat,0,sizeof(dat));
    //char8 ch;
    Pin_3_Write(1);
    caso=0;
    for(;;)
    {
        if(Flag1==1){
            strncpy(num,leer,2);
            int dar = strtol(num,NULL,16);
            sum = dar;
            caso=leer[2]-48;
            Flag1=0;
        }
        switch(caso)
        {
            case 0:
                Pin_3_Write(1);
                resistencia(sum);
                conversion();
                caso=0;
                break;
            case 1:
                Pin_3_Write(1);
                regresion(0);
                caso=0;

```

```

        break;
    case 2:
        Pin_3_Write(1);
        Calibrada(n);
        caso=0;
        break;
    }
}
}
void resistencia(int16 R) {
    uint16 cmd=0x1100;
    uint16 binCode;
    // Establecer la resistencia digital a un valor dado
    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);
}
void caracterizacion(void)
{
    int16 i=0;

    AMux_Connect(0);
    CyDelay(100);
    AMux_Disconnect(0);
    while(i<=240)
    {

        if(Flag)
        {
            conversion();
            Flag = 0;
            i++;
        }
    }
    i = 0;
}

```

```

}
void conversion (void)
{
    res=Adc_GetResult16();
    mVolts=Adc_CountsTo_mVolts(res);
    envio(mVolts);
return;
}
void regresion (char Set)
{
    char8 n,ch;

    for (n=1;n<=250;n++)
    {
        resistencia(n);
        Usart_PutString("S");
        Usart_PutCRLF(0x0C);
//    Usart_PutCRLF(0xD);
        envio(n);
        caracterizacion();
//    CyDelay(50);
    }
    n=0;
    return;
}
void Calibrada (char into)
{
    char8 n,ch;

    ch=into;
    for (n=1;n<=250;n++)
    {
        resistencia(into);
        Usart_PutString("S");
        Usart_PutCRLF(0x0C);
        Usart_PutCRLF(0xD);
        envio(into);
        caracterizacion();
        CyDelay(50);
    }
    n=0;
    return;
}
}

```

