

**“OBTENCIÓN DE UN VECTOR DE VELOCIDAD A PARTIR DEL DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA LA
MEDICIÓN DE VIBRACIONES DE REFLEXIÓN SÍSMICA”**



**RHONALTH FRANKLIN ARTEAGA RIVERA
WILBER BURBANO MOLANO**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
POPAYÁN, MAYO 2017**

**“OBTENCIÓN DE UN VECTOR DE VELOCIDAD A PARTIR DEL DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA LA
MEDICIÓN DE VIBRACIONES DE REFLEXIÓN SÍSMICA”**



RHONALTH FRANKLIN ARTEAGA RIVERA

WILBER BURBANO MOLANO

Trabajo de grado para obtener el título de Ingenieros en Electrónica

Directora

Ing. Luisa Fernanda Pineda Calvache.

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

POPAYÁN, MAYO 2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

Popayán 2017

El director y los jurados del trabajo de grado en modalidad trabajo de investigación denominado "OBTENCIÓN DE UN VECTOR DE VELOCIDAD A PARTIR DEL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES DE REFLEXIÓN SÍSMICA", realizado por los estudiantes RHONALTH FRANKLIN ARTEAGA RIVERA y WILBER BURBANO MOLANO, 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.

Ing. _____

Jurado Evaluador

Ing. _____

Jurado Evaluador

Ing. Luisa Fernanda Pineda Calvache

Directora

DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado a personas muy especiales que siempre creyeron en mis capacidades y que siempre han estado apoyándome constante para que este sueño se convirtiera en realidad.

A **Dios** por ser siempre ese sentimiento de alegría, tranquilidad y serenidad en cada momento de esta etapa de vida que esta próxima a culminar espero ser digno por tan valioso esfuerzo.

A **Walter Grooth Arteaga Castro**, mi querido padre y nunca olvidado, que desde el lugar que estés siempre sentí tu apoyo en este proceso de mi vida. Te amo papito.

A **María Olivia Rivera**, mi madre querida, la mujer más fuerte de todas que a pesar de que perdió a su esposo tan joven nunca desfalleció para sacar a delante a sus hijos, eres un gran ejemplo de vida. Todos los días le pido a Dios que nunca me faltes. Te amo

A mis apreciados hermanos de mi alma, **Yenid Yaned Arteaga, Walter Grooth Arteaga y Faber Arteaga**, que con su ejemplo, dedicación y palabras de aliento han sido la guía y el apoyo cuando más lo he necesitado.

A mi pequeño motor **Dylan Alejandro Arteaga Girón**, mi más preciado tesoro por ser mi fuente de energía, por él y para el van dedicados todos mis logros.

A **Estefany Girón Muñoz**, mi amor por ser ese apoyo y compañía cuando más te 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 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 directora del trabajo de grado, Ing. **Ing. Luisa Fernanda Pineda Calvache**, 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, Wilber Burbano porque sin él no hubiera sido posible la culminación de este proyecto final

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

ATT: Rhonalth Franklin Arteaga Rivera

DEDICATORIA

Al todo poderoso por ser merecedor de toda honra y toda gloria.

A mis padres **FELIPE BURBANO NARVAEZ Y OLINDA MOLANO** por su apoyo incondicional y permanecer a mi lado en todo momento.

A mi hermana **AMALFY BURBANO MOLANO** por su apoyo moral y emocional, por ser la persona que estuvo en cada momento de este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Al todo poderoso por brindarme la sabiduría y la fuerza para culminar una etapa más en mi vida académica.

A la CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA por ser la institución que me abrió las puertas para mi desarrollo profesional.

A todos mis maestros que durante toda la carrera aportaron sus conocimientos necesarios para la culminación de esta meta.

A mi compañero RONALTH FRANKLIN ARTEAGA por su excelente disposición y empatía, ya que sin él no hubiera sido posible culminar este proceso.

A nuestra directora de proyecto Ing. Luisa Fernanda Pineda Calvache, por su paciencia, comprensión y el acompañamiento total a lo largo de este proceso.

A mis amigos y hermanos en la fe quienes creyeron en mí.

ATT: **Wilber Burbano Molano**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	3
1.1. Planteamiento del problema	3
1.1.1. Pregunta de investigación.	4
1.2. Justificación.	4
1.3. Objetivos.	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes.	6
2.2. Bases teóricas	14
2.2.1. Sismología de exploración.....	14
2.2.2. Ondas sísmicas	14
2.2.3. Principios básicos de métodos sísmicos	16
2.2.4. Método sísmico.....	17
2.2.5. Método sísmico por reflexión	18
2.2.6. Método sísmico por Refracción	19

2.2.7. Sensor geófono	19
CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN HARDWARE DEL SISTEMA	20
3.1. Diseño Hardware	20
3.2. Selección de componentes del sistema	22
3.2.1. Selección de elemento sensor.....	22
3.2.2. Selección de componentes tarjeta de adquisición	27
3.3. Modelo Matemático.....	38
3.3.1. Modelo matemático del elemento sensor	40
3.4. Caracterización Elemento Sensor.....	47
3.5. Implementación Hardware Del Sistema.....	53
3.5.1. Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición.....	54
3.5.2. Diseño de circuito impreso de la tarjeta de adquisición	54
CAPÍTULO IV: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN SOFTWARE DEL SISTEMA	58
4.1. Programación tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059.....	58
4.2. Programación interfaz gráfica de usuario.....	62
CAPÍTULO V: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	68
5.1. Pruebas En Campo.....	68
5.1.1. Procedimiento.....	68
5.1.2. Prueba #1	69
5.1.3. Prueba #2	76
5.1.4. Prueba #3	79

5.2. Conclusiones	84
5.3. Trabajos futuros	85
Bibliografía	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Módulo Inalámbrico para el Sensado de Vibraciones Superficiales en Suelos. Fuente: [7]	7
Figura 2. Módulo ADQ para nodos esclavo. Fuente: [8].....	8
Figura 3. Terraloc®Pro De ABEM Fuente: [9]	9
Figura 4. Unidad de Amplificación y Unidad de Adquisición y Procesamiento de Datos. Fuente: [2].....	10
Figura 5. Sistema de instrumentación inalámbrico para monitoreo y evaluación estructural de puentes. Fuente: [6].....	11
Figura 6. Arreglo sísmico en base a microcontroladores RFPIC. Fuente [10].....	11
Figura 7. Forma de onda P y forma de onda S. Fuente [12].	15
Figura 8. Conversión de una onda incidente P. Fuente [15]	17
Figura 9. Diagrama en bloques del sistema	20
Figura 10. Diagrama en bloques tarjeta de adquisición de datos.....	21
Figura 11. Geófono SM-24. Tomado de datasheet del fabricante.....	26
Figura 12. Carcasa para geófono SM-24. Tomado de página de distribuidor RT Clark Geophysical Equipmet.	27
Figura 13. Tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059. Fuente www.cypress.com	33
Figura 14. Partes frontal y posterior de sistema de almacenamiento en microSD	34
Figura 15. Módulo de comunicación por RF HC12. Fuente propia.....	36
Figura 16. Foto conexión conversor serie-USB y HC12. Fuente propia.....	37
Figura 17. Amortiguación débil. Fuente propia.....	39

Figura 18. Modelo mecánico de un geófono. Fuente: Dinámica de sistemas de Ogata	41
Figura 19. Calibración de alta precisión. Fuente propia	43
Figura 20. Circuito para excitación de geófono. Fuente propia	48
Figura 21. Respuesta al impulso de cuatro geófonos	48
Figura 22. Espectro de frecuencias de los geófonos con resistencia de carga infinita. Fuente propia.....	50
Figura 23. Circuito para caracterización con resistencia de carga. Fuente propia	51
Figura 24. Respuesta al impulso del geófono con resistencia de carga de 1339. Fuente propia	51
Figura 25. Figura transformada de Fourier geófono con resistencia de carga de 1339Ω.....	52
Figura 26. Respuesta de geófonos con resistencia de carga 1562 Ohms	53
Figura 27. Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición. Fuente propia	54
Figura 28. Caras anterior y posterior de tarjeta de adquisición. Fuente propia.	55
Figura 29. Capa de componentes tarjeta de adquisición. Fuente propia.	56
Figura 30. Tarjeta de adquisición ensamblada. Fuente propia.....	57
Figura 31. Bloques de programación PSoC Creator. Fuente propia	59
Figura 32. Asignación de pines al controlador. Fuente propia	60
Figura 33. Diagrama de flujo algoritmo implementado. Fuente propia	61
Figura 34. Diagrama de flujo interfaz gráfica de usuario. Fuente propia.	62
Figura 35. Panel frontal para la configuración de las tarjetas de adquisición. Fuente Propia.....	64

Figura 36. Código para configuración de tarjetas de adquisición. Fuente Propia .	65
Figura 37 Interfaz para captura y almacenamiento de información. Fuente Propia	66
Figura 38. Interfaz de visualización de gráficas. Fuente propia.....	67
Figura 39. Verificación de cables de alimentación y de conexión con geófonos. Fuente Propia.....	70
Figura 40. Verificar distancia entre geófonos. Fuente Propia.....	70
Figura 41. Medición de terreno para la disposición de los geófonos. Fuente Propia	71
Figura 42. Fuente de ondas artificiales. Fuente Propia	71
Figura 43. Encendido de fuente de alimentación. Fuente Propia.	72
Figura 44. Generación artificial de las ondas. Fuente Propia.....	73
Figura 45. Respuesta de los geófonos la excitación del golpe. Fuente Propia	74
Figura 46. Espectro de frecuencias de la prueba. Fuente Propia.....	75
Figura 47. Disposición de los geófonos. Fuente Propia	76
Figura 48. Respuesta de los geófonos a la excitación de la fuente cerca al geófono 4. Fuente Propia.....	77
Figura 49. Espectro de frecuencias de la prueba #2. Fuente Propia.....	79
Figura 50. Disposición de la fuente en la mitad de los nodos. Fuente propia.	80
Figura 51. Respuesta de los geófonos a la excitación de la fuente. Fuente Propia	81
Figura 52. Espectro de frecuencias de la prueba #3. Fuente Propia.....	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aportes a proyecto desarrollado de trabajos relacionados en estado del arte	12
Tabla 2. Relación parámetro – peso sensores geófonos.	23
Tabla 3. Características geófonos.....	23
Tabla 7. Resultado evaluación sensor geófono.....	26
Tabla 5. Características tarjetas de desarrollo	29
Tabla 6. Peso de parámetros de selección tarjeta de desarrollo.....	31
Tabla 7. Resultado evaluación tarjetas de desarrollo.....	32
Tabla 8. Relación ventajas y desventajas Memoria EEPROM.....	34
Tabla 9. Relación ventajas y desventajas sistema de almacenamiento en microSD	34
Tabla 10. Relación parámetro – peso módulos de comunicación RF	35
Tabla 11. Características módulos de comunicación RF	36
Tabla 12. Resultados evaluación módulos de comunicación RF	36
Tabla 13. Características elemento sensor	47
Tabla 14. Formato de trama de comunicación entre aplicación de PC y tarjeta de adquisición.	63
Tabla 15. Lista de materiales para prueba #1	68

RESUMEN

El proyecto descrito en el presente documento está orientado al desarrollo de un sistema electrónico que permite realizar un proceso de sensado de vibración de suelos y adquisición de datos, así mismo se aplica un modelo matemático para el procesamiento de los mismos, de modo que la información recolectada sea empleada en la obtención de un vector de velocidad que caracterice un suelo y permita determinar la viabilidad de una obra civil con equipos de bajo costo.

En los siguientes capítulos se presenta el proceso de diseño, implementación y validación del sistema, así como los resultados obtenidos durante todo el proceso de desarrollo. Se inicia con un capítulo dedicado al planteamiento del problema, luego se presenta un capítulo de marco teórico, posteriormente se encuentra un capítulo de diseño e implementación hardware, el siguiente capítulo trata el diseño e implementación software y en el último capítulo se tratan los resultados, conclusiones y trabajos futuros.

Palabras clave: Sensado de vibración de suelos, Vector de velocidad, Caracterización de suelos.

INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos más usados para la adquisición de información relevante de los suelos es el sísmico, el cual se basa en las diferencias de velocidad de propagación de las ondas elásticas en medios de constitución diferente. Por lo general los diferentes minerales tienen densidades y pesos específicos bastante parecidos; en cambio, los módulos elásticos son muy distintos; la velocidad de propagación de las ondas elásticas depende mucho del módulo de elasticidad y se correlacionan con él en forma bastante confiable, por lo que las medidas de propagación pueden poner en evidencia cambios en la naturaleza de los materiales y estratificaciones. [1]

En las aplicaciones del método sísmico se provocan las ondas elásticas por medios artificiales tales como impactos o explosiones. Las vibraciones que transmite el suelo se recogen en aparatos sensibles capaces de registrarlas e inscribirlas, llamados sismógrafos o geófonos. [1].

Según lo anterior a través del desarrollo de este proyecto se busca construir un sistema con una serie de sismógrafos de bajo costo, (en relación a las tecnologías comerciales existentes), que cuenten con comunicación inalámbrica para la transmisión de datos y una plataforma de visualización, de modo que al aplicar un modelo matemático a los datos recolectados, se obtenga un vector de velocidad que permita caracterizar un suelo.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1. Planteamiento del problema

Los mapas geológicos constituyen una información básica de gran importancia en el diseño de vías terrestres con trabajo de campo o con aerofotografías pueden determinarse los tipos de formaciones de suelos y rocas, así como sus límites y secuencias, lo cual proporcionara la primera idea en relación con las propiedades mecánicas de los suelos existentes en la zona que se proyecta la vía terrestre, lo mismo que la primera información sobre problemas de estabilidad. Por los mismos procedimientos es posible definir las estructuras geológicas de interés, deslizamientos de tierras anteriores, etc. Un estudio con suficiente detalle es, entonces, el primer paso obligado en el proyecto de una vía terrestre. La elaboración de estos estudios debe verse invariablemente como económica e imprescindible [1].

Por otro lado, la determinación de las propiedades dinámicas del subsuelo permite utilizar estos datos en el análisis de la amplificación sísmica de un lugar y por lo tanto de la vulnerabilidad sísmica de un sitio en particular [2].

Debido a la importancia de los aspectos mencionados anteriormente, se han desarrollado herramientas que permiten adquirir datos relevantes para analizar el comportamiento de los suelos ante excitaciones generadas por una fuente emisora de ondas mecánicas (ondas superficiales) [3]. Se tiene desde módulos inalámbricos para el sensado de vibraciones superficiales en suelos basados en tecnología Xbee, hasta costosas herramientas como el sismógrafo digital multicanal para refracción Terraloc®Pro De ABEM y aunque se han realizado grandes desarrollos cada tecnología presenta una falencia ya sea porque se limitan a la adquisición de datos sin presentar una relación entre el desarrollo

realizado y el caso de estudio aplicado, por sus altos costos o las restricciones de distribución en un terreno debido a los cables que conectan los dispositivos.

1.1.1. Pregunta de investigación.

¿Cómo obtener un vector de velocidad que caracterice un suelo y permita determinar la viabilidad de una obra civil con equipos de bajo costo?

1.2. Justificación.

Se presenta una propuesta de gran utilidad, dado que permite la prospección rápida y relativamente económica de grandes extensiones de terreno. Su utilidad en proyectos de ingeniería civil tales como puentes, presas, centrales hidroeléctricas / termoeléctricas, etc. ha sido demostrada en el pasado al proveer información relevante sobre las condiciones geotécnicas de los lugares estudiados.

Por otro lado, la determinación de las propiedades dinámicas del subsuelo permite utilizar estos datos en el análisis de la amplificación sísmica de un lugar y por lo tanto de la vulnerabilidad sísmica de un sitio en particular [2]; esto último lo hace un proyecto de vital importancia en zonas de alta actividad sísmica como lo es el departamento del Cauca [4], debido a que por el sistema de Fallas del Cauca, Romeral, se deben considerar estudios de suelos exhaustivos previos a la construcción de cualquier obra civil.

Adicionalmente evaluar el comportamiento sísmico de los terrenos en un entorno urbano es, hoy en día, esencial para aspectos de reglamentación urbana, y para los parámetros específicos de diseño y construcción sismo resistente. Incluso la legislación así lo estipula para ciudades colombianas (AIS, 1998). [5]

También se debe tener en cuenta que después de que una obra de infraestructura civil esté construida, ésta debe ser operada adecuadamente al realizar inspecciones en forma regular, efectuar mantenimientos rutinarios y preventivos, y hacer las reparaciones necesarias en casos de detectar deterioro o daños en sus elementos. Estas actividades garantizan el buen funcionamiento, seguridad e integridad a lo largo de la vida útil de la obra civil. [6]

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

Obtener un vector de velocidad a partir del diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores para la medición de vibraciones de reflexión sísmica inducida.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Diseñar una red inalámbrica de sensores para la medición de vibraciones de reflexión sísmica inducida.
- Implementar una red inalámbrica de sensores para la medición de vibraciones de reflexión sísmica inducida.
- Analizar datos y obtener un vector de velocidad a partir de las vibraciones inducidas en un suelo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

2.1. Antecedentes.

Con el fin de obtener información relevante en la caracterización de suelos se han realizado diferentes desarrollos desde módulos inalámbricos basados en la tecnología Xbee hasta costosas herramientas como el sismógrafo Terraloc®Pro De ABEM. A continuación se describe cada uno de las tecnologías investigadas y se indica los aportes o diferencias que se proponen con el proyecto planteado en este documento.

Módulo Inalámbrico para el Sensado de Vibraciones Superficiales en Suelos [7]

Evalúa la viabilidad de implementar la tecnología XBee en el desarrollo de sensores acelerométricos inalámbricos (SAI) para el registro en superficie de las vibraciones que generan las ondas sísmicas que se propagan en el suelo. Se verificó experimentalmente la incidencia de la distancia y de la presencia de obstáculos en el radioenlace establecido entre un coordinador y un dispositivo final, mediante la determinación del número de paquetes recibidos exitosamente en diferentes condiciones de operación. Adicionalmente se determinó la influencia de la velocidad de transmisión sobre la frecuencia de muestreo de señales asociadas a vibraciones mecánicas provenientes de un terreno de prueba, a través de la medición de los periodos de muestreos efectivos del proceso “Conversión A/D – Transmisión”.

El Hardware está constituido por una plataforma de desarrollo Freescale Freedom con procesador ARM® Cortex™-M0+. El nodo registra, empleando conversores de 16 bits, tres señales analógicas provenientes de un acelerómetro triaxial

MMA7260QT, previamente acondicionadas, el cual puede responder adecuadamente a vibraciones con frecuencias de hasta 1 kHz. Empleando un protocolo definido por el usuario, es posible realizar la conversión A/D y la transmisión iterativa de los datos en un paquete de 12 bytes o almacenarlos en una tarjeta de memoria no volátil. En la Figura 1 se observa el sistema desarrollado.

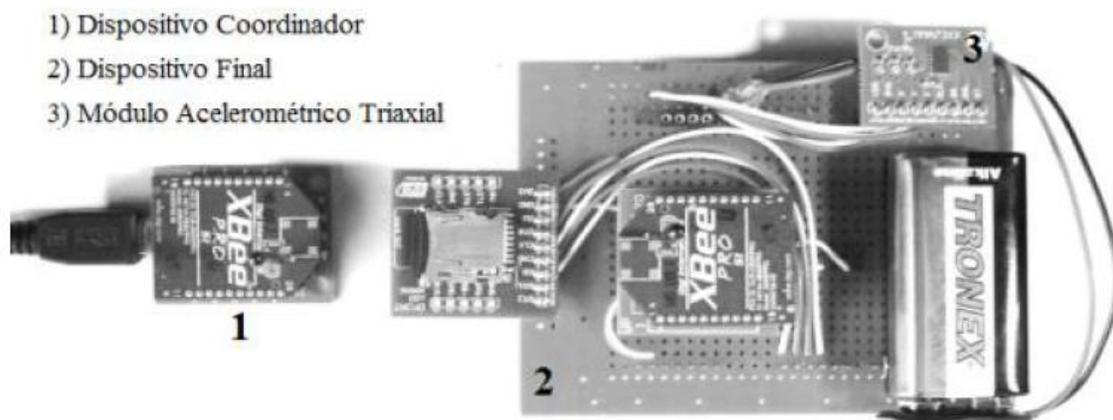


Figura 1. Módulo Inalámbrico para el Sensado de Vibraciones Superficiales en Suelos. Fuente: [7]

Diseño Y Construcción De Un Sistema De Adquisición De Señales Sísmicas Con La Capacidad De Transmitir La Información De Manera Inalámbrica [8]

En este trabajo se describe el proceso de diseño y construcción de un sistema de adquisición de datos que permite realizar adquisiciones sísmicas someras transmitiendo de manera inalámbrica la información generada por varios geófonos hasta un computador donde es recibida a través del puerto USB para realizar su registro. El sistema fue diseñado a nivel de hardware y de software obteniendo finalmente un equipo compuesto por dos módulos, por una parte cada uno de los geófonos que generan la señal, digitalizarla, registrarla y finalmente transmitirla, por otra parte el computador desde el cual se controla la adquisición está conectado con un módulo USB el cual se encarga de recibir la información

registrada en cada uno de los módulos ADQ y transmitirla al computador por medio de un puerto USB. En la Figura 2 se observa el módulo ADQ del sistema desarrollado.



Figura 2. Módulo ADQ para nodos esclavo. Fuente: [8]

Sismógrafo Digital Multicanal Para Refracción Terraloc®Pro De ABEM [9]

El Terraloc®Pro, es un sismógrafo digital multicanal para realizar estudios de reflexión y refracción de alta resolución, tomografía y mediciones de vibración.

El Terraloc Pro es un sismógrafo multicanal autónomo compatible con un ordenador (PC), cuenta con un disco duro de al menos 100 GB y pantalla de 8,4" TFT a color con resolución SVGA, alimentación con batería recargable de 30 voltios. El Terraloc Pro también dispone de 3 puertos USB 2.0, un puerto Ethernet y un puerto de monitor VGA. En la Figura 3 se observa el Terraloc Pro.



Figura 3. Terraloc® Pro De ABEM Fuente: [9]

Implementación Del Equipo De Adquisición De Datos De Prospección Sísmica [2]

Proyecto de investigación en el cual se implementa un equipo de adquisición de datos de prospección sísmica, así como de los programas de cómputo requeridos para la presentación y el procesamiento de los datos adquiridos.

El equipo de adquisición de datos consta de un juego de geófonos, cable de conexión de geófonos, unidad de amplificación, sistema de disparo (trigger) y la unidad de adquisición de datos propiamente dicha, que es una computadora portátil con su respectiva tarjeta DAQ. La alimentación se realiza a través de una batería de 12 voltios (batería para carro).

Este equipo ha sido reflotado y puesto a punto en el Laboratorio Geotécnico del CISMID, habiéndose comprobado su funcionamiento.

La implementación del software de adquisición de datos ha sido realizada utilizando la herramienta de cómputo LABVIEW, para convertir la información analógica adquirida, a un formato digital compatible con las necesidades de análisis, así como para presentar adecuadamente los registros sísmicos. De esta manera la información puede ser procesada e interpretada empleando un software comercial. Esta etapa ha sido desarrollada con la asesoría de un experto en

sistemas de adquisición de datos. En la Figura 4 se observa el módulo ADQ del sistema desarrollado.



Figura 4. Unidad de Amplificación y Unidad de Adquisición y Procesamiento de Datos. Fuente: [2]

Monitoreo Y Evaluación Estructural De Puentes Utilizando Un Sistema De Instrumentación Inalámbrico [6]

Realizar el diagnóstico, la evaluación, y el monitoreo de puentes en Costa Rica mediante un sistema de instrumentación inalámbrico, de forma que se permita complementar la inspección visual para conocer a fondo la condición actual de la estructura, detectar daños y cuantificar el estado del deterioro; proceso que se llevará a cabo mediante el análisis estructural, identificación de sistemas y calibración del modelo de los elementos finitos, pruebas de carga en campo y otras metodologías avanzadas que se investigarán, teniendo como base las mediciones adquiridas en campo. En la Figura 5 se observa el dispositivo empleado en el proyecto citado.



Figura 5. Sistema de instrumentación inalámbrico para monitoreo y evaluación estructural de puentes. Fuente: [6]

Desarrollo de un arreglo sísmico en base a microcontroladores RFPIC [10]

Mediante este proyecto se desarrolla un prototipo de arreglo de antena sísmica modular inalámbrico basado en microcontroladores de radiofrecuencia rfPic Microcontroller. Para lo cual se desarrolla un módulo de adquisición y transmisión de datos sísmicos basados en microcontroladores RFPIC y se acopla un programa de recepción de datos que sirve para almacenar y analizar los datos de la red sísmica. En la Figura 6 se observa el dispositivo empleado en el proyecto citado.



Figura 6. Arreglo sísmico en base a microcontroladores RFPIC. Fuente [10]

Tabla 1. Aportes a proyecto desarrollado de trabajos relacionados en estado del arte

TITULO	AUTORES	PRINCIPAL APORTE	BRECHA CON PROYECTO DESARROLLADO
Módulo Inalámbrico para el Sensado de Vibraciones Superficiales en Suelos	Marlon Fulla; Juan Palacio Bedoya; Camilo Flórez Velásquez; Víctor Aristizábal Tique	Implementa comunicación inalámbrica	La desventaja más importante que presenta este proyecto es que al intentar transmitir la información adquirida en tiempo real los módulos no pueden responder a la tasa de muestreo necesaria para representar adecuadamente la señal, razón por la cual en el proyecto planteado se propone el almacenamiento de ciertas cantidades de datos que serán transmitidas de forma independiente a la adquisición de los datos.
Diseño Y Construcción De Un Sistema De Adquisición De Señales Sísmicas Con La Capacidad De Transmitir La Información De Manera Inalámbrica	Benjamín Herrera Ardila	Implementa comunicación inalámbrica Cuenta con almacenamiento de datos en cada módulo ADQ Cuenta con interfaz de usuario	En el proyecto desarrollado se propone un mejor filtrado de la señal, de modo que no se presenten los problemas inherentes en este aspecto, tal como error en los datos adquiridos.
Sismógrafo Digital Multicanal Para Refracción Terraloc®Pro De ABEM	ABEM	Herramienta comercial de alta precisión	El proyecto desarrollado tiene un costo de \$120USD aproximadamente, por su parte el Terraloc®Pro tiene un costo de alquiler diario alrededor de \$330USD
Implementación Del Equipo De Adquisición De Datos De Prospección Sísmica	Carlos Huamán Egoávil; Roberth Aguilar Chuquimuni	Cuenta con interfaz de usuario. Realiza procesamiento de datos adquiridos	El proyecto desarrollado tiene un costo de \$120USD aproximadamente, y cuenta con módulos de tamaño reducido, en comparación al Equipo De Adquisición De Datos De Prospección

			Sísmica, ya que implementa una costosa tarjeta de adquisición de National Instruments y sus nodos de sensado son de gran tamaño.
Monitoreo Y Evaluación Estructural De Puentes Utilizando Un Sistema De Instrumentación Inalámbrico	Unidad de Puentes	Realiza análisis de datos adquiridos	El proyecto desarrollado tiene un costo de \$120USD aproximadamente, por su parte el Sistema De Instrumentación Inalámbrico, tiene un costo por nodo superior a los \$2.000USD
Desarrollo de un arreglo sísmico en base a microcontroladores RFPIC	Carlos Angel Macias Bautista	Implementa comunicación inalámbrica	Los dispositivos esclavo del sistema desarrollado cuentan con módulos de almacenamiento de datos, por su parte el RFPIC no lo tiene, por lo cual realizan transmisiones al tiempo que capturan la información, debido a que los tiempos de muestreo son del orden de los mili segundos no es posible transmitir toda la información adquirida de modo que los datos suministrados por el sistema no son fiables.

2.2. Bases teóricas

En la siguiente sección se presentan conceptos básicos sobre la sismología de exploración ya que es una de las principales aplicaciones del sistema desarrollado en el presente proyecto.

2.2.1. Sismología de exploración

La geofísica es una parte de la geología que estudia las propiedades físicas de la Tierra como la radiactividad, resistencia eléctrica y magnetismo, para ser aplicado en diferentes aspectos como localización de yacimientos, detección de cavidades y fisuras, estabilidad de taludes y caracterización de vertederos entre otros. Por su parte la sismología es la rama de la geofísica que orienta su estudio al comportamiento del subsuelo cuando este transmite ondas elásticas.

La sismología de exploración se encarga de la prospección de terrenos a través del uso de ondas elásticas generadas de forma artificial mediante una fuente emisora y registrarlas en una serie de estaciones con sensores (geófonos) distribuidos sobre el terreno. A partir del estudio de las distintas formas de onda y sus tiempos de trayecto, se consiguen obtener imágenes del subsuelo que luego se relacionan con las capas geológicas (secciones sísmicas, campos de velocidades, etc.) [11].

2.2.2. Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son ondas mecánicas y elásticas, ya que causan deformaciones no permanentes en el medio en el cual se propagan. Al aplicar una fuerza sobre la superficie de un cuerpo su forma y dimensión cambian de manera directamente proporcional a dicha fuerza y a las propiedades elásticas del cuerpo como enuncia la ley de Hooke siempre que la relación fuerza – superficie no supere el punto de quiebre, al retirar la fuerza el cuerpo retorna a su forma y tamaño iniciales.

Las ondas sísmicas se clasifican en dos grupos de acuerdo a la forma de propagación en la tierra, donde las ondas de cuerpo tienden a viajar a través del interior de la Tierra y ondas superficiales como su nombre lo indica viajan a lo largo de la superficie de la Tierra. Las ondas más usadas en la exploración sísmica son las ondas cuerpo que se dividen en ondas primarias o longitudinales (P) y ondas secundarias o transversales(S). En las ondas P la deformación viaja en la misma dirección de la onda, mientras que en las ondas S las deformaciones viajan de manera ortogonal respecto a la dirección de la onda. En la Figura 7 se observa las formas de onda P y S.

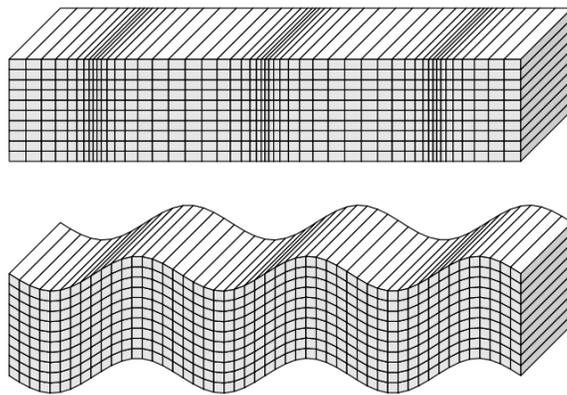


Figura 7. Forma de onda P y forma de onda S. Fuente [12].

La exploración sísmica emplea las ondas elásticas que se propagan a través del terreno y que han sido generadas artificialmente. Su objetivo es el estudio del subsuelo en general, lo cual permite obtener información geológica de los materiales que lo conforman. La prospección sísmica es una herramienta de investigación poderosa, ya que con ella se puede inspeccionar con buena resolución desde los primeros metros del terreno (sísmica de alta resolución o sísmica superficial; *shallow seismic*) hasta varios kilómetros de profundidad (sísmica profunda; *deep seismic*). Así, para la sísmica profunda se utilizan fuentes de energía muy potentes (explosivos o camiones vibradores) capaces de generar ondas elásticas que llegan a las capas profundas del subsuelo, mientras que para

la sísmica superficial se utilizan martillos de impacto, rifles sísmicos y explosivos de baja energía. De manera que el diseño de una campaña sísmica (equipo y material a utilizar) está en función del objetivo del estudio. Según esto, la sísmica profunda se emplea en la detección de reservorios petrolíferos (ya sea terrestre o marítima), grandes estructuras geológicas (plegamientos montañosos, zonas de subducción, etc.), yacimientos minerales, domos salinos, etc. Mientras que la sísmica superficial tiene mucha aplicación en la obra pública y la ingeniería civil [11].

La prospección sísmica se basa en el mismo principio que la sismología, consiste en generar ondas sísmicas mediante una fuente emisora y registrarlas en una serie de estaciones con sensores (geófonos) distribuidos sobre el terreno. A partir del estudio de las distintas formas de onda y sus tiempos de trayecto, se consiguen obtener imágenes del subsuelo que luego se relacionan con las capas geológicas (secciones sísmicas, campos de velocidades, etc.) [11].

Un geófono es un dispositivo utilizado en la adquisición sísmica de superficie, tanto en tierra firme como en el lecho marino, que detecta la velocidad del terreno producida por las ondas sísmicas y transforma el movimiento en impulsos eléctricos. Los geófonos detectan el movimiento en una sola dirección [13]. Físicamente los geófonos son transductores que transforman la vibración del terreno, producida por una pequeña carga explosiva o por un golpe de martillo, en una señal eléctrica [14].

2.2.3. Principios básicos de métodos sísmicos

Cuando una onda sísmica encuentra un cambio en las propiedades elásticas del material; parte de la energía continúa en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas) y el resto se transmite al otro medio (ondas refractadas) con cambios en la dirección de propagación, en la velocidad y en el modo de vibración, ver Figura 8 [11].

Las leyes de la reflexión y la refracción se derivan por el principio de Huygens cuando se considera un frente de onda que incide sobre una interface plana. El resultado final es que ambas leyes se combinan en un único planteamiento: en una interface el parámetro de rayo, P , debe tener el mismo valor para las ondas incidentes, reflejadas y refractadas. Si el medio consta de un cierto número de capas paralelas, la ley de Snell establece que el parámetro del rayo tiene que ser el mismo para todos los rayos reflejados y refractados resultantes de un rayo inicial dado.

Las ondas sísmicas que viajan por subsuelo se reflejan y se refractan siguiendo la ley de Snell. La cantidad de energía de las ondas incidentes se reparte entre las ondas reflejadas, las refractadas y la absorción natural del terreno [11].

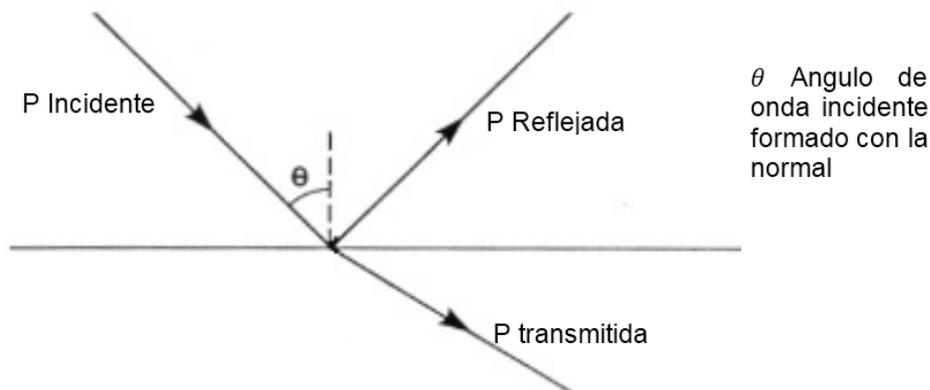


Figura 8. Conversión de una onda incidente P. Fuente [15]

2.2.4. Método sísmico

En las aplicaciones del método sísmico se provocan las ondas elásticas por medios artificiales, tales como impactos o explosiones. Las vibraciones que transmite al suelo se recogen en aparatos sensibles capaces de registrarlas e inscribirlas, llamados sismógrafos o geófonos. Si se colocan varios de estos a diferentes distancias de la perturbación se podrán medir los distintos tiempos de

llegada; los geófonos están separados a distancias que oscilan entre 15 y 30 metros [1].

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentran los de refracción y reflexión sísmica. En estos métodos se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre el sitio donde se generan las ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen una serie de sensores en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción o reflexión sísmica [16].

A una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas, - con la ayuda de un martillo o por la detonación de explosivos -, las cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores en el tendido [16].

El equipo básico consiste de los sensores; la unidad de adquisición, en donde se almacenan los movimientos del terreno detectados por cada sensor; los cables de conexión entre los sensores y la unidad de adquisición; el cable del trigger, que se encarga de marcar el momento de inicio de registro en la unidad de adquisición [16].

2.2.5. Método sísmico por reflexión

Mide el tiempo que invierte una onda en hacer el trayecto entre el origen de las oscilaciones y el geófono, después de reflejarse en una superficie de contacto entre dos formaciones de naturaleza distinta. El procedimiento, es muy sencillo en teoría, requiere de aparatos muy complicados y de la ubicación del centro de perturbación a cierta profundidad. La complejidad de los aparatos se debe a la necesidad de registrar la onda de regreso cuando la superficie del suelo aún está en movimiento. El método sísmico por reflexión es muy utilizado en prospección petrolífera debido a sus precisos resultados, pero por su complejidad se usa muy poco para resolver problemas de ingeniería civil [1].

2.2.6. Método sísmico por Refracción

Se basa en el hecho de que una onda elástica que atraviesa una frontera entre materiales diferentes se refracta hacia el plano de dicha frontera cuando entra a un material que transmite la onda con velocidad mayor que la que tenía en el medio original, y se refracta hacia un plano perpendicular a la frontera cuando la velocidad de propagación es menor en el material a que entra que la que tenía en el medio por el que venía propagando [1].

2.2.7. Sensor geófono

Los geófonos están diseñados para convertir las oscilaciones mecánicas de las partículas de la superficie de la Tierra, generadas por la llegada de una onda sísmica, en una señal eléctrica. Hay una serie de métodos para efectuar esta conversión. Los geófonos de inducción se utilizan ahora para las prospecciones de tierra y los geófonos piezoeléctricos (hidrófonos) para las prospecciones marítimas [17].

Un geófono de inducción consta de dos partes principales: fija y móvil. La parte fija del geófono consta de una carcasa generalmente equipada con un punto en la parte inferior, que sirve para mejorar el contacto con el suelo. Los imanes permanentes, que generan un campo magnético dentro de la carcasa, se fijan a ella. La parte móvil consiste en una bobina, suspendida de un resorte dentro del geófono, actuando simultáneamente como masa inercial [17].

Cuando la onda sísmica llega al geófono, la carcasa del geófono con el imán comienza a oscilar concordantemente con las partículas del suelo en cercanías a él, mientras que la masa inercial de la bobina se esfuerza por permanecer en reposo. Esto da como resultado un movimiento relativo de la bobina en el campo magnético que provoca que se genere un voltaje [17].

CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN HARDWARE DEL SISTEMA

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

En la Figura 9 se observa un diagrama del sistema propuesto, el cual está compuesto por un computador portátil, cuatro tarjetas de adquisición, cuatro geófonos y un sistema de alimentación.

El sistema de geófonos se interconecta de forma alámbrica por medio de un cable de tres hilos, dos de ellos energizan cada uno de los módulos con una batería como fuente de alimentación. El tercer hilo permite sincronizar los nodos de sensado mediante un pulso.

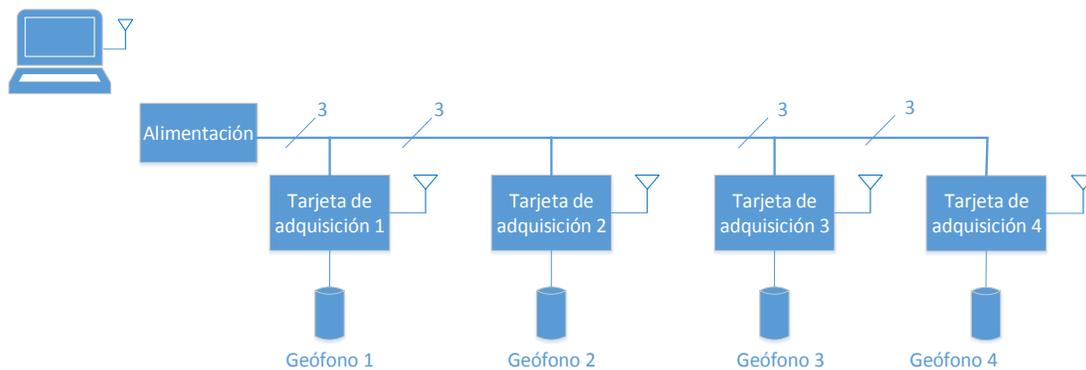


Figura 9. Diagrama en bloques del sistema

Los temas relacionados con implementación y desarrollo de software se trataran en detalle en el siguiente capítulo.

3.1. Diseño Hardware

En esta sección se describe el proceso de diseño y elaboración de la tarjeta principal del sistema donde se realizan los procesos de adquisición y transmisión

de datos. La etapa de diseño es muy importante, debido a que dicha tarjeta debe tener la capacidad de adquirir los datos generados por un geófono, de modo que sean transmitidos a un PC sin perder información en el proceso. A continuación se describen las etapas que conforman el dispositivo y los diseños realizados en cada una de ellas.

En la Figura 10 se observa el diagrama en bloques del dispositivo.

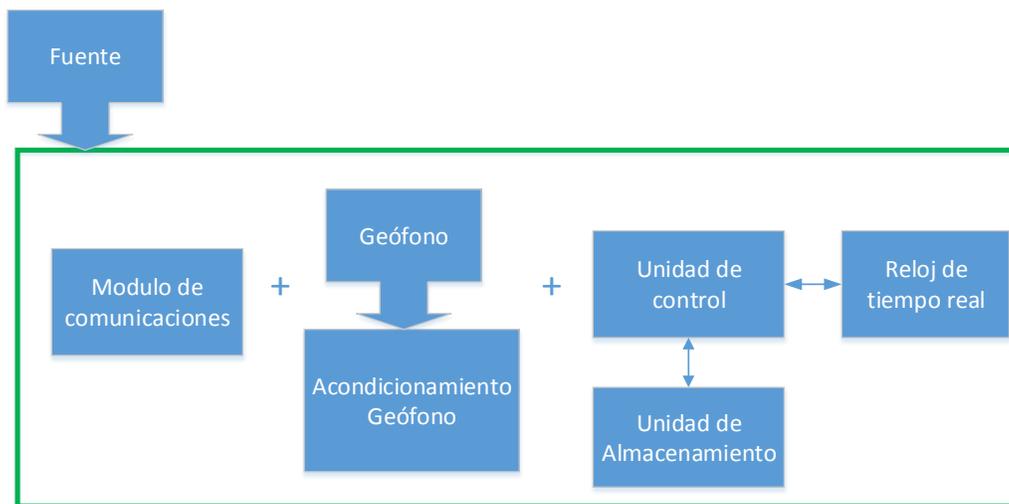


Figura 10. Diagrama en bloques tarjeta de adquisición de datos

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

- Fuente de alimentación: corresponde al hardware necesario para alimentar el sistema de geófonos.
- Bloque RF: Corresponde a un módulo de comunicación por radio frecuencia que permite la transmisión de datos de forma inalámbrica, entre un PC y la tarjeta de adquisición del sistema.
- Bloque Acondicionamiento Geófono: corresponde al hardware necesario para obtener una respuesta lineal y aprovechar todo el rango de frecuencias del sistema.
- Bloque Sensor: elemento que se encarga de detectar las vibraciones del suelo donde se realiza el estudio.

- Bloque Unidad de Control: bloque encargado de contener un algoritmo de gestión de comunicación, adquisición, almacenamiento y posterior transmisión de datos.
- Almacenamiento de respaldo: corresponde a un sistema de almacenamiento no volátil que permita tener un respaldo de los datos obtenidos del geófono.
- Condensadores de BYPASS: componentes encargados de filtrar el ruido de la fuente.

3.2. Selección de componentes del sistema

El diseño del sistema inicia con la selección de dispositivos de la misma, para lo cual se debe escoger inicialmente el elemento sensor, ya que de esto depende la etapa de adquisición a implementar. A continuación se encuentra descrito el proceso de selección de los elementos del sistema.

3.2.1. Selección de elemento sensor

El proceso de diseño inicia con la selección del elemento sensor o geófono para lo cual se debe tener en cuenta que la Tierra es como un filtro pasa-bajo, ya que las bajas frecuencias son menos atenuadas que las altas. Además, las longitudes de ondas más cortas, o lo que es lo mismo las más altas frecuencias, tiene mejor resolución. Esto porque la respuesta o ganancia del sistema es máxima a la frecuencia natural. Se utilizan bajas frecuencias del orden de los 10 Hertz y altas de 250 Hz [18]. Adicionalmente se analizan otras características importantes, tales como: valor inferior a \$70USD con el fin de mantener el sistema desarrollado funcional a un bajo costo, sensibilidad que permita capturar datos de buena calidad.

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

- Frecuencia natural: Valor dado por el fabricante, el cual debe estar en el rango de frecuencia de los estudios de prospección sísmica, entre 10Hz y 250Hz.
- Precio: valor investigado en tiendas de electrónica, especialmente en las tiendas Mouser y SparkFun. Valor sugerido inferior a \$70USD.
- Sensibilidad: valor dado por el fabricante en V/m/sec.

Luego se determinan los pesos de cada parámetro según la relevancia que presentan en el desarrollo del proyecto como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación parámetro – peso sensores geófonos.

#	Parámetro	Peso
P1	Frecuencia natural máxima	40
P2	Precio	40
P3	Sensibilidad	20
Total		100

En la Tabla 3 se observan los valores de cada parámetro según el sensor evaluado.

Tabla 3. Características geófonos

Referencia dispositivo	Frecuencia natural máxima [Hz]	Precio [USD]	Sensibilidad [V/m/sec]
DT-SOLO 10Hz	240	107,89	85,8
SM-24	240	59,95	28,8
GS-11D	240	64	22,8

Para realizar la selección de los principales dispositivos que componen el sistema se define una figura de mérito, donde se le asigna un peso a cada parámetro, según la importancia que el mismo tenga dentro del sistema, de modo que aplicando la Ecuación 1, se seleccione el dispositivo más adecuado para el proyecto.

$$ValPar_x = VPeso_x \times \left(\frac{PEval_x}{BVal} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

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

$VPeso_x$: corresponde al peso asignado al parámetro evaluado.

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

$PEval_x$: corresponde al valor del parámetro evaluado.

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

$$ValPar_x = VPeso_x \times \left(\frac{BVal}{PEval_x} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

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

$$EvalTec = \sum VPeso_x \times \left(\frac{PEval_x}{BVal} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

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

A continuación se procede a aplicar las Ecuaciones 1, 2 y 3 con el fin de obtener la evaluación de cada sensor.

- Evaluación sensor DT-SOLO 10Hz
 - Frecuencia natural máxima

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

- Precio

$$ValPar_2 = 40 \times \left(\frac{59.95}{107.89} \right) = 22,22$$

- Sensibilidad

$$ValPar_3 = 20 \times \left(\frac{85.8}{85.8} \right) = 20$$

Resultado de evaluación sensor DT-SOLO 10Hz

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 82.22$$

- Evaluación sensor SM-24
 - Frecuencia natural máxima

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

- Precio

$$ValPar_2 = 40 \times \left(\frac{59.95}{59.95} \right) = 40$$

- Sensibilidad

$$ValPar_3 = 20 \times \left(\frac{28.8}{85.8} \right) = 6.71$$

Evaluación sensor SM-24

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 86.71$$

- Evaluación sensor GS-11D
 - Frecuencia natural máxima

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

- Precio

$$ValPar_2 = 40 \times \left(\frac{59.95}{64} \right) = 37.46$$

- Sensibilidad

$$ValPar_3 = 20 \times \left(\frac{22.8}{85.8} \right) = 5.31$$

Evaluación sensor GS-11D

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 82.77$$

Se consignan los resultados obtenidos en la siguiente tabla.

Tabla 4. Resultado evaluación sensor geófono.

Referencia	DT-SOLO 10Hz	SM-24	GS-11D
Valor evaluación	82.22	86.71	82.77

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

En la Figura 11 se observa el interior del geófono SM-24, donde se aprecia la bobina móvil del mismo.



Figura 11. Geófono SM-24. Tomado de datasheet del fabricante

En el proceso de 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, por lo cual lo más recomendable es que este último se encuentre enterrado [19], para esto se usan carcasas que también se encuentran disponibles a nivel comercial, sus principales características son la resistencia y acople firme al suelo caso de estudio. En la Figura 12 se observa la carcasa empleada en el presente proyecto.



Figura 12. Carcasa para geófono SM-24. Tomado de página de distribuidor RT Clark Geophysical Equipmet.

3.2.2. Selección de componentes tarjeta de adquisición

Una vez seleccionado el sensor se procede con el diseño de la tarjeta de adquisición que se encargara de capturar las señales entregadas por el geófono y transmitir las de forma inalámbrica a un PC. Se establecen las siguientes características como base para iniciar el diseño y desarrollo de la tarjeta:

- **Convertor análogo digital (ADC):** uno de los aspectos más importantes en el diseño es contar con una alta resolución de adquisición ya que el fabricante del elemento sensor (geófono) recomienda que la adquisición se realice a 16bits, esto con el fin de no perder información en el proceso.

- Comunicación vía radio frecuencia con un PC: se requiere que la tarjeta se comunique de forma inalámbrica con un PC con el fin de transmitir los datos obtenidos de un geófono.
- Costo de componentes del sistema: dar prioridad a elementos que bajo características similares de trabajo presenten los menores costos a nivel comercial.
- Capacidad de procesamiento acorde con las tareas a desarrollar: la tarjeta de adquisición del sistema deberá ejecutar múltiples tareas como: sincronización en la toma de datos, operaciones de adquisición en cortos periodos de tiempo, 2ms aproximadamente, de modo que se obtengan todos los datos generados por un geófono y no se pierda información en el proceso; gestión de almacenamiento de datos, por lo tanto se requiere que la velocidad y capacidad de procesamiento sean eficientes ante los diferentes requerimientos del sistema.
- Puesto que el sistema es portátil la alimentación del mismo se debe realizar a través de baterías.

El software seleccionado para el manejo desde el PC es LabView, ya que es muy versátil e integra varias herramientas útiles para el análisis gráfico de datos, además este es un software con el que tanto docentes como estudiantes están familiarizados por su uso a lo largo de la carrera.

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

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

En la Tabla 5 se encuentran las características más relevantes de cada tarjeta de desarrollo para el presente proyecto.

Tabla 5. Características tarjetas de desarrollo

Característica	Pingüino	Arduino Uno	CY8CKIT-059
	PIC32MX220F032D	Atmel Atmega328	PSoC® 5LP
Procesador	MIPS32® M4K™	AVR	ARM Cortex-M3
Arquitectura procesador	32 bit	8 bit	32 bit
Memoria de programa (KB)	32	32	256
SRAM (KB)	8	2	64
Convertor ADC	10 bits	10 bits	Delta Sigma de 24bits
Rango de voltaje de operación (V)	2.3 - 3.6V	1.8 - 5.5 V	1.71 - 5.5 V
Costo componentes externos (USD)	\$ 15,95	\$ 15,95	\$ 1,00
Costo tarjeta de desarrollo (USD)	\$ 14,82	\$ 21,49	\$ 10,00

Debido a que el fabricante del elemento sensor, geófono, recomienda que la adquisición de las señales se realice a 16bits con el fin de no perder información en el proceso, es necesario tener en cuenta que dos de las tarjetas de desarrollo investigadas tienen convertidores ADC de 10bits por lo que se hace necesario adicionar un convertor ADC externo con el fin de cumplir con el requerimiento de adquisición de las señales.

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

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

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

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

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

El peso asignado a cada parámetro está dado por la relevancia del parámetro evaluado en relación al proyecto, en la Tabla 6 se observa la relación parámetro/peso.

Tabla 6. Peso de parámetros de selección tarjeta de desarrollo

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

A continuación se procede a aplicar las Ecuaciones 1, 2 y 3 con el fin de obtener la evaluación de cada tecnología.

- Evaluación tarjeta de desarrollo Pingüino

- Costo de la tarjeta de desarrollo

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

- Costo componentes externos

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

- Arquitectura procesador

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

- Memoria SRAM (KB)

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

- Resolución de conversor ADC

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

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 47.2$$

- Evaluación tarjeta de desarrollo Arduino

- Costo de la tarjeta de desarrollo

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

- Costo componentes externos

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

- Arquitectura procesador

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

- Memoria SRAM (KB)

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

- Resolución de conversor ADC

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

$$EvalTec = \sum ValPar_x = 29.3$$

Se consignan los resultados obtenidos en la siguiente tabla.

Tabla 7. Resultado evaluación tarjetas de desarrollo

Parámetro	Pingüino	Arduino Uno	CY8CKIT-059
Procesador	PIC32MX220F032D	Atmel Atmega328	PSoC® 5LP
Valor evaluación	47,2	29,3	100,0

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

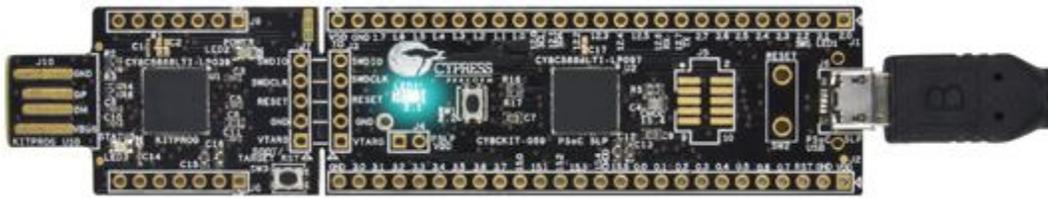


Figura 13. Tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059. Fuente www.cypress.com

Memoria Externa

Otra parte fundamental del diseño es la transmisión de datos de forma inalámbrica, por lo que es necesario establecer si las muestras se transmiten a medida que se adquieren o se almacenan para ser transmitidas una vez se ha terminado el proceso de adquisición. Para determinar el procedimiento más adecuado es necesario tener en cuenta que enviar las muestras tan pronto son adquiridas consume un tiempo que puede causar problemas de sincronismo y pérdida de datos, por lo cual se opta por adquirir todos los datos y enviarlos después de terminado el tiempo de adquisición, teniendo en cuenta que dicho tiempo oscila entre 1 y 10 segundos.

Teniendo en cuenta que cada muestra ocupa 2 bytes y se toman 1.000 muestras por segundo, y el sistema se diseña para tomar máximo 10 segundos de muestras entonces se requiere el uso de un sistema de almacenamiento no volátil externo, donde las opciones son un módulo para gestionar el almacenamiento de datos en una memoria microSD o una memoria EEPROM, el proceso de selección se realiza comparando las opciones según sus ventajas y desventajas, en las siguientes tablas se presentan las comparaciones de cada una.

Relación de ventajas y desventajas de la memoria EEPROM

Tabla 8. Relación ventajas y desventajas Memoria EEPROM

Memoria EEPROM	
Ventajas	Desventajas
Tamaño reducido	Capacidad limitada (Maximo 1Mb)
Bajo costo	Procesamiento de información complejo
	No es portable
	Alta complejidad de reemplazo ante un daño

Relación de ventajas y desventajas de un sistema de almacenamiento en microSD

Tabla 9. Relación ventajas y desventajas sistema de almacenamiento en microSD

Sistema de almacenamiento en microSD	
Ventajas	Desventajas
Portable	Costo más elevado en relación a una memoria EEPROM convencional
Tamaño reducido	
Facilidad de crear diferentes tipos de archivos	
Opción de creación de múltiples archivos	
Fácil de reemplazar	
Gran capacidad del almacenamiento (hasta 32GB)	

Luego de analizar las ventajas y desventajas de cada opción se escoge el sistema de almacenamiento en microSD para implementar el almacenamiento no volátil externo.

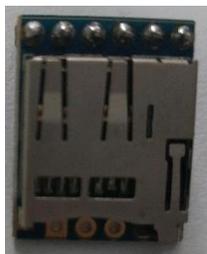


Figura 14. Partes frontal y posterior de sistema de almacenamiento en microSD

Comunicación inalámbrica

Siguiendo con el diseño de la tarjeta de adquisición es necesario seleccionar un módulo de comunicación inalámbrica que se encargue de transmitir los datos obtenidos de un geófono hacia un PC. Para lograrlo se establecen unos parámetros de selección relevantes para el proyecto, para lo cual se debe tener en cuenta lo siguiente: se espera que el sistema tenga un buen alcance de comunicación y presente un bajo consumo de corriente ya que al ser un sistema portátil, la etapa de alimentación se debe implementar a través de baterías. La tasa de transferencia no es un parámetro restrictivo en la selección del módulo de comunicación por radio frecuencia; por su parte el costo del dispositivo es un parámetro relevante ya que como se mencionó anteriormente el sistema se debe mantener de bajo costo. Por lo anterior se seleccionan los parámetros que se listan a continuación

- Alcance: Valor dado por el fabricante en metros.
- Corriente Transmisión: Valor dado por el fabricante en mili amperios
- Tasa Transferencia: Valor dado por el fabricante en kilo bytes por segundo.
- Precio: valor investigado en tiendas de electrónica, especialmente en las tiendas Mouser y Digikey.

Luego se determinan los pesos de cada parámetro según la relevancia que presentan en el desarrollo del proyecto como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Relación parámetro – peso módulos de comunicación RF

#	Parámetro	Peso
P1	Alcance	30
P2	Corriente Transmisión	25
P3	Tasa Transferencia	15
P4	Precio	30
Total		100

En la Tabla 11 se observan los valores de cada parámetro según la tecnología evaluada.

Tabla 11. Características módulos de comunicación RF

Referencia dispositivo	Corriente Transmisión [mA]	Tasa Transferencia [Kbps]	Alcance [m]	Precio [USD]
ProFLEX01	175	250	1200	\$ 26,98
HC12	100	115	1000	\$ 12,98
XBee	45	250	100	\$ 17,50
XBee Pro	215	250	1600	\$ 28,00

Posteriormente se aplican las formulas 1, 2 y 3 para determinar cuál es la tecnología más adecuada para implementar en el proyecto de lo cual se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados evaluación módulos de comunicación RF

Parámetro	ProFLEX01	HC12	XBee	XBee Pro
Alcance	22,5	28,9	1,9	30,0
Corriente Transmisión	6,4	11,3	25,0	5,2
Tasa Transferencia	15,0	6,9	15,0	15,0
Precio	14,4	30,0	13,9	13,9
Total	58,4	77,1	55,8	64,1

Del análisis de los resultados obtenidos se determina que la tecnología más adecuada para implementar en el proyecto es con el módulo HC12. En la Figura 15 se observa una imagen del dispositivo de comunicación por radio frecuencia HC12.

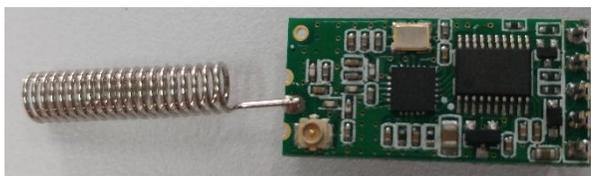


Figura 15. Módulo de comunicación por RF HC12. Fuente propia

Alimentación

Teniendo en cuenta que el sistema de geófonos, normalmente se usa en zonas de difícil acceso, debido a que es empleado en gran medida para estudio de suelos en nuevas obras civiles, se hace necesario que el sistema sea fácil de transportar, alimentar y que permita largos tiempos de trabajo, por lo cual se opta por una batería seca de 12 voltios. Adicionalmente se implementa un regulador para mantener el nivel de tensión estable a pesar de cambios tanto en la alimentación como en la carga. Para esto último se emplea un regulador de tipo Step Down que se encarga de reducir el voltaje de 12 voltios a 5 voltios de forma eficiente, ya que no presenta pérdida de potencia por disipación de calor, con lo cual se alimenta todo el sistema.

Comunicación con PC

Para establecer la comunicación inalámbrica con un PC es necesario emplear un dispositivo de comunicación por radio frecuencia como los seleccionados en la etapa de comunicación de la tarjeta de adquisición, de modo que se emplea un dispositivo HC12, el cual se conecta con el PC a través de una interfaz USB que permite tanto la adquisición de datos como la configuración del módulo de comunicación. La interfaz empleada en el proyecto es un conversor serie-USB (TTL) ya que es un elemento económico y de fácil consecución a nivel comercial.

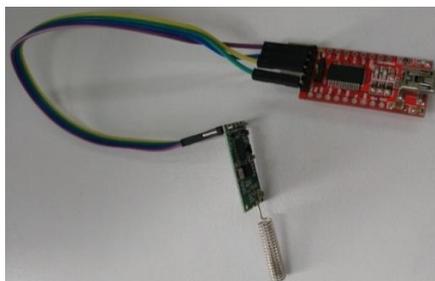


Figura 16. Foto conexión conversor serie-USB y HC12. Fuente propia

Hasta este punto se han seleccionado el elemento sensor y todos los dispositivos que hacen parte de la tarjeta de adquisición, en los siguientes capítulos se tratarán los temas de modelado matemático y caracterización del sensor.

3.3. Modelo Matemático

Antes de iniciar con el modelo matemático del geófono se hace necesario definir un modelo de segundo orden de manera general.

La ecuación diferencial para un sistema de segundo orden se expresa como:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde

ζ es el damping del sismómetro

ω_n es la frecuencia natural del sistema

Como $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ entonces.

De la Ecuación 4 es posible establecer la solución del sistema al conocer sus raíces, de donde.

$$-\zeta\omega_n \pm \sqrt{\zeta^2\omega_n^2 - \omega_n^2} = \omega_n(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}) \quad \text{Ecuación 5}$$

La solución son dos raíces complejas conjugadas las cuales se pueden reescribir como:

$$-\zeta\omega_n \pm i\omega_d \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

ω_d es la frecuencia natural amortiguada del sistema y se puede reescribir como:

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n \quad \text{Ecuación 7}$$

Si la solución de la ecuación viene dada por:

$$x = Ae^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_d t - \phi) \quad \text{Ecuación 8}$$

Al derivar se encuentra una relación que permite definir la frecuencia de amortiguamiento relativo como función de valores medibles en la respuesta al impulso del sistema.

$$\dot{x} = Ae^{-\zeta\omega_n t} (-\zeta\omega_n \cos(\omega_d t - \phi) - \omega_d \sin(\omega_d t - \phi)) \quad \text{Ecuación 9}$$

Despejando ω_d se tiene:

$$\omega_d = \frac{2\pi}{t_2 - t_1} \quad \text{Ecuación 10}$$

La respuesta del sistema dado por la Ecuación 4 se observa en la Figura 17, esta respuesta se conoce como amortiguación débil y es una característica de los sistemas de segundo orden.

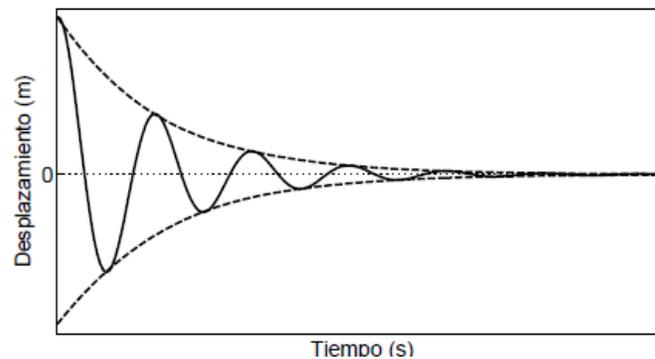


Figura 17. Amortiguación débil. Fuente propia

La figura indica que el comportamiento tiene un decaimiento logarítmico de aquí se define:

$$\Delta = \ln x_1 - \ln x_2 = \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Despejando x_2 de la Ecuación 11 se tiene:

$$x_2 = e^{-\Delta} x_1 \quad \text{Ecuación 12}$$

La relación entre amplitudes en un intervalo de tiempo está dada por:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{e^{-\zeta \omega_n t_1}}{e^{-\zeta \omega_n t_2}} = e^{\zeta \omega_n (t_2 - t_1)} \quad \text{Ecuación 13}$$

Por tanto

$$\Delta = \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) = \zeta \omega_n (t_2 - t_1) = \zeta \omega_n \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (***) \quad \text{Ecuación 14}$$

De la Ecuación 14 se calcula el damping en función de dos amplitudes consecutivas, estas ecuaciones serán utilizadas más adelante para la calibración de cada geófono y se obtiene:

$$\zeta = \frac{\Delta/2\pi}{\sqrt{1 + (\Delta/2\pi)^2}} \quad \text{Ecuación 15}$$

La Ecuación 15 muestra el coeficiente de amortiguamiento en función de parámetros conocidos como la amplitud.

Así mismo la Ecuación 16 presenta el cálculo de la frecuencia natural amortiguada la cual es un valor que varía en función del coeficiente de amortiguamiento.

Estas expresiones son fundamentales para el desarrollo de la calibración.

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta}{2\pi}\right)^2} \omega_d \quad \text{Ecuación 16}$$

3.3.1. Modelo matemático del elemento sensor

Dada una función $u(t)$ la cual es un movimiento vertical de la tierra y $z(t)$ el movimiento relativo (desplazamiento) de la masa con respecto a la misma, es posible construir el modelo matemático asociado a un geófono con la representación de la Figura 18:

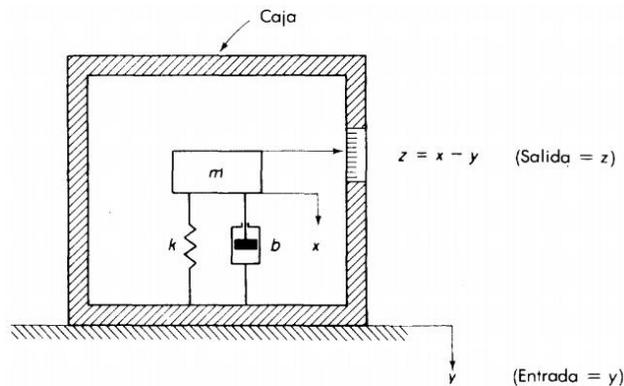


Figura 18. Modelo mecánico de un geófono. Fuente: Dinámica de sistemas de Ogata

Dicho modelo mecánico es el asociado a un geófono como sistema de sensado de movimientos telúricos o comúnmente llamado sismómetro.

Donde $x - u$ forman el desplazamiento relativo.

$u(t) = u \text{ sen}(\omega t)$ es la excitación de la tierra y es aproximada a una función sinusoidal.

La ecuación de movimiento queda representada como:

$$m\ddot{x} + b(\dot{x} - \dot{u}) + k(x - y) = 0 \quad \text{Ecuación 17}$$

Como:

$$z = x - u \quad \text{Ecuación 18}$$

Tenemos que:

$$x = z + u \quad \text{Ecuación 19}$$

Reemplazando:

$$m(\ddot{z} + \ddot{u}) + b(\dot{z}) + kz = 0 \quad \text{Ecuación 20}$$

Reorganizando:

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + kz = m\ddot{u} \quad \text{Ecuación 21}$$

Despejando

$$\ddot{z} + \frac{b}{m}\dot{z} + \frac{k}{m}z = -\ddot{u}(\ast) \quad \text{Ecuación 22}$$

Para la conveniencia de los sistemas de segundo orden se tiene:

$$\frac{b}{m} = 2\zeta\omega_0$$

Donde:

ζ es el damping del sismómetro

ω_0 es la frecuencia natural del sistema

Como $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ entonces la Ecuación 22 puede escribirse como:

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega_0\dot{z} + \omega_0^2z = -\ddot{u} \quad \text{Ecuación 23}$$

La ecuación 22, muestra el amortiguamiento del sistema, dicho amortiguamiento está compuesto por dos tipos de amortiguamiento uno eléctrico y otro mecánico, dicho amortiguamiento mecánico es un valor propio del sistema, el eléctrico esta generado por la bobina que al moverse dentro de un campo magnético genera una corriente que se opondrá al movimiento con una fuerza electromagnética proporcional comúnmente llamada Ley de Lenz.

La masa es un imán y tiene una velocidad relativa con respecto a la bobina, al momento de moverse de acuerdo a la ecuación $u(t)$. Dicho movimiento genera una diferencia de potencial la cual es relacionada a la velocidad del movimiento de la masa.

La Figura 19 muestra el circuito equivalente eléctrico del geófono como una fuente.

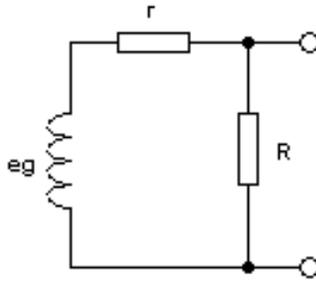


Figura 19. Calibración de alta precisión. Fuente propia

Donde:

- eg: Fuente
- r: resistencia interna
- R: resistencia de carga o control del dumping

El movimiento opuesto se llama Ley de Lenz.

El coeficiente de amortiguamiento electromagnético está dado por:

$$\text{voltaje} \times E = G\dot{z} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

- G es la constante de generación
- Z el cambio en el desplazamiento del circuito eléctrico.

Del circuito de la Figura 19 se tiene:

$$I = \frac{E}{R_T} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

$$R_T = (r + R) \quad \text{Ecuación 26}$$

La fuerza del damping F_d de acuerdo a la Ley de Lenz es:

$$F_d = GI = \frac{GE}{R_T} = \frac{G^2}{R_T} \dot{z} \quad \text{Ecuación 27}$$

Ahora:

$$\frac{b}{m} = \frac{G^2}{R_T m} = 2\zeta_e \omega_0 \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde

ζ_e : damping electromagnético

El coeficiente de amortiguamiento relativo total es la suma de los coeficientes mecánico y eléctrico de aquí se tiene que:

$$\zeta_T = \zeta_e + \zeta_m \quad \text{Ecuación 29}$$

Luego:

$$\zeta_T = \frac{G^2}{2R_T m \omega_0} + \zeta_m \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde G es el damping total que es la contribución del sistema eléctrico y mecánico.

Luego reemplazando la Ecuación 30 en la ecuación general $\ddot{z} + 2\zeta\omega_0\dot{z} + \omega_0^2 z = -\ddot{u}$, se tiene:

$$\ddot{z} + \frac{1}{m} \left[b + \frac{G^2}{R_T r} \right] \dot{z} + \omega_0^2 z = -\ddot{u}(t) \quad \text{Ecuación 31}$$

Ahora la excitación

$$u(t) = u_o \cos(\omega t) \quad \text{Ecuación 32}$$

La cual es la entrada o sismo, dicha entrada puede ser sinusoidal o la combinación de las dos $sen + cos$ debido a que son funciones linealmente independientes.

$$\ddot{u}(t) = -u_o \omega_0^2 \cos(\omega t) \quad \text{Ecuación 33}$$

Así que la ecuación característica del sismógrafo es:

$$\ddot{z} + \frac{1}{m} \left[b + \frac{G^2}{R_T r} \right] \dot{z} + \omega_0^2 y = -u_o \omega_0^2 \cos(\omega t) \quad \text{Ecuación 34}$$

Si $\zeta < 1$ el sistema es subamortiguado entonces se debe buscar un valor de R tal que ζ en la Ecuación 30 sea igual 0.707, con lo cual se garantiza que la respuesta del sistema tenga una banda lineal para el paso de la frecuencia.

También es importante encontrar la relación de amplitud y fase que tiene el sistema y sabiendo que la Ecuación 33 muestra una suma lineal de armónicos linealmente independientes por lo que se establece la siguiente relación:

$$z(t) = Z(\omega)e^{i\omega t} \quad \text{Ecuación 35}$$

Y

$$u(t) = U(\omega)e^{i\omega t} \quad \text{Ecuación 36}$$

Reemplazando $u(t)$ como solución al sistema en la Ecuación 23

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega_0\dot{z} + \omega_0^2 z = -\ddot{u} \quad \text{Ecuación 37}$$

Derivando $u(t)$ dos veces se tiene:

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 U(\omega)e^{i\omega t} \quad \text{Ecuación 38}$$

De la misma manera tomando la Ecuación 35 y lo derivamos dos veces como lo indica la Ecuación 23 se tiene:

$$\ddot{z}(t) = -\omega^2 Z(\omega)e^{i\omega t} \quad \text{Ecuación 39}$$

La primera derivada de z se tiene

$$\dot{z}(t) = -i\omega Z(\omega)e^{i\omega t} \quad \text{Ecuación 40}$$

Al dividir entre $e^{i\omega t}$, se tiene:

$$\frac{Z(\omega)}{U(\omega)} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0\zeta} = 2\zeta_e\omega_0 \quad \text{Ecuación 41}$$

De la Ecuación 41 se determina que la amplitud y fase están dadas por:

$$A(\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega^2\omega_0^2}} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \frac{-2\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad \text{Ecuación 43}$$

Se debe encontrar una solución a la ecuación diferencial donde ingresa una excitación y sale como respuesta una diferencia de potencial del sensor. Solucionando la Ecuación 37, que tiene como solución general:

$$Z(t) = \frac{Z_o}{\cos\phi} e^{-\zeta\omega t} \cos(\omega\zeta t - \phi) \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde:

$$\phi = \arcsen(\zeta) \quad \text{Ecuación 45}$$

Y

$$\omega_d = \omega_o\sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{Ecuación 46}$$

Ahora teniendo en cuenta un sensor de velocidad:

$$V(t) = G_e \dot{Y}(t) \quad \text{Ecuación 47}$$

Donde G es la constante del generador eléctrico cargado

$$G_e = G \frac{R_e}{R + r} \quad \text{Ecuación 48}$$

Resolviendo se tiene:

$$Y(t) = \frac{u_o}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_o t} \left[\cos\left(\sqrt{\omega_o^2(1-\zeta^2)}\right) + \left(\sqrt{1-\zeta^2}\right) + \text{sen}\left(\sqrt{\omega_o^2(1-\zeta^2)}\right) + \zeta \right] \quad \text{Ecuación 49}$$

Reemplazando el resultado en la Ecuación 47 y derivando se tiene:

$$V(t) = G_e \frac{Y_o k}{\omega m} e^{-\zeta\omega_o t} (\omega_n t) \quad \text{Ecuación 50}$$

Reescribiendo de manera general:

$$V(t) = \left(G \frac{R}{R+r} \right) \frac{Y_{(0)} k}{(\sqrt{\omega_o^2(1-\zeta^2)}) m} e^{-\zeta\omega t} \left(\sqrt{\omega_o^2(1-\zeta^2)} \right) t \quad \text{Ecuación 51}$$

La Ecuación 51 representa la salida del sistema como una diferencia de potencial cuando existe una excitación al geófono.

3.4. Caracterización Elemento Sensor

La caracterización es una parte importante del diseño ya que permite verificar el funcionamiento y comportamiento del elemento sensor primario que para el presente proyecto es el geófono SM-24. La Tabla 13 muestra los valores característicos del SM-24.

Tabla 13. Características elemento sensor

Frecuencia Natural	10Hz
Open circuit (typical) Damping	0.25
Damping calibratio- shunt resistance	1,339 Ω
Damping with calibration shunt	0.6
Tolerance with calibration shunt	+ 5 %, - 0 %
Sensitivity	28.8 V/m/s (0.73 V/in/s)
Coil Resistance	375 Ω

El primer paso consiste en corroborar dos parámetros fundamentales de la Tabla 13 los cuales son la frecuencia natural en circuito abierto, también llamada resistencia infinita y el coeficiente de amortiguamiento electromecánico o damping, para esto se hace uso de un circuito como el mostrado en la Figura 20, el cual

debe excitar al geófono con una función impulso de tal manera que la polarización del electroimán produzca una elevación de la masa por un instante de tiempo, luego al despolarizar el electroimán, el campo desaparece dejando suelta la masa generando una diferencia de potencial la cual mostrara el comportamiento dinámico del sistema al ser visualizado mediante un sistema de adquisición.

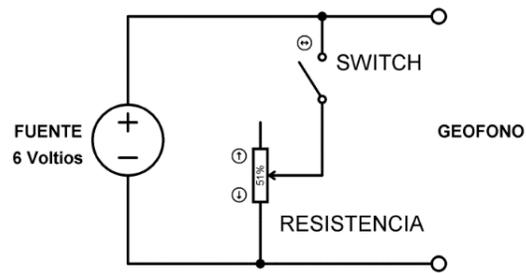


Figura 20. Circuito para excitación de geófono. Fuente propia

Luego de implementar el circuito descrito anteriormente se obtuvo los datos mostrados en la Figura 21.

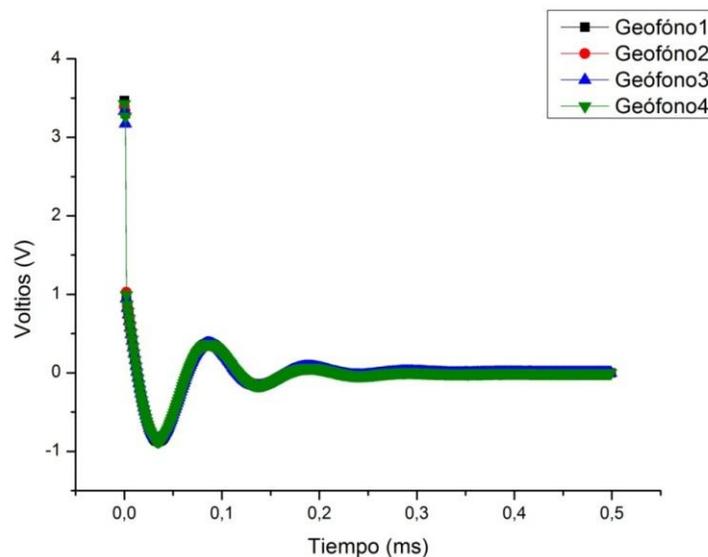


Figura 21. Respuesta al impulso de cuatro geófonos

Gráficamente se puede apreciar que el comportamiento dinámico del geófono corresponde a un sistema sub amortiguado de segundo orden ya que es la

respuesta característica frente a la entrada de un escalón unitario, con una diferencia de potencial de 6 volts en un intervalo de 20ms, esto implica que el valor de ζ o damping electromecánico debe estar entre 0 y 1 %.

Ahora de acuerdo a la información obtenida se observa que el damping del sistema depende exclusivamente del decaimiento logarítmico, por tanto al aplicar la Ecuación 15 y tomando los dos primeros picos consecutivos de la respuesta se obtiene el damping natural de cada geófono, así:

- Geófono 1: 0.2552
- Geófono 2: 0.2704
- Geófono 3: 0.2486
- Geófono 4: 0.2628

De acuerdo a las características dadas por el fabricante del geófono, ver Tabla 13, el valor del damping en circuito abierto debe ser de 0.25% con un porcentaje de error del 5% lo cual concuerda con los datos obtenidos en el experimento desarrollado. Para la obtención de los valores correspondientes a la frecuencia natural del geófono se aplica la transformada de Fourier a los mismos datos utilizados para el cálculo del damping, el espectro de frecuencia de los geófonos se muestra en la Figura 22 y se observa gráficamente que concuerdan con los valores esperados de la hoja característica mostrando una frecuencia de oscilación natural de 10hz.

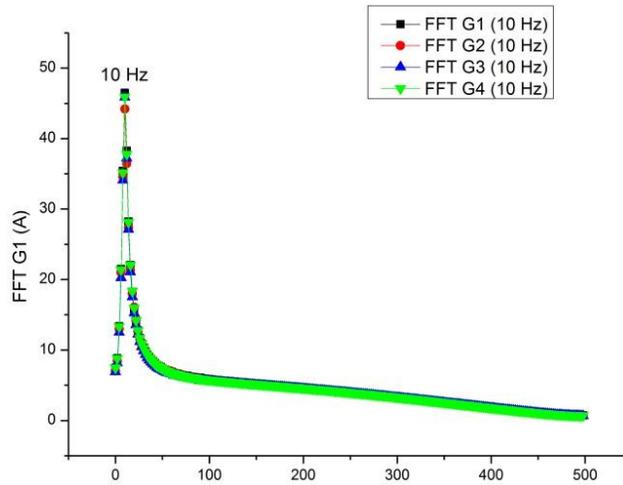


Figura 22. Espectro de frecuencias de los geófonos con resistencia de carga infinita. Fuente propia

El siguiente paso para la caracterización consta en cerrar el switch del circuito de caracterización del sistema, ver Figura 23, y colocar una resistencia de carga de 1339Ω esta resistencia modifica el coeficiente de amortiguamiento electromecánico o damping y afecta la respuesta del sistema frente a la misma entrada de tipo escalón (diferencia de potencial de 6 volts en un intervalo de 20ms), ver Figura 24, esta resistencia se coloca como valor de referencia por parte del fabricante para observar el correcto funcionamiento del geófono donde se espera obtener un damping aproximado de 0.6%, al aplicar la Ecuación 15 y al tomar de nuevo los dos primeros picos consecutivos se obtiene el damping natural del sistema, así:

- Geófono 1: 0.6340%
- Geófono 2: 0.6140%
- Geófono 3: 0.5940%
- Geófono 4: 0.6040%

En la Figura 23 se observa el circuito para caracterización del geófono con resistencia de carga.

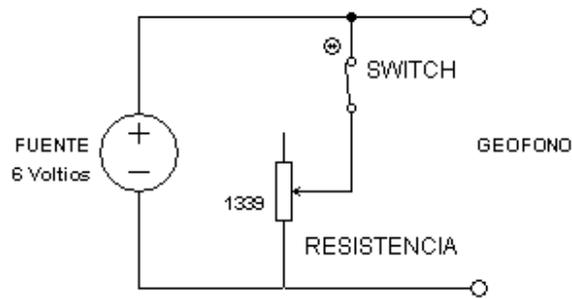


Figura 23. Circuito para caracterización con resistencia de carga. Fuente propia

En la Figura 23 se observa la respuesta del sistema con una entrada de tipo escalón y resistencia de carga.

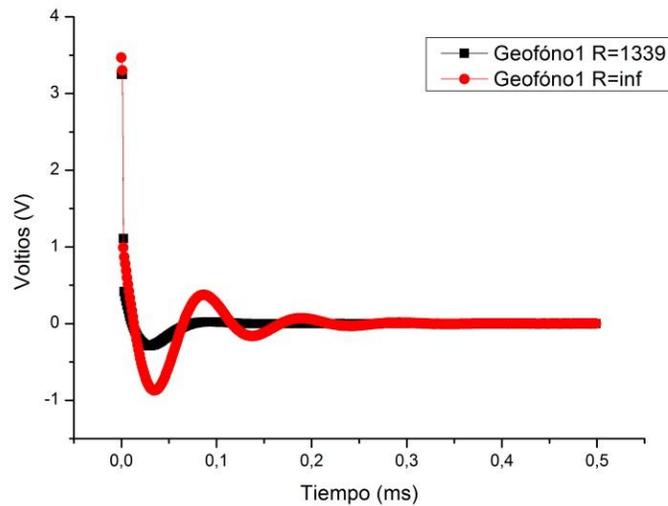


Figura 24. Respuesta al impulso del geófono con resistencia de carga de 1339.

Fuente propia

Si se aplica la transformada de Fourier a los datos se obtiene una respuesta como la observada en la Figura 25, se tiene como respuesta un corrimiento en función de la frecuencia natural del sistema, con lo que se concluye que la resistencia de carga produce una modificación de la respuesta del sistema lo cual tiene concordancia con la funcionalidad de un amortiguador y es la de atenuar la energía del sistema.

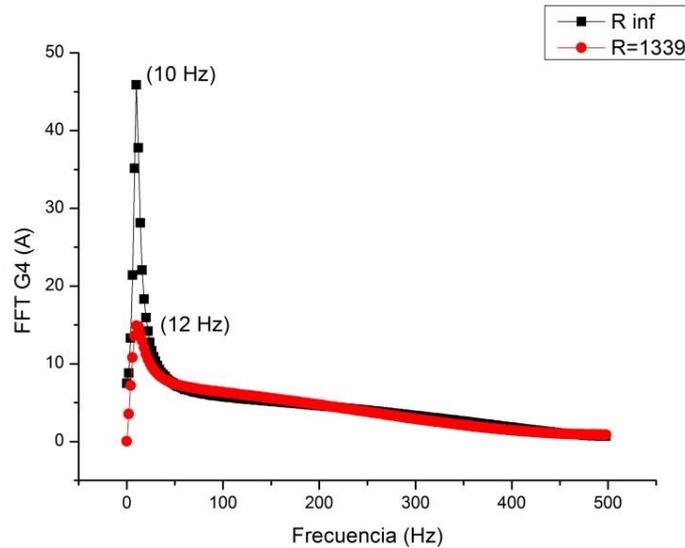


Figura 25. Figura transformada de Fourier geófono con resistencia de carga de 1339Ω

De acuerdo a (*Jens Havskov, Institute of Solid Earth Physics University of Bergen Norway* ecuación 10.6) todos los sistema de segundo orden con un damping del 0.70% tienen la ventaja de tener una respuesta completamente lineal y aprovechar todo el rango de frecuencias del sistema, de acuerdo a esto para obtener dicho porcentaje se hace necesario incluir una resistencia de carga de 1562Ω implementando la ecuación 10.6, La respuesta de los geófonos se muestra en la Figura 26.

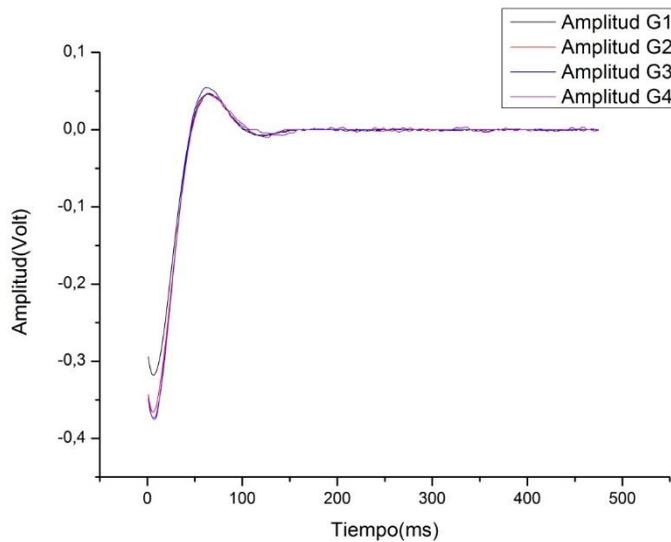


Figura 26. Respuesta de geófonos con resistencia de carga 1562 Ohms

La Figura 26 muestra una respuesta de un sistema de segundo orden con un damping del 0.707 % donde la respuesta es lineal y tendrá la posibilidad de aprovechar todo el rango de frecuencias dinámicas.

3.5. Implementación Hardware Del Sistema

En este capítulo 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 5.9.0 versión de evaluación. En el diseño se tuvo en cuenta las reglas que da el fabricante de tarjetas de circuito impreso, en relación a los anchos y distancias entre pistas y dimensiones de pads. En el Anexo A se muestra como se generan los archivos Gerber solicitados por la empresa para la fabricación de la tarjeta de adquisición.

En esta apartado se encuentra tanto el diseño esquemático como el diseño del circuito impreso.

3.5.1. Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición

En esta sección se presenta el resultado del diseño de la tarjeta de adquisición el cual se desarrolló con la herramienta CAD CadSoft Eagle. En la Figura 27 se observa el diseño esquemático obtenido, donde se encuentra cada etapa descrita en la sección *Diseño Hardware*.

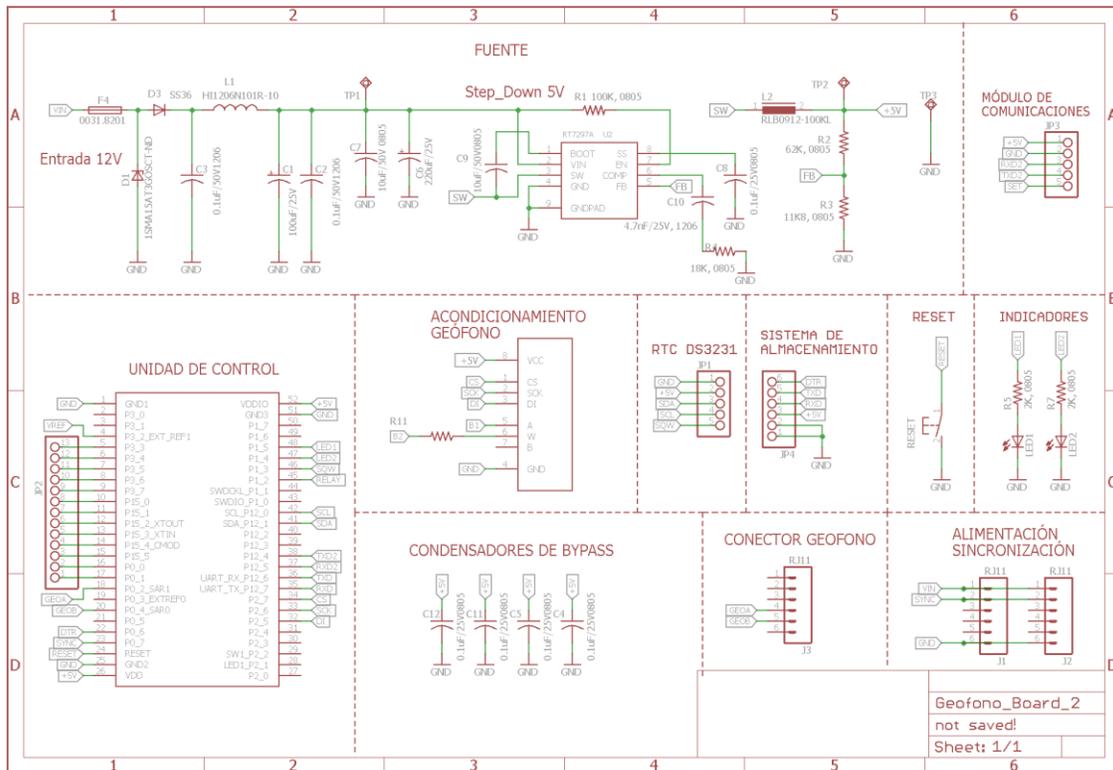


Figura 27. Diseño esquemático de la tarjeta de adquisición. Fuente propia

3.5.2. Diseño de circuito impreso de la tarjeta de adquisición

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

En la Figura 28 se observa la capa top en la parte superior de la imagen (en color rojo) y la capa bottom en la parte inferior de la imagen (en color azul) del diseño del circuito impreso de la tarjeta de adquisición.

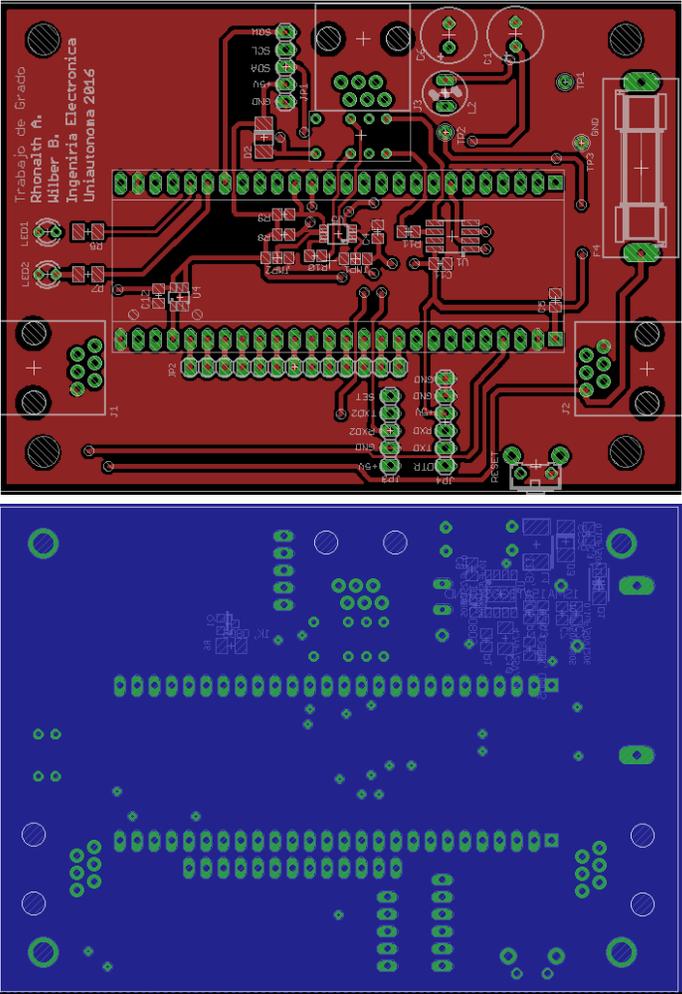


Figura 28. Caras anterior y posterior de tarjeta de adquisición. Fuente propia.

En la Figura 29 se observa la capa de componentes del diseño del circuito impreso PCB.

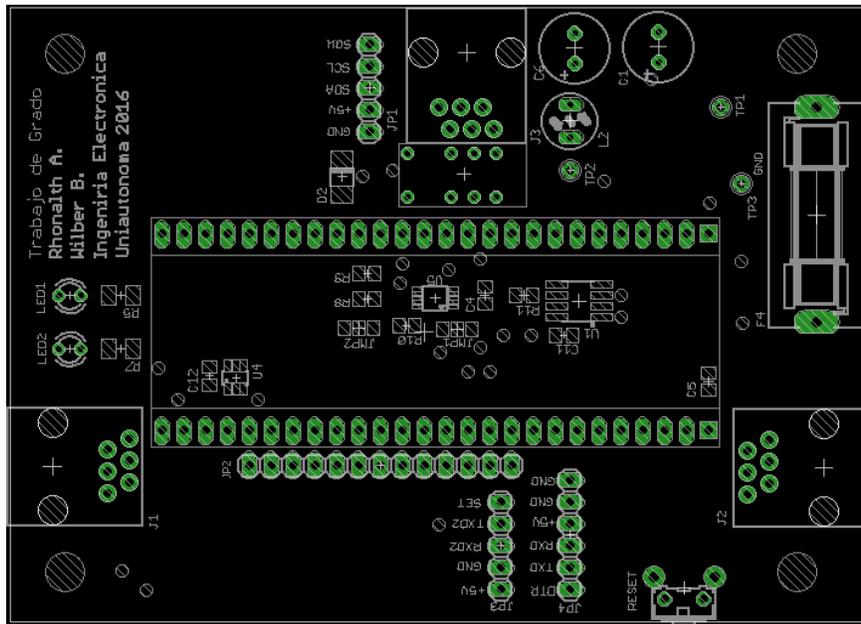


Figura 29. Capa de componentes tarjeta de adquisición. Fuente propia.

Una vez se tienen fabricadas las cuatro tarjetas de adquisición que hacen parte del sistema de geófonos, se realiza el proceso de ensamble de las mismas, donde son soldados los componentes y montados los módulos que hacen parte de la tarjeta, la cual finalmente es ubicada dentro de una caja para protegerla de factores que pueden deteriorarla como el polvo. Al finalizar el proceso de ensamble se obtienen los resultados presentados en la Figura 30, en la cual se observa una tarjeta de adquisición ensamblada y con la descripción de las partes más relevantes de la misma.

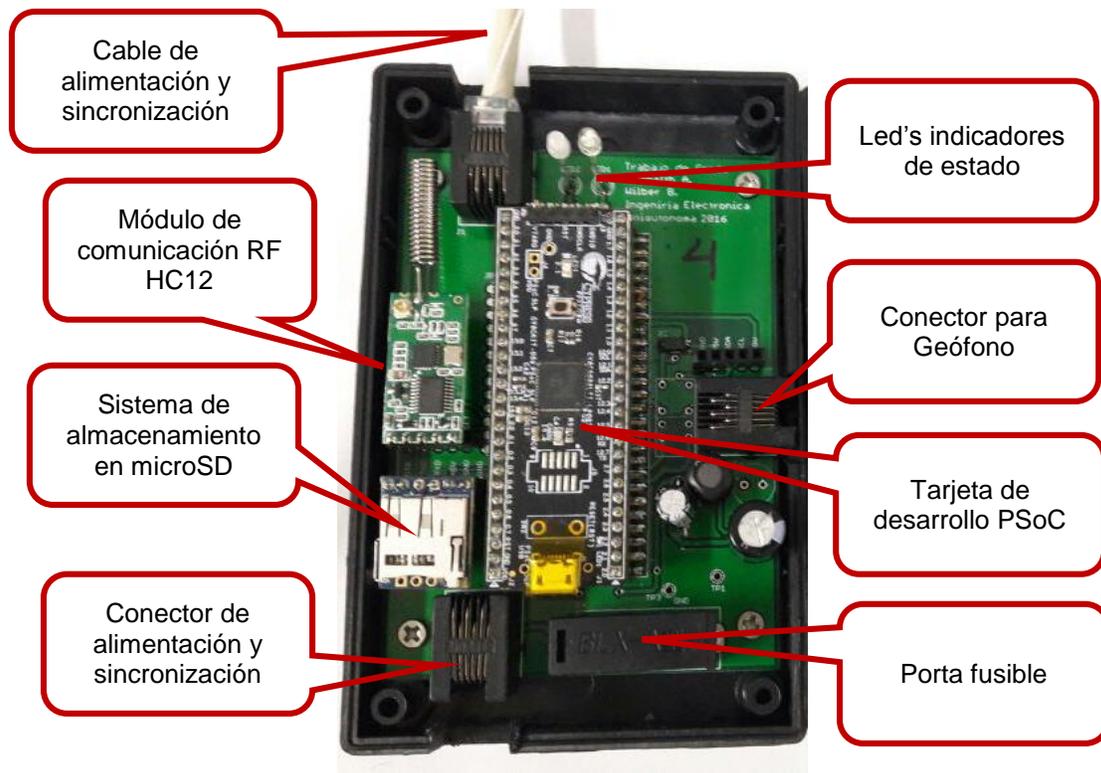


Figura 30. Tarjeta de adquisición ensamblada. Fuente propia

CAPÍTULO IV: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN SOFTWARE DEL SISTEMA

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

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

A continuación se encuentra la descripción de la implementación del código de la tarjeta de adquisición, seguidamente se encontrara la implementación de la interfaz gráfica.

4.1. Programación tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059

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

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

- Convertidor ADC Delta Sigma. Descripción de configuración completa en Anexo B.
- Módulo de comunicación UART. Descripción de configuración completa en Anexo C.

- Módulo de memoria EEPROM. Descripción de configuración completa en Anexo D.
- Pines para manejo de indicadores LED. Descripción de configuración completa en Anexo E.

Se adiciona cada bloque al proyecto como se observa en la Figura 31.

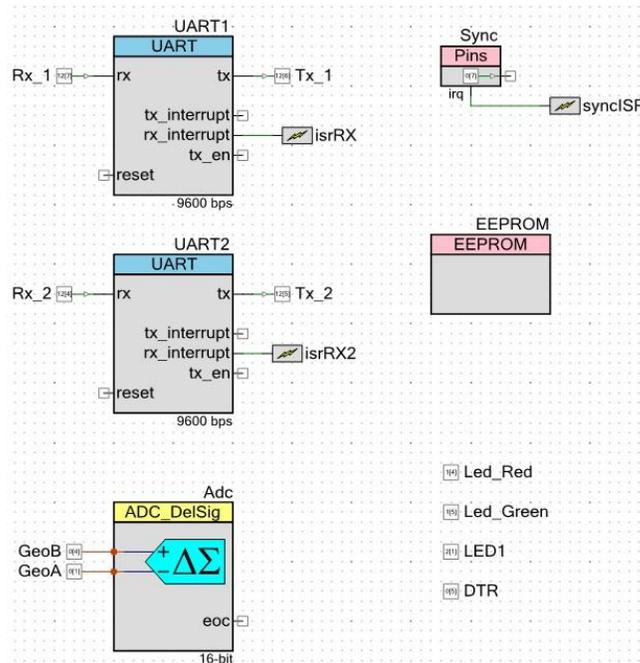


Figura 31. Bloques de programación PSoC Creator. Fuente propia

Una vez se han configurado los bloques se deben asignar los pines al controlador de la tarjeta de desarrollo como se observa en la

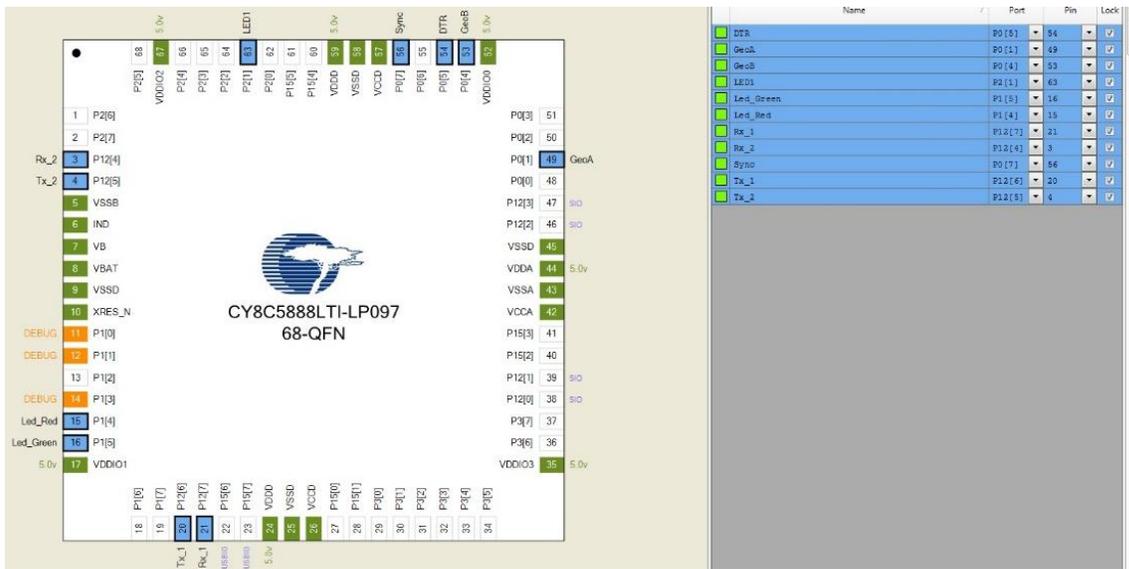


Figura 32. Asignación de pines al controlador. Fuente propia

Finalmente se realiza la codificación del programa que maneja la adquisición, almacenamiento y transmisión vía inalámbrica de los datos a un PC. En la Figura 33 se presenta el diagrama de flujo que representa el algoritmo implementado. En el Anexo F se encuentra el código completo de la tarjeta de adquisición.

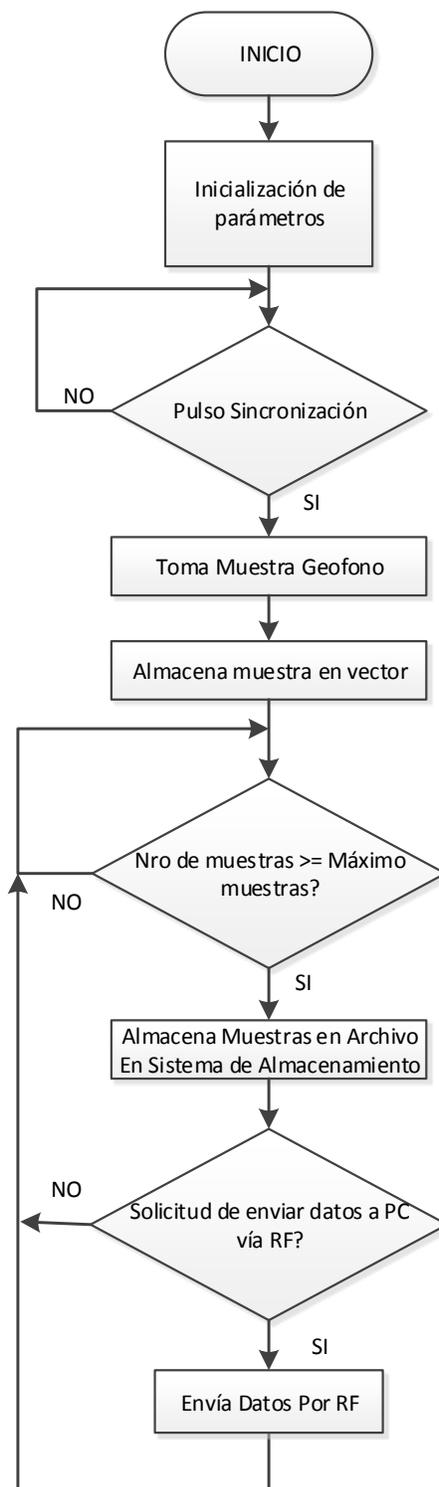


Figura 33. Diagrama de flujo algoritmo implementado. Fuente propia

4.2. Programación interfaz gráfica de usuario

En la siguiente sección se presenta de manera resumida la programación de la interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada con el software Labview versión estudiantil.

En la Figura 34 se observa el diagrama de flujo que representa el código implementado en el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario.

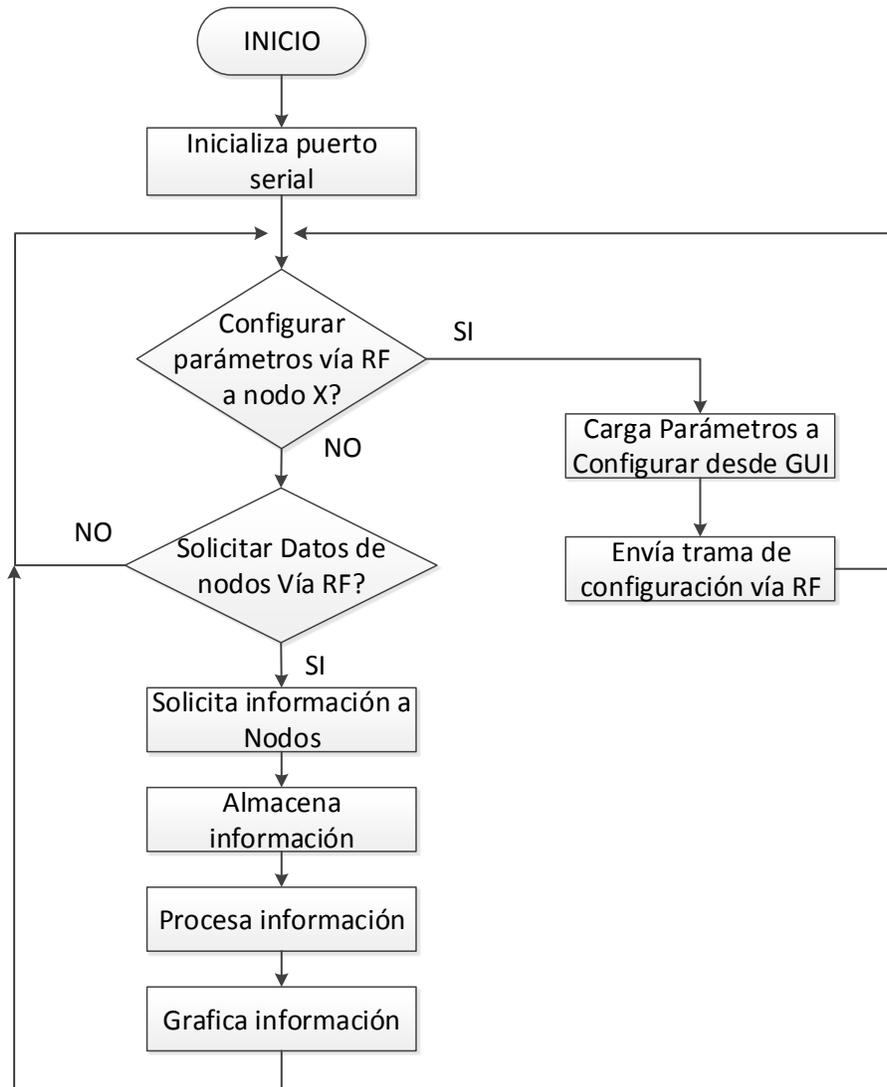


Figura 34. Diagrama de flujo interfaz gráfica de usuario. Fuente propia.

Tramas de comunicación entre PC y geófonos

Para establecer comunicación vía radio frecuencia entre la aplicación de usuario creada en Labview y la tarjeta de adquisición de cada geófono, se establece un formato de trama que se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Formato de trama de comunicación entre aplicación de PC y tarjeta de adquisición.

Llave	ID Geófono	Tipo de Trama	Muestras	Habilita interrupción
\$@	1	0	10000	1

Llave: Combinación de caracteres para indicar que es una trama del sistema.

ID Geófono: número correspondiente al identificador del geófono.

Tipo de trama: a continuación se listan los tipos de trama implementados:

- 0: Configuración: Permite configurar el número de muestras a tomar e interrupción para sincronizar un nodo.
- 1: Lectura de parámetros: Permite leer los parámetros configurados a una tarjeta de adquisición.
- 2: Lectura de la información del nodo X: Permite leer los datos que se encuentran en el sistema de almacenamiento de la tarjeta de adquisición.
- 3: Estado de conexión del nodo X: Permite encuestar un nodo con el fin de determinar si se encuentra activo en la red de sensores,

Muestras: cantidad de muestras (en formato hexadecimal), a tomar en una prueba.

Habilita interrupción: habilita la interrupción de sincronización.

Diseño e implementación de interfaz gráfica de usuario

El diseño de la interfaz gráfica de usuario propuesto se compone de tres pestañas, una de configuración, una de almacenamiento y una de procesamiento. A continuación se describe cada una de ellas.

Configuración: Este panel contiene los parámetros básicos de configuración de las tarjetas de adquisición, los cuales se listan a continuación:

- Configparams: Configura el número de muestras y la interrupción para sincronizar un nodo.
- Readparams: solicita la configuración programada de un nodo específico.
- ReadNode: solicita la información almacenada a cada nodo por separado.
- TestNode: verifica el estado de un nodo en la red.
- ID: Numero que identifica a cada geófono.
- NSamples: número de muestras a tomar en el experimento (15000 máximo).
- Int: Habilita la Interrupción de sincronización, la cual se activa en el instante que se genera la onda de forma artificial.
- Send: Botón para enviar la configuración por RF.

En la Figura 35 se observa el panel de configuración.

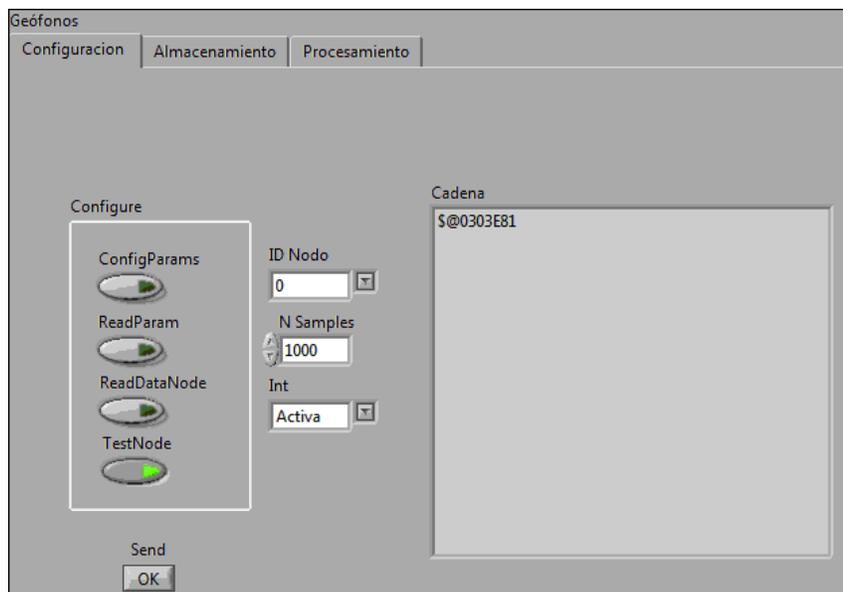


Figura 35. Panel frontal para la configuración de las tarjetas de adquisición.

Fuente Propia

La siguiente figura muestra el código implementado para envío de información por puerto serial mediante módulos RF hacia los geófonos.

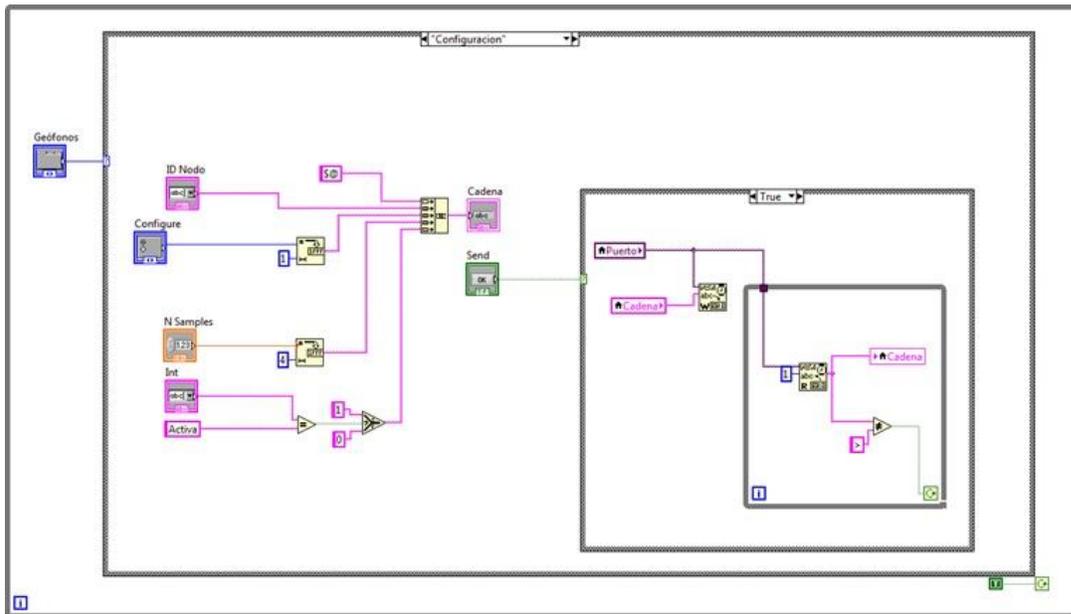


Figura 36. Código para configuración de tarjetas de adquisición. Fuente Propia

Almacenamiento: Pestaña en la cual se gestiona la recepción de datos de los geófonos y se guarda en un archivo con extensión CSV en una ruta específica en el computador donde se ejecuta la aplicación. En la Figura 37 se observa el panel de almacenamiento.

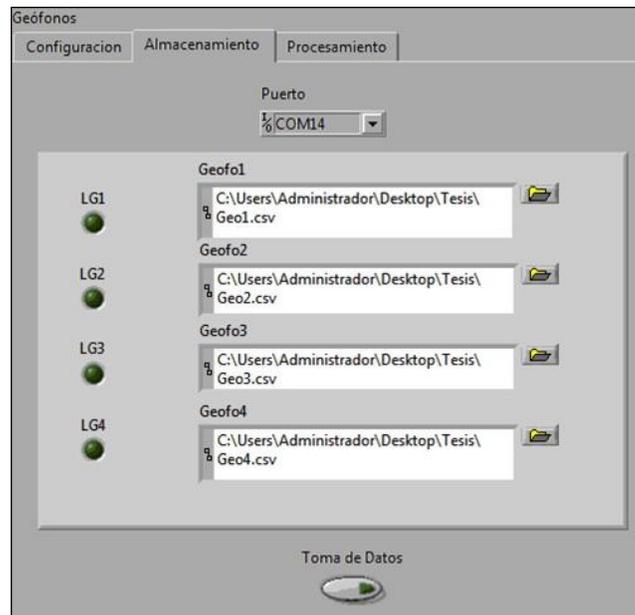


Figura 37 Interfaz para captura y almacenamiento de información. Fuente Propia

Procesamiento: en esta pestaña se muestra la información en un plot con los datos guardados en la pestaña *Almacenamiento*, dichos valores son separados en dos columnas las cuales corresponden a información de tiempo y amplitud; se agrega a cada señal un control de offset con el propósito de diferenciar las 4 señales obtenidas por los geófonos. La interfaz está desarrollada con dos waveform char, esto es con el propósito de mostrar una imagen sin filtro digital y la segunda aplicando un filtro de Kalman de primer orden para mejorar la respuesta de la señal.

En la Figura 38 se observa el panel de configuración.

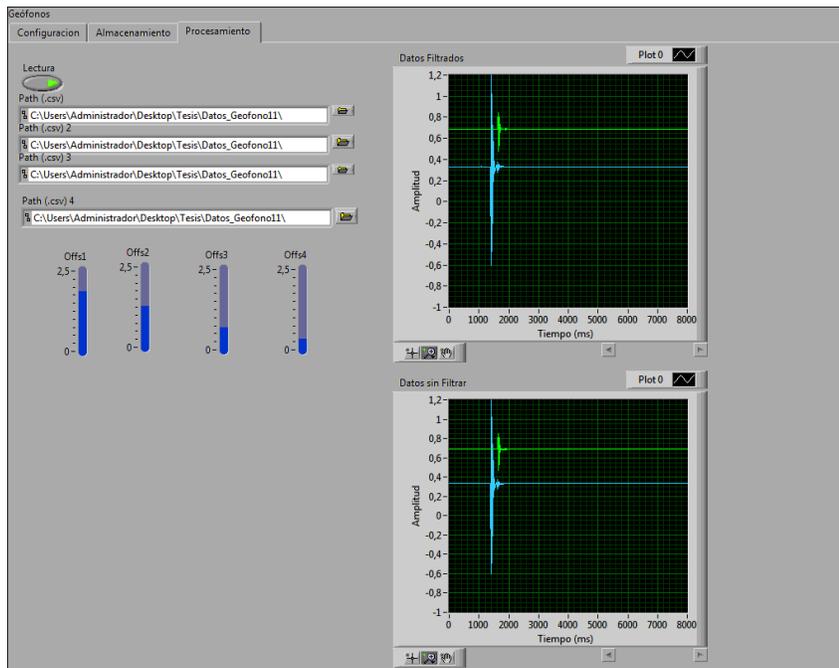


Figura 38. Interfaz de visualización de gráficas. Fuente propia.

En el Anexo G se encuentra el código de la interfaz de usuario implementada.

CAPÍTULO V: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Pruebas En Campo

En el presente capítulo se plantea el diseño del procedimiento e implementación de las pruebas realizadas con el sistema de geófonos, con el fin de recolectar la información necesaria para obtener un vector de velocidad a partir de datos reales.

A continuación se encuentran la lista de materiales y el procedimiento que se debe realizar en cada una de las pruebas planteadas.

En la Tabla 15 se encuentra la lista de materiales requeridos en la primer prueba en campo, seguidamente se plantea el procedimiento a ejecutar.

Tabla 15. Lista de materiales para prueba #1

Cantidad	Descripción
1	Fuente de alimentación (Batería seca de 12v)
1	Placa de acero de 20cm * 20cm.
1	Maso de 14 libras. (6,35029) kilos
4	Geófonos.
4	Tarjetas de adquisición.
1	Computador portátil.
4	Cables de alimentación y sincronización.
4	Memorias Micro SD.

5.1.1. Procedimiento

A continuación se describe el procedimiento para realizar pruebas con el sistema de geófonos desarrollado. El proceso en cada prueba desarrollada es el mismo, sin embargo se realizan modificaciones en la selección del terreno, ubicación de la fuente de ondas artificiales y distancia entre geófonos con el fin de obtener diferentes resultados en cada prueba desarrollada.

A continuación se encuentra descrito el procedimiento:

1. Establecer distancias simétricas entre geófonos, también conocida como distancia geofónica.

2. Definir terreno para el desarrollo de la prueba según la distancia geofónica establecida en el punto 1.
3. Verificar que el cable de alimentación/sincronización se encuentre conectado a cada tarjeta de adquisición.
4. Enterrar la punta metálica de la carcasa del geófono en el punto que indique la distancia geofónica establecida en el punto 1.
5. Ubicar la fuente de generación de ondas artificiales a media distancia geofónica del geófono 1, el mazo y la placa son utilizados como fuente de ondas.
6. Encender la fuente de alimentación.
7. Verificar el encendido de todas las tarjetas de adquisición.
8. Golpear la placa con el mazo para generar ondas artificiales en el terreno.

5.1.2. Prueba #1

1. Se establece que la distancia entre geófonos o distancia geofónica será de un (1) metro.
2. Se ubica un terreno con más de cinco metros de largo.
3. Se verifica que tanto el cable de alimentación/sincronización como el cable del geófono se encuentren conectados en cada tarjeta de adquisición.



Figura 39. Verificación de cables de alimentación y de conexión con geófonos.

Fuente Propia

4. Se enterró la punta metálica de la carcasa de cada geófono en el punto que indique la distancia geofónica establecida en el punto 1.



Figura 40. Verificar distancia entre geófonos. Fuente Propia

5. Se verifico la distancia entre el primer y último geófono, como se observa en la Figura 41.



Figura 41. Medición de terreno para la disposición de los geófonos. Fuente Propia

6. Se ubicó la fuente de generación de ondas artificiales a media distancia geofónica del geófono 1, el mazo y la placa son utilizados como fuente de ondas artificiales. En la Figura 42 se observan los elementos que componen la fuente de ondas en las pruebas realizadas.



Figura 42. Fuente de ondas artificiales. Fuente Propia

7. Se enciende la fuente de alimentación, como se observa en la Figura 43.



Figura 43. Encendido de fuente de alimentación. Fuente Propia.

8. Se verifico que en todas las tarjetas de adquisición encendieran los dos led's indicadores.
9. Finalmente se golpeó la placa con el mazo como se observa en la Figura 44 y se generaron ondas artificiales en el terreno. En el momento que el martillo toca la placa se ejecuta la interrupción de sincronización y las tarjetas de adquisición inician el proceso de toma de datos.



Figura 44. Generación artificial de las ondas. Fuente Propia

Resultados y análisis Prueba #1

Al finalizar la prueba se obtuvo cuatro archivos en formato CSV, los datos de dichos archivos fueron graficados en Origin Lab para un mejor análisis, esto debido a la resolución de las gráficas que brinda este software; el resultado se observa en la Figura 45; donde en negro se encuentra la respuesta del geófono 1, en rojo la respuesta del geófono 2, en azul la respuesta del geófono 3 y en rosado la respuesta del geófono 4.

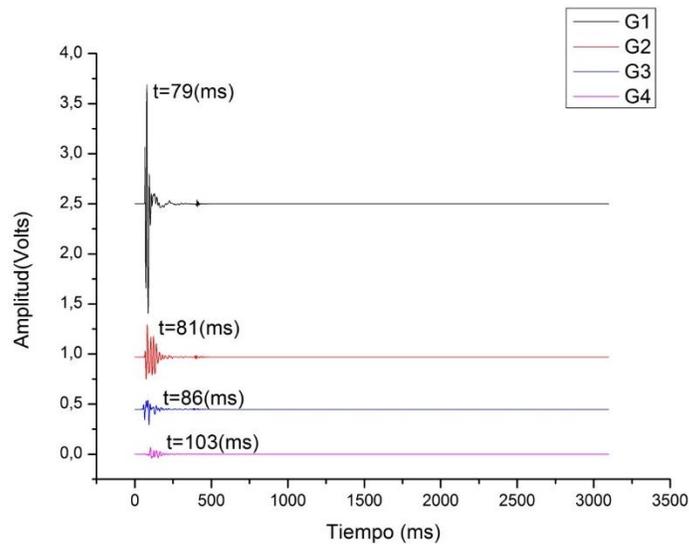


Figura 45. Respuesta de los geófonos a la excitación del golpe. Fuente Propia

Como se observa en la Figura 45 el geófono 1 presenta la mayor amplitud debido a la proximidad con la fuente, 50 centímetros aproximadamente, por su parte el geófono 4 presenta la menor amplitud del sistema, ya que entre la fuente y el último geófono hay una mayor distancia, 4.5 metros aproximadamente.

De la Figura 45 es posible determinar el vector velocidad del suelo puesto que se conoce el tiempo de la amplitud máxima de cada geófono y la distancia, entonces aplicando la ecuación $v = \frac{x}{t}$ se calcula la velocidad.

Para el primer intervalo, entre los geófonos 1 y 2 se tiene:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{1}{81 - 79} = 500m/s$$

Para el segundo intervalo, entre los geófonos 2 y 3 se tiene:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{1}{86 - 81} = 200m/s$$

Para el tercer intervalo, entre los geófonos 3 y 4 se tiene:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{1}{103 - 86} = 58.82m/s$$

Se sabe que en los medios de mayor densidad, la velocidad es superior debido a que las moléculas son más compactas, esto permite transmitir de mejor manera la energía entre moléculas, teniendo claro este concepto se deduce de los datos obtenidos que el medio donde el geófono muestra un suelo menos denso se encuentra en el tercer intervalo entre el geófono 3 y 4 ya que contiene el 10% de la velocidad inicial, 500 m/s, en una distancia de 4.5 metros.

La respuesta en frecuencia de las muestras se observa en la Figura 46.

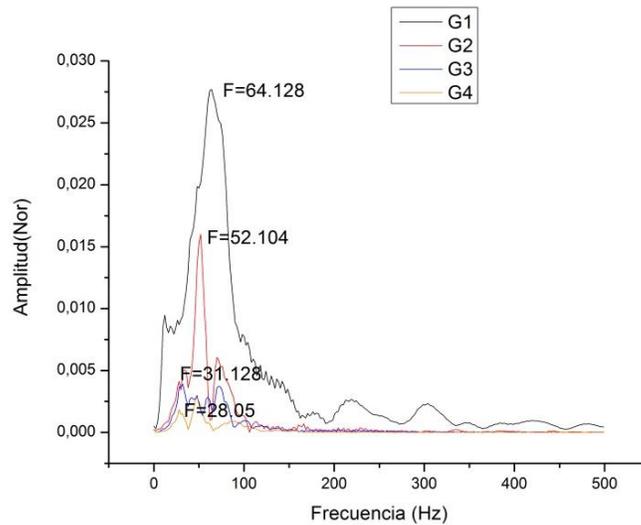


Figura 46. Espectro de frecuencias de la prueba. Fuente Propia

La Figura 46 muestra la distribución de mayores componentes frecuenciales para cada uno de los geófonos, la correlación de frecuencias mostrada indica que la fuente es la encargada de generar dicha excitación, los demás espectros observados son producidos por fuentes externas asociadas a ruido ambiental (ruido ambiental: vibraciones externas diferentes a la fuente). Esta información es relevante para la caracterización de suelo en geológica ya que sabiendo las componentes es posible determinar la composición del suelo, se plantea que ese análisis se realice en un trabajo futuro.

5.1.3. Prueba #2

1. Se establece que la distancia entre geófonos o distancia geofónica será de dos (2) metros.
2. Se ubica un terreno con más de ocho metros de largo.
3. Se verifica que tanto el cable de alimentación/sincronización como el cable del geófono se encuentren conectados en cada tarjeta de adquisición.
4. Se enterró la punta metálica de la carcasa de cada geófono con dos metros de separación dada la distancia geofónica establecida en el punto 1, como se observa en la Figura 47.



Figura 47. Disposición de los geófonos. Fuente Propia

5. Se verifico la distancia entre el primer y último geófono.
6. Se ubicó la fuente de generación de ondas artificiales a media distancia geofónica del geófono 4 (un metro), el mazo y la placa son utilizados como

fuente de ondas artificiales. En la Figura 42 se observan los elementos que componen la fuente de ondas en las pruebas realizadas.

7. Se enciende la fuente de alimentación.
8. Se verifico que en todas las tarjetas de adquisición encendieran los dos led's indicadores.
9. Finalmente se golpeó la placa con el mazo y se generaron ondas artificiales en el terreno. En el momento que el martillo toca la placa se ejecuta la interrupción de sincronización y las tarjetas de adquisición inician el proceso de toma de datos.

Resultados y análisis Prueba #2

Al finalizar la prueba se obtuvieron cuatro archivos en formato CSV que al ser graficados en la interfaz de usuario mostraron en resultado que se observa en la Figura 48. Donde en negro se encuentra la respuesta del geófono 1, en rojo la respuesta del geófono 2, en azul la respuesta del geófono 3 y en púrpura la respuesta del geófono 4.

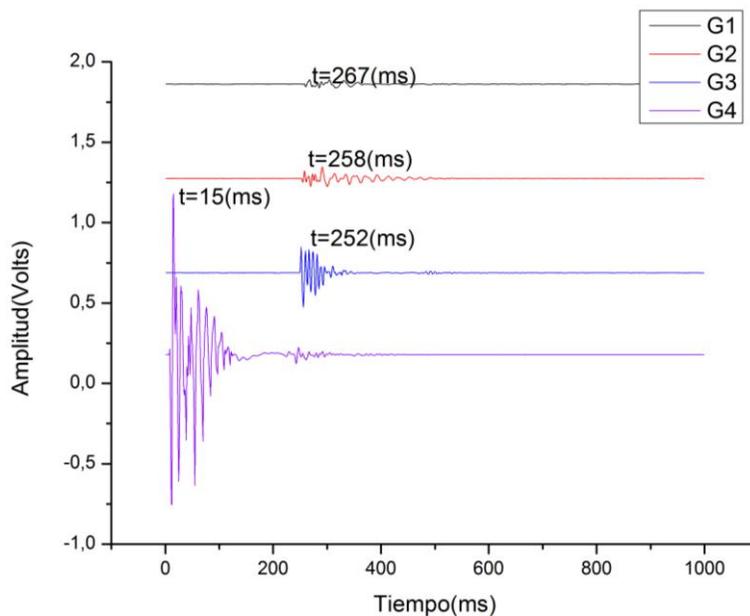


Figura 48. Respuesta de los geófonos a la excitación de la fuente cerca al geófono 4. Fuente Propia

Como se observa en la Figura 48 la modificación de la ubicación de la fuente artificial de ondas generó una respuesta opuesta a la obtenida en la primera prueba ya que el geófono 4 presenta la mayor amplitud debido a la proximidad con la fuente, un metro aproximadamente, por su parte el geófono 1 presenta la menor amplitud en las respuestas del sistema, ya que entre la fuente y el último geófono hay una mayor distancia, 7 metros aproximadamente.

Al igual que en los resultados de la prueba anterior se determina el vector de velocidad para la prueba desarrollada.

Para el primer intervalo, entre los geófonos 1 y 2 se tiene:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{2}{252 - 15} = 8.43 \text{ m/s}$$

Para el segundo intervalo, entre los geófonos 2 y 3 se tiene:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{2}{258 - 252} = 333.33 \text{ m/s}$$

Para el tercer intervalo, entre los geófonos 3 y 4 se tiene:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{2}{267 - 258} = 222.222 \text{ m/s}$$

El vector de velocidad indica que la onda pasa de un medio menos denso a otro más denso ya que la velocidad se incrementa de 8.43 m/s a 222.22 m/s mostrando mayor compactación sobre el suelo donde se encuentra el geófono número 1.

El espectro frecuencial se muestra en la Figura 49 donde se observa que la correlación de las frecuencias es muy baja en la frecuencia de los 69 hz, en comparación a la primera prueba desarrollada este suelo muestra una menor

densidad o consistencia este fenómeno se puede dar debido a que a una distancia no muy profunda pueden existir niveles freáticos o suelos húmedos muy superficiales cercanos al primer geófono. Las demás frecuencias son producidas por ruido ambiental debido a que en la zona donde se desarrolló la prueba transitan muchas personas.

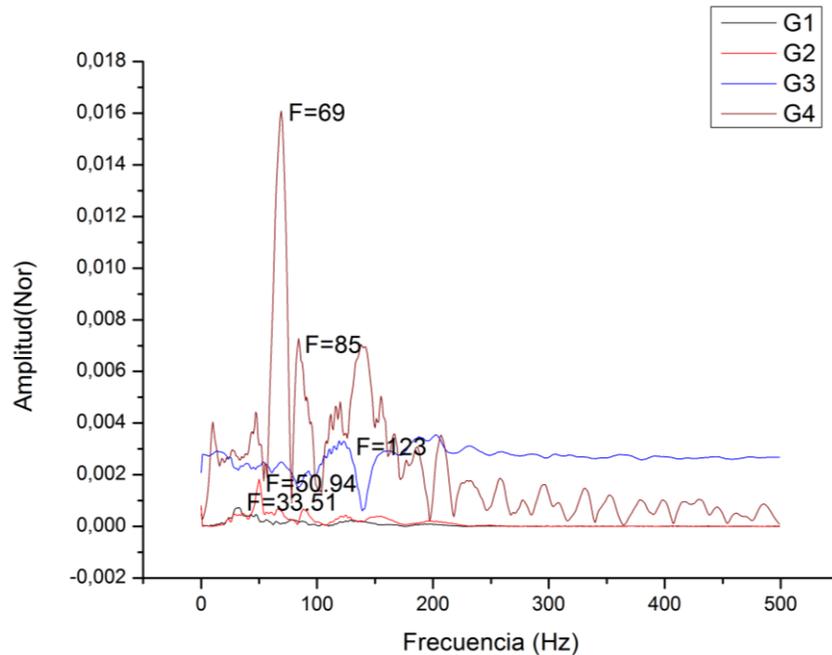


Figura 49. Espectro de frecuencias de la prueba #2. Fuente Propia

5.1.4. Prueba #3

1. Se establece que la distancia entre geófonos o distancia geofónica será de dos (2) metros.
2. Se ubica un terreno con más de ocho metros de largo.
3. Se verifica que tanto el cable de alimentación/sincronización como el cable del geófono se encuentren conectados en cada tarjeta de adquisición.
4. Se entierra la punta metálica de la carcasa de cada geófono con dos metros de separación dada la distancia geofónica establecida en el punto 1.

5. Se verifico la distancia entre el primer y último geófono.
6. Se ubicó la fuente de generación de ondas artificiales en medio de los geófonos 2 y 3, el mazo y la placa son utilizados como fuente de ondas artificiales. Como se observa en la Figura 50.



Figura 50. Disposición de la fuente en la mitad de los nodos. Fuente propia.

7. Se enciende la fuente de alimentación.
8. Se verifico que en todas las tarjetas de adquisición encendieran los dos led's indicadores.
9. Finalmente se golpeó la placa con el mazo y se generaron ondas artificiales en el terreno. En el momento que el martillo toca la placa se ejecuta la

interrupción de sincronización y las tarjetas de adquisición inician el proceso de toma de datos.

Resultados y análisis Prueba #3

Al finalizar la prueba se obtienen cuatro archivos en formato CSV que al ser graficados en la interfaz de usuario mostraron el resultado que se observa en la Figura 51. Donde en negro se encuentra la respuesta del geófono 1, en rojo la respuesta del geófono 2, en azul la respuesta del geófono 3 y en rosado la respuesta del geófono 4.

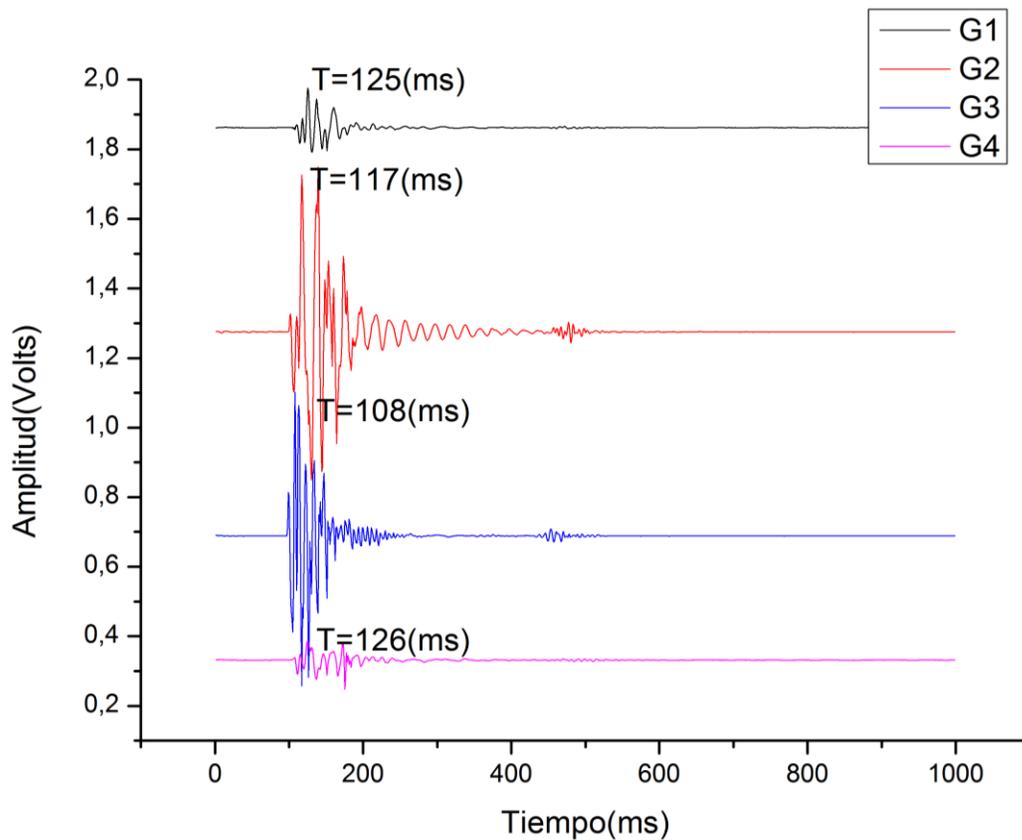


Figura 51. Respuesta de los geófonos a la excitación de la fuente. Fuente Propia

Se observa una simetría entre los geófono intermedios, esto se presenta debido a la ubicación de la fuente artificial de ondas, por lo que se calcula el vector velocidad en función de la disposición de la fuente, como se muestra a continuación.

Para el primer intervalo:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{2}{126 - 108} = 111.11m/s$$

Para el segundo intervalo:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{2}{117 - 108} = 222.22m/s$$

Para el tercer intervalo:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{2}{125 - 117} = 250m/s$$

Las pruebas 2 y 3 se desarrollaron sobre el mismo suelo, variando la ubicación de la fuente de ondas artificial, como se indicó en las dos pruebas anteriores, al observar los datos obtenidos se muestra una correspondencia en los valores de velocidad, por ejemplo al analizar las velocidades obtenidas entre los geófonos 1 y 2 se observa que prácticamente son equivalentes 222.22 m/s para la primera prueba y 250 m/s para la segunda, la diferencia entre las dos radica en la fuente de ondas debido a que no se tiene control sobre la energía en el golpe de inyección sobre la placa, y la disipación natural del suelo es esencial para poder introducir un factor de corrección cuyo parámetro es desconocido, es aquí donde nacen otras necesidades para trabajos futuros como el diseño de una fuente de ondas controlada.

El espectro de frecuencia en la Figura 52 muestra una amplitud mayor correspondiente al geófono dos esto se debe a que la fuente está más próxima a dicho sensor por lo que alcanza la máxima amplitud. Es posible observar la correspondencia de frecuencias entra la figura 49 y la figura 52 sobre el pico de 85.54 Hz las dos permiten concluir que el pico observado corresponde a una densidad de suelo similar ya que la repuesta es la misma aunque con diferente amplitud, los demás picos obtenidos después de los 150 Hz pudieron ser producidos por características de ruido ambiental provocado por el paso de cuerpos en movimiento cercanos a la prueba.

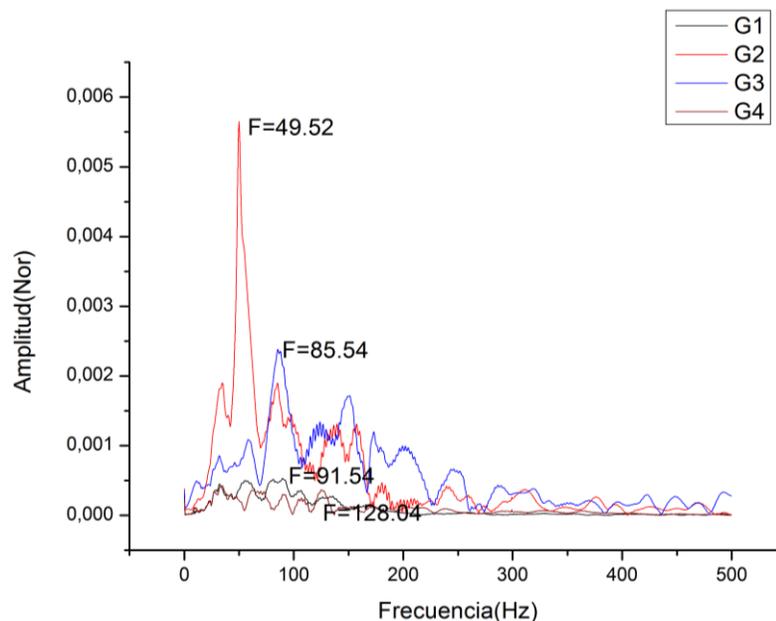


Figura 52. Espectro de frecuencias de la prueba #3. Fuente Propia

Es importante tener en cuenta que las ondas generadas con la fuente dependen de la fuerza con que se golpea la placa de acero por tanto si la señal es repetitiva y tiene las mismas características de fuerza aplicada, se debería tener exactamente la misma respuesta tanto en frecuencia como en amplitud.

5.2. Conclusiones

1. Se diseñó una tarjeta electrónica basada en la tecnología PSoC de la empresa Cypress, en la cual se implementa la adquisición de las medidas de vibración de un suelo entregadas por un geófono (sensor), y gestiona el almacenamiento y transmisión de datos de forma inalámbrica hacia un computador portátil.
2. Se implementó una red inalámbrica de sensores con la tarjeta de adquisición diseñada y los geófonos seleccionados, con los cuales se realizaron pruebas en campo que generaron la información esperada para la caracterización de un suelo.
3. Luego de procesar y analizar los datos recopilados en cada prueba se obtuvo un vector de velocidad asociado a las características de cada suelo caso de estudio.
4. El cumplimiento de los objetivos planteados en el inicio de este proyecto demuestra que existen necesidades tanto a nivel académico como a nivel industrial que pueden ser cubiertas con el desarrollo de equipos electrónicos nacionales y a bajo costo.
5. El análisis espectral de las diferentes pruebas realizadas muestra frecuencias con las mismas características, esto indica que la fuente generadora de las vibraciones es común a la excitación de los geófonos e independiente de las densidades de los suelos en los que se realizaron las pruebas.
6. Finalmente se puede decir que se aumentó el conocimiento y se sentó una base teórica y práctica sobre los temas que se trataron en el presente trabajo de grado, ya que se apropiaron los elementos para la resolución de un problema particular generando resultados satisfactorios.
7. PSoC permite reducir de manera eficiente el uso del hardware ya que por su arquitectura es posible implementar diferentes funcionalidades con un solo integrado.

8. Se integraron diversas áreas del conocimiento como electrónica y geofísica para el desarrollo de este primer prototipo el cual queda como un primer paso para contribuir en la curva del conocimiento en el área de diseño de equipos.

5.3. Trabajos futuros

A continuación se listaran algunas propuestas planteadas como trabajos futuros, sin embargo cabe mencionar que las mejoras que se pueden realizar al sistema desarrollado en el presente proyecto son variadas y van desde la implementación de nodos adicionales, hasta el mejoramiento de la interfaz de usuario; seguidamente se encuentran las propuestas que el equipo de trabajo ha considerado más importantes.

1. Diseñar e implementar un sistema que genere ondas artificiales de forma automática, así mismo que determine la cantidad de energía suministrada en el impacto, ya que esto permite desarrollar pruebas con parámetros de entrada constantes lo cual genera repetitividad en las mismas.
2. Con el fin de cubrir áreas más extensas que las trabajadas en el presente proyecto se propone incrementar el número de nodos (tarjetas de adquisición + geófono), lo cual permite recolectar mayor cantidad de datos a mayores distancias.
3. Migrar la interfaz de usuario a un entorno de desarrollo libre de modo que no se presenten las restricciones que impone Labview con la licencia estudiantil usada en el desarrollo de la aplicación.
4. Comparar el desempeño del sistema desarrollado con un equipo comercial, de modo que se determine la eficiencia del actual proyecto.
5. En el desarrollo se implementó un reloj de tiempo real para que a futuro sea implementado en la creación de estampas de tiempo en las muestras tomadas, o creación de archivos con nombres asociados al tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Rico Rodríguez, La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas, vol. 1, Mexico: Limusa, 2005.
- [2] C. Huamán Egoávil y R. Aguilar Chuquimuni, «Implementación Del Equipo De Adquisición De Datos De Prospección Sísmica,» Lima - Perú, 2001.
- [3] C. I. Pinilla Ramos, «Correlación entre el perfil de velocidad de propagación de ondas de corte y el espectro de respuesta en suelos,» Santiago de Chile, 2012.
- [4] Servicio geológico colombiano, «Servicio geológico colombiano,» 2016. [En línea]. Available: <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/index.php/material-educativo/preguntas-frecuentes>. [Último acceso: Enero 2016].
- [5] C. Rosales, «Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia,» Cali - Colombia, 2001.
- [6] Unidad de Puentes, «Universidad de Costa Rica,» 14 Febrero 2013. [En línea]. Available: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/banco-de-informacion-digital-on-line/07-02-13/2013/LM-PI-UP-02-2013.pdf>. [Último acceso: 2016].
- [7] M. Fulla, J. Palacio Bedoya, C. Flórez Velásquez y V. Aristizábal Tique, «Módulo Inalámbrico para el Sensado de Vibraciones Superficiales en Suelos,» *Tecno Lógicas*, pp. 451-464, 2015.
- [8] B. Herrera Ardila, «Universidad Industrial de Santander,» 2012. [En línea].

Available:

<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/3587/2/145347.pdf>. [Último acceso: Enero 2016].

[9] ABEM, «ABEM,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.abem.se/support/downloads/user-manuals/terraloc-pro-instruction-manual>. [Último acceso: Febrero 2016].

[10] C. A. Macias Bautista, «Biblioteca digital de la Escuela Politécnica Nacional,» 06 abril 2006. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1940/1/CD-0170.pdf>. [Último acceso: Enero 2016].

[11] M. A. Gayá Florez, «Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo Turbidítico de Ainsa (Huesca),» Barcelona, 2006.

[12] P. M. Shearer, Introduction to Seismology, 2 ed., New York: Cambridge University Press, 2009.

[13] Schlumberger Limited, «Oilfield Glossary en Español,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/g/geophone.aspx>. [Último acceso: Mayo 2016].

[14] Instituto Tecnológico Geominero de España, Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto, Madrid: IGME, 1995.

[15] Faculty of Science, Department of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, «The University of British Columbia,» 10 Diciembre 2007. [En línea]. Available: https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc350/content/methods/meth_6/raypaths.html.

[Último acceso: Febrero 2017].

[16] C. I. Rosales Climent, «Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia,» Cali, 2001.

[17] S. Mares y M. Tvrđý, Introduction to Applied Geophysics, Springer Science+Business Media B.V., 1994.

[18] L. A. Estrada, «Universidad Nacional de Tucumán,» 2008. [En línea]. Available: <http://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/Sismica-para-Geologos.pdf>. [Último acceso: 17 Febrero 2017].

[19] 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.