



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISMÓGRAFO DE BAJO COSTO POR INDUCCIÓN  
MAGNÉTICA PARA LA DETECCIÓN Y ALERTA DE ACTIVIDAD SÍSMICA**

**Hilda Nelly Tórtola Morales**

Asesorado por la Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota

Guatemala, octubre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISMÓGRAFO DE BAJO COSTO POR INDUCCIÓN  
MAGNÉTICA PARA LA DETECCIÓN Y ALERTA DE ACTIVIDAD SÍSMICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HILDA NELLY TÓRTOLA MORALES**

ASESORADO POR LA INGA. INGRID SALOMÉ RODRÍGUEZ DE LOUKOTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA EN ELECTRÓNICA**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Walter Giovanni Álvarez Marroquín
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISMÓGRAFO DE BAJO COSTO POR INDUCCIÓN  
MAGNÉTICA PARA LA DETECCIÓN Y ALERTA DE ACTIVIDAD SÍSMICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 22 de febrero de 2019.



**Hilda Nelly Tórtola Morales**

Guatemala 12 de septiembre de 2019

Ingeniero  
Julio Cesar Solares Peñate  
Coordinador del Área de Electrónica  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

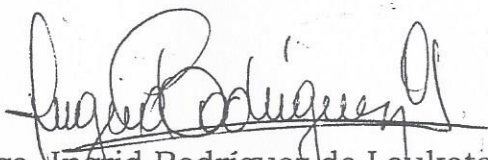
Apreciable Ingeniero Solares.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado "**Diseño e implementación de un sismógrafo de bajo costo por inducción magnética para la detección y alerta de actividad sísmica**", de la señorita **Hilda Nelly Tórtola Morales**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesora, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota  
Colegiada 5,356

Asesora

Ingrid Rodríguez de Loukota  
Ingeniera en Electrónica  
colegiado 5356



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 23 de septiembre de 2019

**Señor Director**  
**Armando Alonso Rivera Carrillo**  
**Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**  
**Facultad de Ingeniería, USAC**


Estimado Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISMÓGRAFO DE BAJO COSTO POR INDUCCIÓN MAGNÉTICA PARA LA DETECCIÓN Y ALERTA DE ACTIVIDAD SÍSMICA**, desarrollado por la estudiante **Hilda Nelly Tórtola Morales**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
**Ing. Julio César Solares Peñate**  
**Coordinador de Electrónica**







REF. EIME 52. 2019.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación de el estudiante: **HILDA NELLY TÓRTOLA MORALES** titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISMÓGRAFO DE BAJO COSTO POR INDUCCIÓN MAGNÉTICA PARA LA DETECCIÓN Y ALERTA DE ACTIVIDAD SÍSMICA,** **procede a la autorización del mismo.**

  
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo




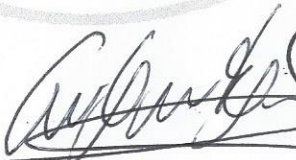
GUATEMALA, 25 DE SEPTIEMBRE 2019.



DTG. 450.2019

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISMÓGRAFO DE BAJO COSTO POR INDUCCIÓN MAGNÉTICA PARA LA DETECCIÓN Y ALERTA DE ACTIVIDAD SÍSMICA**, presentado por la estudiante universitaria: **Hilda Nelly Tórtola Morales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, octubre de 2019

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por permitirme culminar esta etapa de mi vida y por ser mi consuelo, mi apoyo y mi guía a lo largo de toda mi vida.
- Mi padre** Julio Roberto Tórtola Navarro, por ser mi ejemplo por seguir, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, por todo su amor y por enseñarme a ser la persona que soy.
- Mi madre** Lillian Anabella Morales de Tórtola, por consolarme cuando quería darme por vencida y darme las fuerzas para seguir adelante y llegar a culminar mi carrera, por darme todo su amor.
- Mis hermanos** Jorge Roberto, Lillian Anabella y María José Tórtola Morales, por ser mis cómplices y mejores amigos, por aconsejarme, darme ideas y apoyarme en todos mis proyectos.
- Mis abuelitos** Nelly Navarro de Tórtola (q.e.p.d.), Humberto Tórtola (q.e.p.d.), Jorge Augusto Morales (q.e.p.d.) y Anabella Muñoz de Morales, quienes siempre han estado conmigo cuidándome y apoyándome, los amo y recuerdo.

**Mario Reyes Calderón**

Por ser mi amigo y compañero, por su apoyo y sus explicaciones, por todo su amor y comprensión, por motivarme cuando me frustraba al trabajar proyectos.

**Mis amigos**

Por lograr que todo el camino fuera más fácil y divertido, por todos los proyectos que compartimos, por todos los buenos y malos momentos vividos.

**Mis catedráticos**

Por haberme brindado sus conocimientos a lo largo de la carrera y por aquellos que me enseñaron a no darme por vencida nunca, en especial al ingeniero Ivan René Morales y a la ingeniera Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi casa de estudios y brindarme todas las herramientas para convertirme en una profesional.
<b>Mi familia</b>	Por todo su apoyo y amor a lo largo de toda mi vida, los amo.
<b>Departamento de Matemática</b>	Por darme la oportunidad de laborar y formarme en el aspecto profesional, por darme nuevas amistades que me enseñaron mucho a lo largo de estos años.
<b>Mis amigos</b>	Lucía Wolford, Byron Paiz, Melvin Calel, Chantelle Cruz, Mario Reyes, Iván Morales, mis amigos del Departamento de Matemática, por darme todo su apoyo y su amistad.
<b>Inga. Ingrid Salomé Rodríguez</b>	Por haberme dado la guía para la elaboración de mi tesis, por tomarse el tiempo y dedicación para obtener el mejor resultado posible y por todos sus consejos y enseñanzas.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. ORIGEN DE LOS SISMOS Y SUS SISTEMAS DE MEDICIÓN.....	1
1.1. Causas de los movimientos sísmicos.....	1
1.1.1. Vulcanismos .....	1
1.1.2. Placas tectónicas.....	3
1.1.3. Hundimiento.....	4
1.1.4. Deslizamientos .....	5
1.1.5. Explosiones .....	5
1.2. Mediciones de movimientos sísmicos.....	5
1.2.1. Escalas de medición.....	5
1.2.1.1. Escala de Mercalli.....	6
1.2.1.2. Escala de Richter.....	7
1.2.1.3. Escala de magnitud de momento .....	8
1.2.2. Componentes de la señal de un sismo.....	8
1.2.2.1. Ondas primarias (ondas P).....	9
1.2.2.2. Ondas secundarias (S).....	10
1.2.2.3. Ondas <i>Rayleigh</i> (R).....	11
1.2.2.4. Ondas <i>Love</i> (L).....	12

2.	TEORÍA DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS DEL DISPOSITIVO .....	15
2.1.	Medición de actividad sísmica.....	15
2.2.	Tipos de geófonos.....	16
2.2.1.	Geófono de reluctancia .....	16
2.2.2.	Geófono de capacidad .....	17
2.2.3.	Geófono piezoeléctrico.....	18
2.2.4.	Geófono electromagnético .....	20
2.3.	Microcontrolador .....	21
2.3.1.	Arquitectura Von Neumann .....	21
2.3.2.	Arquitectura Harvard .....	22
2.3.3.	Protocolo de comunicación UART.....	22
2.3.3.1.	Conexiones de UART.....	23
2.3.4.	Convertor de análogo a digital (ADC).....	24
2.4.	Amplificador operacional .....	25
2.5.	Amplificador de instrumentación .....	26
2.6.	Filtros .....	27
2.6.1.	Filtro paso bajo.....	28
2.6.2.	Filtro paso altos .....	31
2.6.3.	Filtro pasa banda.....	34
2.6.4.	Filtro rechaza banda.....	34
3.	ELECCIÓN DE COMPONENTES Y DISEÑO DE MÓDULOS.....	37
3.1.	Descripción de la parte física del dispositivo.....	37
3.2.	Geófono electromagnético .....	38
3.2.1.	Ley de Faraday .....	39
3.2.2.	Diseño del geófono .....	41
3.3.	Amplificador operacional.....	43
3.3.1.	Amplificador operacional en modo seguidor.....	46



3.4.	Filtro rechaza banda 60 Hz.....	49
3.5.	Filtro paso bajos .....	51
3.6.	Amplificador de instrumentación.....	52
3.7.	Microcontrolador Tiva C Series TM4C123GH6PM .....	54
3.7.1.	Módulo UART Tiva C Series TM4C123GH6PM .....	57
3.7.2.	Módulo ADC Tiva C Series TM4C123GH6PM.....	58
3.8.	Presupuesto de los componentes .....	60
4.	INTERFAZ GRÁFICA, SUS COMPONENTES Y SU ELABORACIÓN ..	61
4.1.	<i>Code Composer Studio (CCS)</i> .....	61
4.1.1.	Configuraciones para el uso de CCS.....	62
4.1.2.	Programación estructurada en CCS .....	64
4.2.	Bases de datos.....	65
4.2.1.	PostgreSQL .....	65
4.2.2.	Sentencias utilizadas en SQL.....	66
4.3.	Python .....	67
4.3.1.	Tkinter para Python .....	68
4.3.2.	Librería serial de Python.....	68
4.3.3.	Librería del sistema operativo.....	69
4.3.4.	Librería para conectar Python a PostgreSQL .....	70
4.3.5.	Librería time para Python .....	71
4.3.6.	Matplotlib para gráficas.....	72
5.	DISEÑO FINAL Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO .....	75
5.1.	Funcionamiento de la interfaz gráfica y forma de uso .....	75
5.1.1.	Selección del puerto .....	77
5.1.2.	Gráficas de los datos recibidos.....	78
5.1.3.	Magnitud aproximada del sismo .....	79

5.1.4.	Base de datos y eventos almacenados.....	81
5.2.	Sistema de alertas.....	82
5.3.	Calibraciones realizadas .....	83
5.3.1.	Suma de los valores.....	83
5.3.2.	Desviación estándar.....	84
5.3.3.	Punto máximo y mínimo de la señal.....	84
5.4.	Montaje final del dispositivo .....	85
CONCLUSIONES.....		89
RECOMENDACIONES .....		91
BIBLIOGRAFÍA.....		93

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Ubicación de los volcanes.....	2
2.	Placas tectónicas .....	3
3.	Hundimiento zona 6 .....	4
4.	Señal de un sismo.....	9
5.	Ondas P .....	10
6.	Ondas S .....	11
7.	Ondas R.....	12
8.	Ondas L.....	13
9.	Geófono de reluctancia .....	17
10.	Geófono de capacidad .....	18
11.	Geófono piezoeléctrico.....	19
12.	Geófono electromagnético .....	20
13.	Arquitectura Von Neumann .....	21
14.	Arquitectura Harvard .....	22
15.	Conexión UART .....	23
16.	Ejemplo de ADC.....	24
17.	Amplificador operacional .....	26
18.	Amplificador de instrumentación .....	27
19.	Filtro ideal frente a real paso bajo .....	28
20.	Filtro pasivo paso bajo de primer orden .....	30
21.	Filtro paso bajo activo <i>butterworth</i> de primer orden .....	30
22.	Funciones de transferencia filtros activos .....	31
23.	Función de transferencia filtro paso alto.....	32

24.	Filtro paso alto pasivo de primer orden.....	33
25.	Filtro paso alto activo.....	33
26.	Función de transferencia de filtro pasa banda.....	34
27.	Función de transferencia de un filtro rechaza banda.....	35
28.	Filtro rechaza banda.....	36
29.	Diagrama de bloques.....	38
30.	Vista del campo magnético y la bobina.....	39
31.	Imán permanente circular.....	41
32.	Bobina.....	42
33.	TL074CN.....	44
34.	Operación del TL074CN respecto a la frecuencia.....	45
35.	Esquemático del TL074CN.....	46
36.	Circuito seguidor.....	47
37.	Demostración del circuito seguidor.....	48
38.	Esquemático filtro 60 Hz.....	50
39.	Esquemático del filtro paso bajo.....	52
40.	Amplificador de instrumentación.....	53
41.	Esquemático Tiva C Series TM4C123GH6PM.....	56
42.	Tiva C Series TM4C123GH6PM.....	57
43.	Selección de la tarjeta de desarrollo.....	62
44.	Vista de PostgreSQL.....	66
45.	Interfaz gráfica.....	76
46.	Selección de puerto.....	77
47.	Selección de puerto correcto.....	78
48.	Gráfica del fenómeno.....	79
49.	Grado del sismo.....	80
50.	Mostrar datos de los eventos.....	81
51.	Tabla de un evento guardado.....	82
52.	Módulo principal.....	86

53.	Módulo principal vista lateral .....	86
54.	Geófono electromagnético .....	87

## TABLAS

I.	Escala de Mercalli .....	7
II.	Escala de Richter .....	8
III.	Características TL074CN y TL084CN .....	43
IV.	Precios de los componentes .....	60
V.	Sentencias SQL .....	67
VI.	Formatos de tiempo en Python .....	71
VII.	Símbolos para colores de gráficas .....	72
VIII.	Símbolos para trazos en gráficas .....	73
IX.	Datos de calibración .....	84
X.	Rangos utilizados .....	85





## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>bps</b>	Bits por segundo
<b>dB</b>	Decibelio
<b>Hz</b>	Hercio
<b>kΩ</b>	kilo-ohmio
<b>kHz</b>	Kilohercio
<b>Mbps</b>	Megabits por segundo
<b>MHz</b>	Megahercio
<b>mW</b>	Milivatio
<b>nF</b>	Nanofaradio
<b>Ω</b>	Ohmio
<b>T</b>	Período
<b>%</b>	Porcentaje
<b>V</b>	Voltio
<b>V/μs</b>	Voltio por microsegundo
<b>V/mV</b>	Voltio por milivoltio



## GLOSARIO

<b>Algoritmo</b>	Secuencia de instrucciones que presenta una solución para determinado tipo de problemas.
<b>Amplitud</b>	Diferencia entre el valor máximo y mínimo de la distribución de una variable.
<b>Ancho de banda</b>	Medida de datos y recursos de comunicación disponible o consumida.
<b>Bandas</b>	Intervalos de frecuencia del espectro electromagnético.
<b>Bits</b>	Unidad de información más pequeña de una computadora, puede tener un valor de 0 o 1.
<b>Bobina</b>	Elemento eléctrico formado por un hilo conductor aislado, al cual se le da vueltas alrededor de una masa.
<b>Byte</b>	Es un conjunto de 8 bits, lo cual forma un carácter.
<b>Campo eléctrico</b>	Campo físico que representa por medio de un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades eléctricas.

<b>Campo magnético</b>	Magnitud vectorial que representa la intensidad de fuerza magnética.
<b>Capacitancia</b>	Capacidad de un elemento o componente de almacenar energía en forma de carga eléctrica.
<b>Capacitor</b>	Elemento pasivo que almacena energía en forma de campo eléctrico.
<b>Conductor</b>	Material que ofrece poca resistencia al movimiento de carga eléctrica.
<b>Corriente</b>	Flujo de carga eléctrica que recorre un material.
<b>Deformación</b>	Representa un cambio en forma o tamaño debido a esfuerzos externos del material.
<b>Disparo</b>	Señal que indica un inicio de secuencia.
<b>Dispersión</b>	Fenómeno en el cual se separan los componentes de una señal al atravesar un material.
<b>Elasticidad</b>	Propiedad del material de recuperar su forma cuando se deja de ejercer una fuerza sobre el mismo.
<b>Espira</b>	Se refiere a una vuelta de hilo conductor perteneciente a un embobinado.



<b>Exactitud</b>	Capacidad de un instrumento de acercarse a la medición real de un fenómeno.
<b>Frecuencia</b>	Magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.
<b>Fuerza electromotriz</b>	Cualquier energía proveniente de cualquier fuente, medio o dispositivo que suministre corriente eléctrica.
<b>Ganancia</b>	Cantidad adimensional, utilizada para indicar el aumento de cierta característica de la señal.
<b>Generador de ondas</b>	Instrumento utilizado para proporcionar señales eléctricas, de distintos voltajes y formas.
<b>Hardware</b>	Conjuntos de elementos que constituyen la parte física y tangible de un sistema.
<b>Impedancia</b>	Representa la oposición al paso de corriente de todas las partes de un circuito.
<b>Inductor</b>	Elemento pasivo que almacena energía en forma de campo magnético.
<b>Interferencia</b>	Puede ser constructiva o destructiva, las ondas pueden interferir con otra anulándose o sumándose.

<b>Material piroclástico</b>	Nombre que se le da a la nube de cenizas o fragmentos de lava que circulan a través del aire.
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar.
<b>Muestreo</b>	Proceso en el cual se toman datos de una señal eléctrica en cierto instante de tiempo.
<b>Ondas</b>	Propagación de una perturbación de alguna propiedad del espacio.
<b>Osciloscopio</b>	Instrumento utilizado para la visualización de señales eléctricas.
<b>Periféricos</b>	Unidades externas a la central de procesamiento del microcontrolador.
<b>Período</b>	Intervalo de tiempo determinado para completar un ciclo repetitivo.
<b>Piezoelectricidad</b>	Fenómeno que permite la aparición de polarización en una masa debido a la presión que se ejerce sobre un cristal.
<b><i>Pipeline</i></b>	Herramienta de programación que agiliza el flujo de información, utilizando la salida de una fase como entrada para la siguiente fase.

<b>Polarización</b>	Expresa la densidad de los momentos eléctricos dipolares permanentes o inducidos en un material dieléctrico.
<b>RAM</b>	Memoria principal en la cual se encuentran datos y programas, sobre la que se puede efectuar lecturas y escrituras.
<b>Resistencia</b>	Elemento de un circuito eléctrico, que se opone al flujo de electrones a través de este.
<b>Resolución</b>	Se refiere a la mínima medida legible que puede tomar un sensor o dispositivo.
<b>RGB</b>	Siglas designadas para dar a entender que se poseen 3 colores, rojo, verde y azul.
<b>ROM</b>	Tipo de memoria que solo permite la lectura de datos, en ella se encuentran almacenadas las instrucciones del sistema.
<b>Semiconductor</b>	Material aislante que en ciertas circunstancias se comporta como un material conductor.
<b>Software</b>	Equipamiento lógico de un sistema informático.
<b>Topología</b>	Mapa físico o lógico de una red para intercambiar datos.

**Voltaje**

Tecla que se presiona para separar concepto de significado.

## RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla el diseño y se documenta la implementación de un sismógrafo por inducción magnética de bajo costo para la detección de actividad sísmica. En los cinco capítulos se explican los módulos electrónicos utilizados, la teoría necesaria y las pruebas que se realizaron en el dispositivo.

En el capítulo 1 se describe el origen de los sismos y sus efectos a lo largo del tiempo, se explican las escalas de medición de los sismos, se profundiza sobre cómo es la señal que se busca obtener para monitorear este fenómeno natural y los componentes de la señal.

En el capítulo 2 se presentan los componentes electrónicos que se utilizarán y la teoría en la cual se basa su funcionamiento. Se exponen los distintos tipos de sensores utilizados para medir la actividad sísmica, los filtros y sus diferentes tipos, el microcontrolador, el amplificador operacional y el amplificador de instrumentación.

En el capítulo 3 se encuentran todas las partes que son necesarias para la implementación del dispositivo, con la explicación de su funcionamiento y el diseño que se utilizó en cada bloque del sistema. Se analizan todos los esquemáticos utilizados y se detallan las decisiones del diseño.

El capítulo 4 presenta las conexiones entre la etapa análoga, el microcontrolador y la interfaz gráfica, también se explica el proceso que se

realizó para la elaboración de la interfaz gráfica y los componentes de los cuales consta la misma.

El capítulo 5 contiene la documentación de la implementación del sismógrafo por inducción electromagnética de bajo costo, se detallan los últimos arreglos para obtener los datos deseados, también se documenta la calibración y funcionamiento del dispositivo.

# OBJETIVOS

## General

Desarrollar un sismógrafo de bajo costo por inducción magnética con monitoreo y alertas de actividad sísmica.

## Específicos

1. Definir los conceptos de actividad sísmica y los métodos de detección más comunes.
2. Presentar la teoría de los componentes electrónicos utilizados en el sismógrafo.
3. Diseñar los módulos necesarios para la construcción del sismógrafo.
4. Realizar la conexión del sismógrafo a una computadora para visualizar los datos en una interfaz gráfica.
5. Documentar las pruebas realizadas con el sismógrafo en un ambiente controlado para su calibración.





## INTRODUCCIÓN

El planeta está compuesto por varias placas que flotan en un manto de roca líquida, por lo cual estas siempre se mueven, cuando se excede la energía máxima soportable por la roca surgen fracturas en el suelo las cuales son llamadas fallas, por lo cual se generan sismos y terremotos.

Previo a la erupción de un volcán hay sismos de diversa magnitud, la medición y monitoreo de la frecuencia, intensidad y duración de los movimientos telúricos, puede contribuir a dar una alerta temprana a los poblados aledaños para la evacuación de los habitantes, lo cual permitirá salvar vidas.

Los sismos en Guatemala son muy frecuentes debido a las fallas que existen en su territorio, se han dado muchos casos en los cuales no se ha podido determinar con anticipación que se debe evacuar las viviendas y sitios de trabajo aledaños al epicentro o peor aún cercanos a volcanes activos a punto de expulsar material piroclástico.

El terremoto más catastrófico en Guatemala fue el del 4 de febrero de 1976, en el cual hubo aproximadamente veintitrés mil personas fallecidas, setenta y seis mil resultaron heridas y dejó más de un millón de damnificados.

Otro evento devastador para Guatemala tuvo lugar el 3 de junio de 2018, en esta oportunidad las personas creían que la actividad del volcán de Fuego era normal, como cualquier otro día, dado que los sismos y las cenizas eran frecuentes en este sector del país. La gente del poblado no quiso evacuar sus

hogares y no había alarmas que indicaran que ya se superaban los niveles aceptables para que todos evacuarán la zona, por lo cual ni siquiera se tiene una cifra exacta de las personas fallecidas.

El monitoreo de los fenómenos naturales es lo único que puede evitar que tragedias como éstas ocurran en un país con carencias tanto de educación como de tecnología, para salvaguardar las vidas de las personas de los poblados aledaños a las fallas y a los vulcanismos.

Otros países, como Chile, poseen gran tecnología para alertar a tiempo a sus pobladores y así reducir la tasa de muertes en el sector cuando se presentan fenómenos naturales como los acontecidos en Guatemala.

Los sismógrafos sirven para detectar sismos y con algunos patrones se puede predecir con anticipación un terremoto, con un circuito se puede alertar a las personas que deben evacuar todo el lugar con más tiempo de anticipación que alertando de casa en casa.

El diseño y construcción de un sistema que permita alertar y detectar los sismos antes de que haya pérdida de vidas es muy importante para un país como Guatemala, un aparato de bajo costo y óptimo para implementar en cualquier región del país.

# **1. ORIGEN DE LOS SISMOS Y SUS SISTEMAS DE MEDICIÓN**

Los sismos son causados por fenómenos naturales, los cuales no se pueden predecir ni controlar, sin embargo, pueden ser monitoreados para tener un patrón de inicio y finalización, y con esto conseguir un tiempo de anticipación para la alerta pertinente y evacuación inmediata de la población.

Un monitoreo de este fenómeno natural es necesario para saber qué tan frecuente es en cierto sector del país, también se puede tener un patrón para resguardar las vidas de las personas que están más propensas a sufrir por estas catástrofes.

## **1.1. Causas de los movimientos sísmicos**

Los movimientos sísmicos se dan por varias causas, una de ellas es por las placas tectónicas las cuales están en constante movimiento, otra causa común son los vulcanismos, los hundimientos, los desplazamientos y, por último, las explosiones.

### **1.1.1. Vulcanismos**

Los vulcanismos son una de las causas más frecuentes de actividad sísmica, debido a la rapidez del flujo de magma y gases en el subsuelo, provocando un movimiento muy grande en el sector aledaño a este, sin embargo, no tiene mucho alcance a diferencia del movimiento de las placas tectónicas.

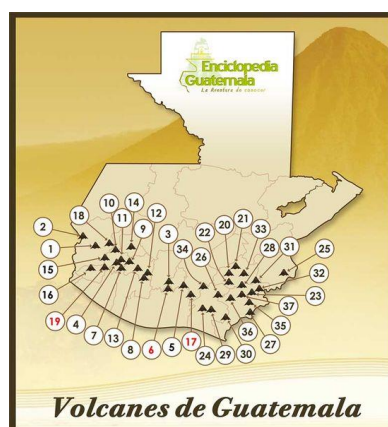
En el territorio nacional existen una gran cantidad de volcanes, se ha determinado que hay aproximadamente 37, de los cuales únicamente 8 han tenido actividad y solamente 3 se encuentran activos. Los tres volcanes activos son:

- Santiaguito: alrededor de 2 510 m s.n.m.
- Pacaya: 2 550 m s.n.m.
- Fuego: 3 830 m s.n.m.

Por la actividad de los tres volcanes mencionados, en los sectores cercanos se presenta gran actividad sísmica, sobre todo cerca del Santiaguito, ya que es el más pequeño, pero también el más activo y violento.

Como se muestra en la figura 1, el volcán 19 corresponde al Santiaguito, el 6 al de Fuego y el 17 pertenece al Pacaya.

Figura 1. **Ubicación de los volcanes**



Fuente: *Enciclopedia Guatemala*.

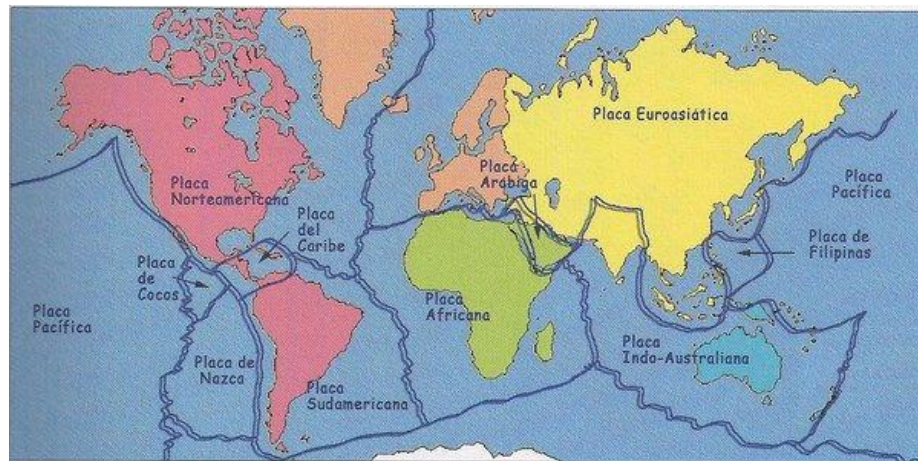
[http://www.encyclopediaguatemala.org.gt/index.php?title=Archivo:Mapa\\_de\\_Volcanes\\_de\\_Guatemala.jpg](http://www.encyclopediaguatemala.org.gt/index.php?title=Archivo:Mapa_de_Volcanes_de_Guatemala.jpg). Consulta: 23 de mayo 2019.

### 1.1.2. Placas tectónicas

El globo terráqueo está dividido por 12 placas, las placas en las que se encuentra Guatemala son del Caribe y la norteamericana, las cuales, están en constante movimiento debido a que están sobre un manto de roca líquida. Por lo tanto, cuando el movimiento sobrepasa la fuerza que soporta la roca, este provoca fallas y, por ende, actividad sísmica muy grande como terremotos.

Las placas tectónicas son la principal causa de terremotos en Guatemala, debido a que presentan una mayor magnitud que las demás causas de actividad sísmica.

Figura 2. Placas tectónicas



Fuente: *Ciencias Naturales*. <https://www.areaciencias.com/geologia/placas-tectonicas.html>.

Consulta: 23 de mayo 2019.

### 1.1.3. Hundimiento

Un hundimiento se debe a la presencia de aguas subterráneas, las cuales dan lugar a erosiones y a su vez a cavernas, las cuales, si la capa de tierra del suelo no es firme, tiende a hundirse y si el hundimiento es grande provoca actividad sísmica de baja magnitud en ese sector.

Existe un precedente de hundimientos, como lo es el hundimiento en el barrio San Antonio, zona 6 de la ciudad de Guatemala, el cual dejó 3 fallecidos y se llevó consigo varias casas y vehículos pesados. Antes de que ocurriera el hundimiento, se detectaron varios temblores y estruendos.

Figura 3. Hundimiento zona 6



Fuente: *Prensa Libre*. <https://www.prensalibre.com/hemeroteca/hundimiento-en-el-barrio-san-antonio-zona-6/>. Consulta: 25 de mayo 2019.

#### **1.1.4. Deslizamientos**

Estos eventos tienen lugar en montañas o lugares con una inclinación muy grande, de los cuales se desprenden partes de tierra o nieve. Dependiendo de las proporciones del desprendimiento se provocan sismos de pequeña y mediana magnitud.

En épocas lluviosas es muy común que haya deslizamientos grandes de tierra provenientes de las montañas, ya que en Guatemala la mayoría de las carreteras están cerca de montañas, los desplazamientos en estas han propiciado muchos accidentes. Además, se generan temblores de muy baja magnitud, pero podrían ser monitoreados.

#### **1.1.5. Explosiones**

Las explosiones están relacionadas con actividad sísmica, la fuerza que liberan provoca vibraciones en los sectores que abarque la explosión, es causada por seres humanos y tienen un impacto catastrófico en muchos aspectos como en contaminación, sismos y daños irremediables.

### **1.2. Mediciones de movimientos sísmicos**

Las mediciones de sismos pueden ser por su magnitud o por los daños causados, para cada uno existe una escala.

#### **1.2.1. Escalas de medición**

Para tener un parámetro de cuán grande o catastrófico fue un sismo, se tienen tres escalas muy conocidas: Richter, la cual se basa en la cantidad de

energía sísmica liberada y la escala de Mercalli que se basa en lo percibido por las personas. Sin embargo, la escala de Richter se queda corta debido a que solo puede alcanzar valores de 6,8, por ello se implementó otra escala de medición a la cual erróneamente se le sigue llamando de Richter. Su nombre correcto es escala sísmológica de magnitud de momento.

Todas son utilizadas, pero tienen sus ventajas y desventajas debido a su exactitud y variación según cada instituto que la mida. Por ejemplo, la escala de Richter y magnitud de momento, varían según la localización de donde se mida, sin embargo, posee un valor cuantitativo; la escala de Mercalli varía según las percepciones y no posee valor numérico.

#### **1.2.1.1. Escala de Mercalli**

Mercalli posee 12 niveles los cuales se escriben en números romanos, se basa en las sensaciones percibidas por las personas y los daños reportados en el sector, por lo que puede variar dependiendo del sitio que lo reporte.

Posee una forma cualitativa de medir actividad sísmica debido a que no se basa en magnitudes y depende del sitio donde se estén observando los eventos.

A partir de la escala VII, el sismo pasa a ser un terremoto dado que se tienen tanto pérdidas humanas como de infraestructura.

Esta escala no es muy útil para el monitoreo de actividad sísmica, debido a que se hace la medición después de que ya hay pérdidas materiales e incluso de vidas, por lo cual no se utilizará y solo se menciona para tener el precedente.



Tabla I. **Escala de Mercalli**

Intensidad	Efectos
I	Sismo débil, no es muy perceptible.
II-III	Sismo leve, algunas personas lo perciben y las edificaciones tienen movimiento ligero.
IV-V	Sismo moderado, la mayoría lo percibe hay dificultad para caminar, hay movimiento de objetos y daños leves.
VII-VIII	Sismos muy fuertes, hay dificultad de caminar y conducir, existen daños graves en edificaciones.
IX-X	Sismo destructivo, hay pánico generalizado, existe destrucción de edificaciones.
XI	Sismo desastroso, pocas edificaciones continúan en pie y la estructura vial se ve afectada.
XII	Sismo catastrófico, casi no hay sobrevivientes, hay destrucción total y grandes alteraciones topográficas.

Fuente: *Servicio geológico mexicano.*

[https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion\\_complementaria/Escalas-sismos.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html).

Consulta: 23 de mayo de 2019.

### 1.2.1.2. **Escala de Richter**

Es una medición de magnitud que trata de expresar la fuerza liberada de un sismo, es una medición cuantitativa, debido a que su cálculo es numérico, existen diferentes escalas de medición por magnitud, pero la de Richter es la más utilizada.

Esta escala hace uso de un algoritmo para su cálculo, el cual implica que por cada grado se tiene un aumento en un factor de 32, esto quiere decir que el grado 2 es 32 veces más grande que el grado 1.

La escala puede variar dependiendo de la localización en la que se midió la magnitud del sismo, esto implica que pueden diferir las mediciones.

Tabla II. **Escala de Richter**

Magnitud	Efectos
Menor a 2	No es perceptible.
Entre 2 y 3	Puede ser percibido, pero sin provocar daños.
Entre 4 y 5	Movimiento en edificios, llegado a provocar daños.
Entre 6 y 7	Destrucción de grandes proporciones.
Entre 8 y 9	Destrucción total de todo el lugar.
10 o más	No se ha registrado uno de esta magnitud.

Fuente: *Servicio geológico mexicano.*

[https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion\\_complementaria/Escalas-sismos.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html).

Consulta: 23 de mayo de 2019.

### **1.2.1.3. Escala de magnitud de momento**

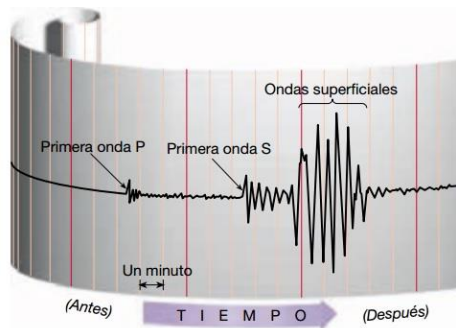
Se basa en los mismos parámetros de la escala de Richter debido a que ambas miden la magnitud de la fuerza liberada, sin embargo, no se pueden medir todos los valores porque 6,8 sería el máximo valor alcanzado y tampoco sería capaz de medir un microsismo.

Por estas razones se implementó esta nueva escala de medición, pero todas las personas la siguieron nombrando como escala de Richter, la tabla II es la misma que se utiliza con esta escala.

### **1.2.2. Componentes de la señal de un sismo**

La señal de un sismo está compuesta por diferentes ondas que se generan por un movimiento en el subsuelo, todas tienen distintas propiedades, la suma de todas estas son las usadas para hacer los cálculos en las que se basa la escala de magnitud.

Figura 4. **Señal de un sismo**



Fuente: *Universidad de Costa Rica.*

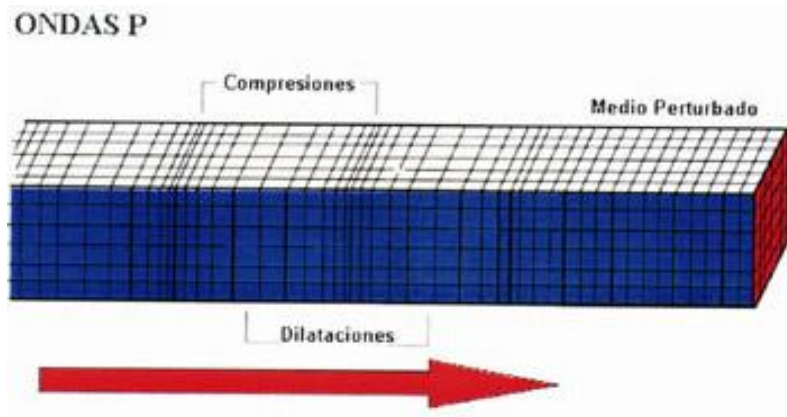
<https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/2326-cual-es-la-diferencia-entre-magnitud-momento-y-magnitud-richter>. Consulta: 23 de mayo 2019.

### 1.2.2.1. **Ondas primarias (ondas P)**

Son ondas de cuerpo o volumétricas, son las ondas más rápidas al momento de hacer las mediciones, pero son de menor magnitud que las secundarias, porque al poseer fuerzas de fricción y otras fuerzas que se oponen al movimiento tarda en poder tener mayor amplitud.

Las ondas P son de compresión, dado que tienen lugar cuando inicia una compresión, en este caso de tierra. Lo anterior se refiere a que el movimiento es lineal y se desplaza por abajo del subsuelo, haciendo un movimiento similar al de empujar algo, se genera una deformación en el volumen y puede propagarse en todos los medios.

Figura 5. **Ondas P**



Fuente: *El Profe de Naturales*. <https://elprofedenaturales.wordpress.com/2009/09/28/metodos-sismicos-ondas-p-y-s/>. Consulta: 23 de mayo 2019.

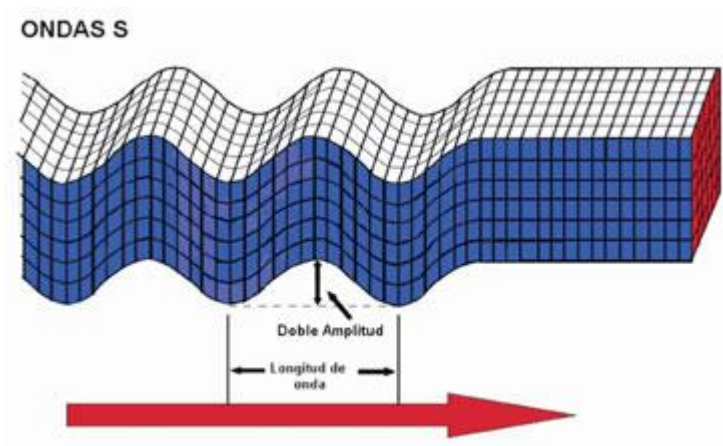
### 1.2.2.2. **Ondas secundarias (S)**

Llegan al sensor en segundo lugar y tienen mayor amplitud que las ondas primarias, pero son un poco más lentas, no provocan deformación del volumen, pero sí deformación en ángulo recto en la dirección de propagación.

Las ondas secundarias poseen una vibración en forma perpendicular a la superficie, lo que implica menor velocidad y mayor recorrido, solo pueden propagarse en medios sólidos debido a la elasticidad.

Respecto de la amplitud, suele tener la mayor amplitud de todas las ondas, posee casi el doble o más de la amplitud de la onda P, por lo cual es muy determinante al momento de realizar el cálculo.

Figura 6. Ondas S



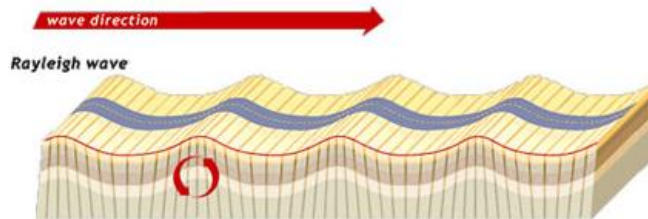
Fuente: *El Profe de Naturales*. <https://elprofedenaturales.wordpress.com/2009/09/28/metodos-sismicos-ondas-p-y-s/>. Consulta: 23 de mayo 2019.

### 1.2.2.3. Ondas *Rayleigh* (R)

Es una onda superficial, cuyo nombre proviene de su descubridor, estas ondas son las responsables en gran medida de los efectos destructores de un terremoto, los efectos de esta onda se reducen mientras más profunda sea la actividad sísmica. Estas ondas poseen dispersión debido a que su movimiento depende del período y de la frecuencia.

Estas ondas exhiben un movimiento rotacional en el eje perpendicular al suelo, con sentido contrario a la dirección de propagación de la energía, también se sabe que existen varias ondas de este tipo en un evento sísmico, todas ellas viajan a distintas velocidades.

Figura 7. **Ondas R**



Fuente: SMSTSUNAMI. <https://www.sms-tsunami-warning.com/pages/seismic-waves#.XOcGlohKjb0>. Consulta: 24 de mayo de 2019.

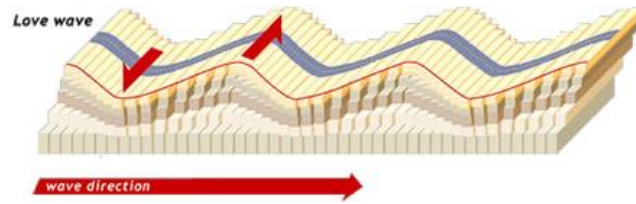
#### 1.2.2.4. **Ondas Love (L)**

Las ondas L son superficiales al igual que las ondas R, por ello presentan dispersión porque la frecuencia es una variable con la que se desplazan, el movimiento de estas ondas es paralelo a la superficie pero perpendicular a la dirección de propagación. Otra propiedad de este tipo de ondas es que poseen interferencia constructiva, por lo cual son mucho más rápidas que las ondas R.

Estos tipos de ondas son las más destructivas debido a que representan la energía que ha quedado guardada en el subsuelo a raíz de las ondas de cuerpo que son la primaria y la secundaria, por todo esto los sismos son pocos profundos.

Otra característica importante es que poseen su máxima amplitud en la superficie terrestre y decrece exponencialmente a mayor profundidad.

Figura 8. Ondas L



Fuente: *SMSTSUNAMI*. <https://www.sms-tsunami-warning.com/pages/seismic-waves#.XOcGlohKjb0>. Consulta: 24 de mayo de 2019.





## **2. TEORÍA DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS DEL DISPOSITIVO**

Para la elaboración del dispositivo se utilizaron diferentes módulos y componentes.

### **2.1. Medición de actividad sísmica**

Para lograr apreciar la señal deseada, se necesitan varios componentes para su obtención, las etapas que son necesarias para la elaboración del dispositivo son:

- **Sensor:** se necesita un transductor, que convierta un movimiento en una señal eléctrica, al cual se llama geófono.
- **Filtro rechaza banda:** se hace uso de este filtro para suprimir cualquier ruido producido por la señal de 60 Hz.
- **Filtro paso bajo:** su utilización es para discriminar cualquier señal ajena a la de un sismo, ya que sus señales se mantienen en cierto rango de funcionamiento.
- **Amplificador de instrumentación:** la señal que se obtiene por medio del sensor se encuentra a una escala muy pequeña, por esto es necesario amplificar esa señal para que sea más fácil procesarla.

- Circuito de acoplamiento: para digitalizar la señal por medio de un microcontrolador, es necesario que la señal se encuentre en el rango de voltaje usual para en microcontrolador utilizado, debido a esto se hace uso de un circuito que amplifica por última vez la señal y le suma un voltaje para llevar la señal al rango de trabajo pertinente.
- Microcontrolador: para optimizar el monitoreo de la actividad sísmica es necesario digitalizar la señal, para activar algunas alertas, realizar cálculos y enviar alertas por medio de mensajes en la interfaz gráfica.

## **2.2. Tipos de geófonos**

Los geófonos son transductores, los cuales son capaces de convertir un movimiento mecánico en una señal eléctrica, esto se puede lograr con varias técnicas.

### **2.2.1. Geófono de reluctancia**

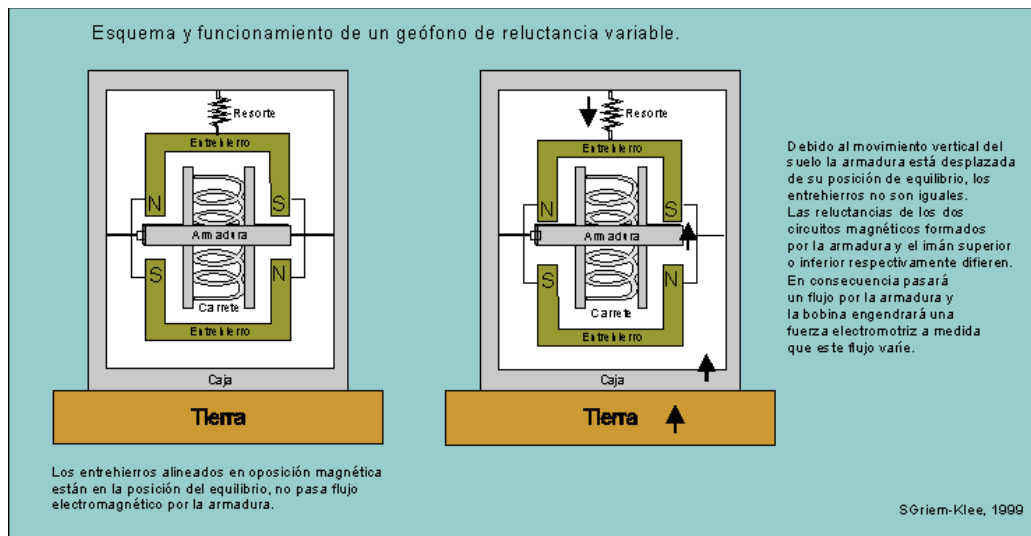
La reluctancia magnética es la oposición que existe al paso de flujo magnético, generado por cualquier objeto que posea magnetismo, en el caso de los geófonos de reluctancia se basan en el cambio de la misma, debido a la variación del campo magnético incidente.

Para elaborar un geófono de reluctancia, se deben poseer dos imanes permanentes con las mismas propiedades e idénticos físicamente, se colocan en posición inversa, para anular el campo magnético mientras se encuentre en la posición de equilibrio. Estos son sostenidos por un resorte y al haber un movimiento varía el campo magnético entre los imanes, se debe colocar una bobina con armadura entre los imanes, al incidir un campo magnético sobre la

armadura se genera una fuerza electromotriz en la bobina proporcional a la velocidad del movimiento.

Se puede apreciar en la figura 9, un esquema de cómo debería elaborarse el geófono de reluctancia.

Figura 9. **Geófono de reluctancia**



Fuente: *Exploraciones mineras*. <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/04003geook.htm>.

Consulta: 25 de mayo 2019.

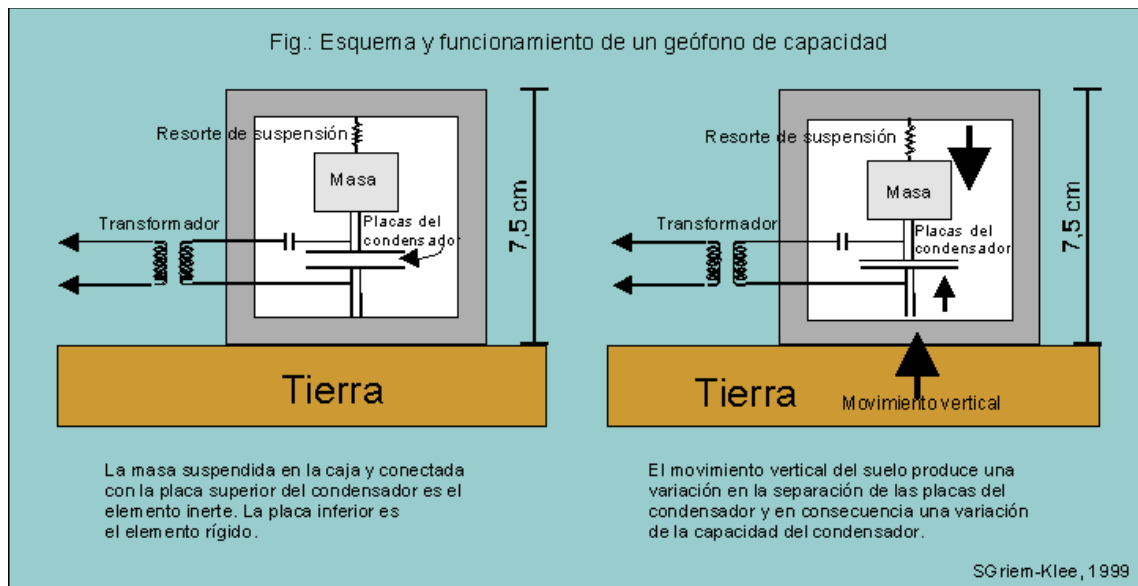
### 2.2.2. **Geófono de capacidad**

Este geófono se basa en la variación de capacitancia de un condensador o capacitor, se utiliza un resorte del que cuelga una masa que se encuentra conectada con una de las placas del capacitor, mientras la otra permanece sin movimiento, al presentarse movimiento en el subsuelo, se produce una

variación en la capacitancia al alejarse y aproximarse las placas. Este geófono mide cambios en desplazamiento.

En la figura 10 se observa una representación gráfica del geófono de capacidad.

Figura 10. **Geófono de capacidad**



Fuente: *Exploraciones mineras*. <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/04003geook.htm>.

Consulta: 25 de mayo 2019.

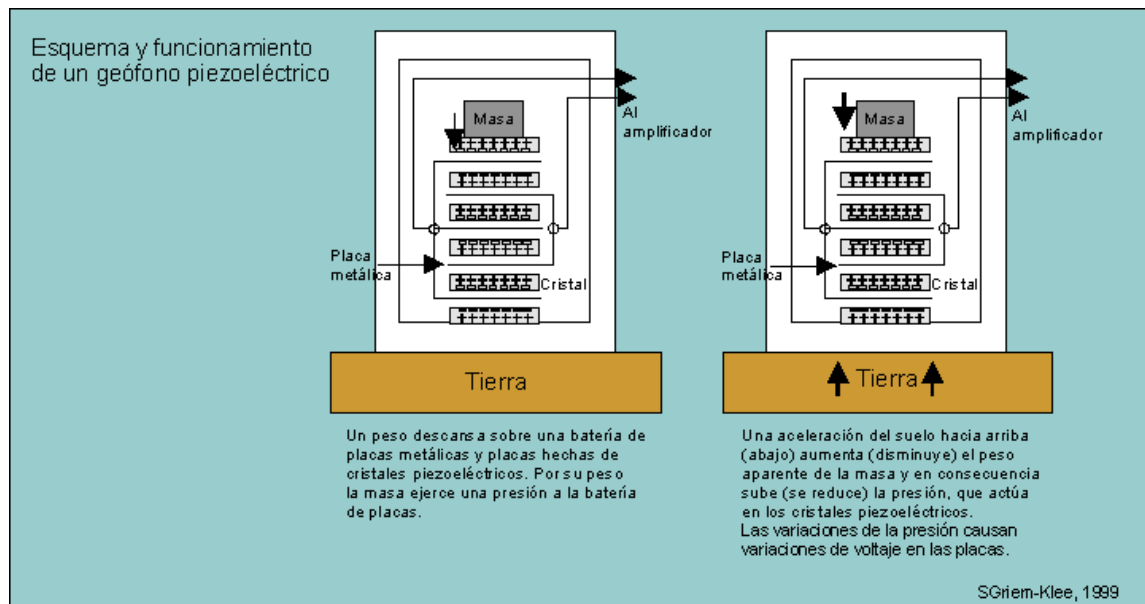
### 2.2.3. **Geófono piezoeléctrico**

La propiedad de ciertos cristales es muy importante para explicar el funcionamiento de este geófono, la piezoelectricidad se basa en que determinados cristales, al ser comprimidos o al aplicar cierta tensión aparte, generan una polarización en sus extremos, dado que sus partículas, tanto

positivas como negativas son separadas, por lo que la polarización de estos cristales varía proporcionalmente a la fuerza ejercida sobre el material.

Para la elaboración de este tipo de geófono se suele utilizar cuarzo, el cual es un cristal que posee piezoelectricidad, se coloca una masa encima de láminas de cuarzo y al haber un movimiento en dirección ascendente, la masa aparente es mayor y viceversa, por lo cual la polarización del cristal varía proporcionalmente al peso, este sensor mide la aceleración del movimiento. Se puede apreciar el funcionamiento de este tipo de geófono en la figura 11.

Figura 11. **Geófono piezoeléctrico**



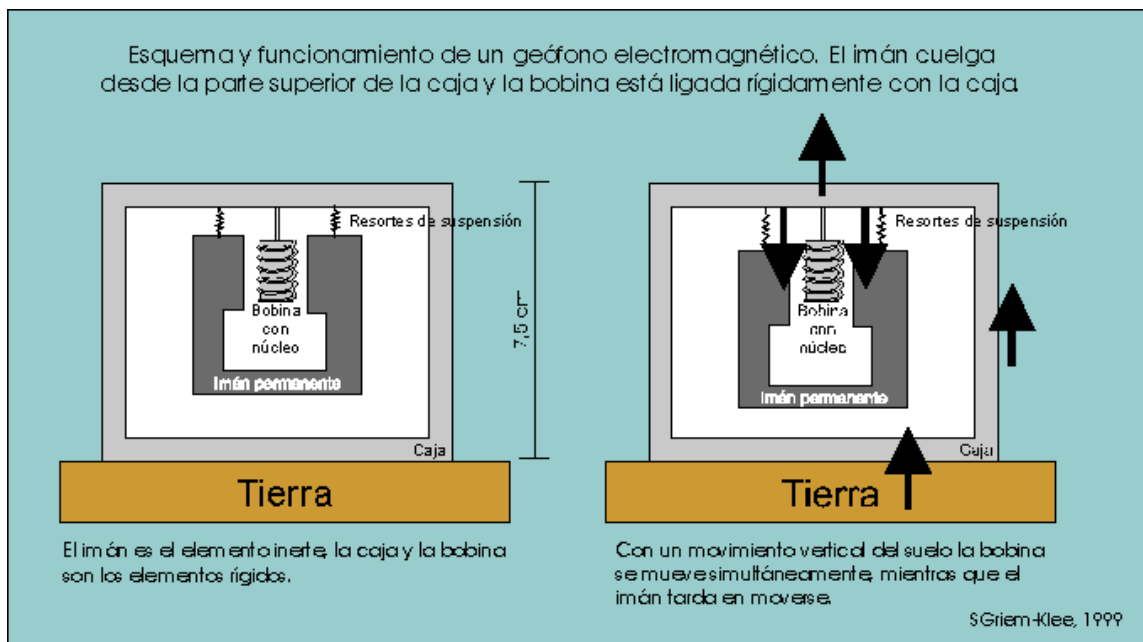
Fuente: *Exploraciones mineras*. <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/04003geook.htm>.

Consulta: 25 de mayo 2019.

#### 2.2.4. Geófono electromagnético

El funcionamiento de los geófonos electromagnéticos, como su nombre lo indica, se basa en la propiedad magnética de ciertos materiales. En este caso se hace uso de imanes permanentes, los cuales proporcionan un campo magnético. También se hace uso de una bobina, cualquiera de los dos puede ser móvil y el otro debe permanecer sin movimiento, por lo cual se coloca uno pegado a las paredes de la caja y el otro con un resorte, al tener un campo variable aplicado en la bobina, esta generará una fuerza electromotriz proporcional a la velocidad del movimiento que se aplique.

Figura 12. Geófono electromagnético



Fuente: *Exploraciones mineras*. <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/04003geook.htm>.

Consulta: 25 de mayo 2019.

## 2.3. Microcontrolador

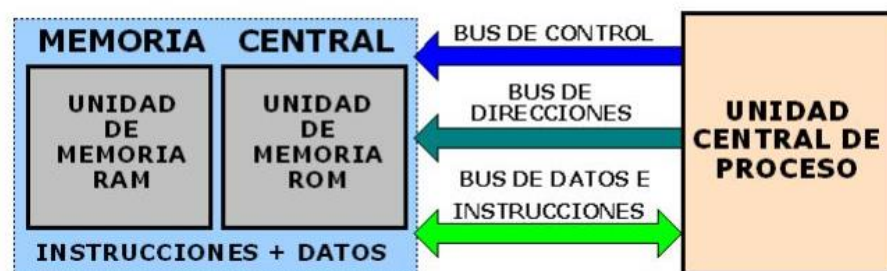
Un microcontrolador es un circuito integrado, el cual posee una unidad central de procesamiento (CPU), se encarga de interpretar las instrucciones, según la construcción del microcontrolador, cuenta con periféricos, puertos de entrada y salida, unidades de memoria como RAM y ROM.

Existen dos tipos de arquitecturas en la construcción de microcontroladores, la Von Neumann y la arquitectura Harvard.

### 2.3.1. Arquitectura Von Neumann

La ventaja principal de este tipo de arquitectura es que existe un ahorro en cuanto a recursos necesarios para su implementación, las memorias RAM y ROM se encuentran en una misma memoria, ambos buses de instrucciones recorren el mismo camino y por esta razón no se usan muchos recursos, sin embargo, su desventaja es que disminuye la velocidad del microcontrolador al usar siempre el mismo camino.

Figura 13. **Arquitectura Von Neumann**



Fuente: *Computo Integrado*. <http://rcmcomputointegrado.blogspot.com/2012/04/arquitectura-von-neumann.html>. Consulta: 27 de mayo de 2019.

### 2.3.2. Arquitectura Harvard

La ventaja de esta arquitectura es la velocidad con la que cuenta, posee una memoria de datos y otra específica para instrucciones, lo que permite que se obtenga toda la información de una manera más óptima, pero su implementación es más costosa al utilizar más recursos. Además, posee la capacidad de procesar hasta tres instrucciones dado que posee *pipeline*.

Figura 14. **Arquitectura Harvard**



Fuente: Computo Integrado. <http://rcmcomputointegrado.blogspot.com/2012/04/arquitectura-von-neumann.html>. Consulta: 27 de mayo de 2019.

### 2.3.3. Protocolo de comunicación UART

UART es un protocolo de comunicación serial, se utiliza para comunicar un circuito integrado con los demás circuitos o con una computadora, cuando se dice que es serial, se refiere a que toma bytes de información y los divide en bits y los envía secuencialmente. El receptor une los bits recibidos y los vuelve bytes nuevamente, este dispositivo controla los puertos y está integrado en el microcontrolador y en la placa madre de la computadora.



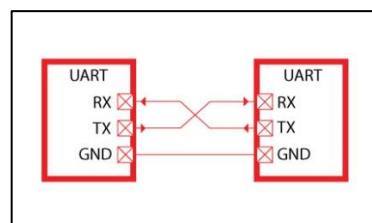
### 2.3.3.1. Conexiones de UART

Las conexiones dependen del tipo de transmisión y recepción deseadas y las propiedades del canal que se utilizarán para el envío de datos, se utilizan tres tipos de transmisión:

- **Simplex:** se envían datos únicamente en un sentido, los dispositivos solo pueden ser receptores o transmisores, pero no pueden ser ambos.
- **Half-dúplex:** los dispositivos pueden enviar y recibir información, sin embargo, no pueden hacerlo al mismo tiempo, porque solo se posee un canal de envío y otro de recepción.
- **Full-dúplex:** pueden enviar y recibir información al mismo tiempo, los dispositivos pueden ser receptor y transmisor en el mismo momento.

Al utilizar este protocolo debe tomarse en cuenta que existe un receptor y un transmisor, si la comunicación es simplex, se posee una conexión de transmisor y receptor únicamente, pero si la comunicación que se desea es *half-dúplex* o *full-dúplex* debe tomarse encuentra el diagrama que se muestra en la figura 15.

Figura 15. **Conexión UART**



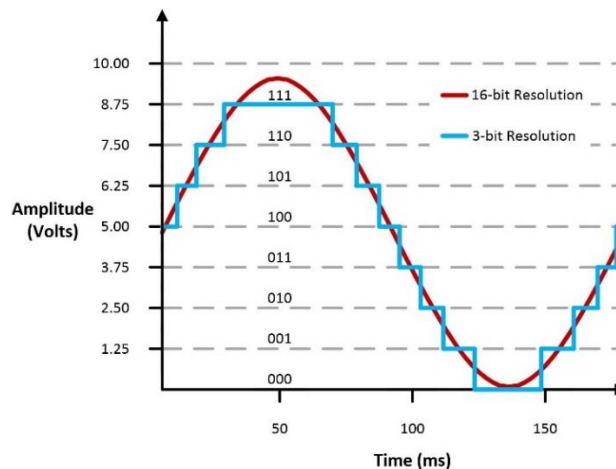
Fuente: *MicroE*. <https://www.mikroe.com/blog/uart-serial-communication>. Consulta: 27 de mayo de 2019.

La figura 15, representa al receptor de un dispositivo, el cual va conectado con su transmisor y viceversa, esto permite que haya una comunicación bidireccional, dependiendo de las propiedades del microcontrolador se puede tener una comunicación *full-dúplex* o una *half-dúplex*.

### 2.3.4. Conversor de análogo a digital (ADC)

Los microcontroladores en su mayoría cuentan con un módulo que les permite convertir una señal análoga, como lo es la señal recibida por el geófono, en una señal digital, esto se hace porque el microcontrolador no sería capaz de procesar todos los valores que toma la señal como tal. Lo que se hace es tomar muestras de la señal, luego se divide el voltaje en cierta cantidad de niveles y la muestra es aproximada a uno de estos niveles y, por último, se le asigna un código a cada nivel para procesar la información.

Figura 16. Ejemplo de ADC



Fuente: *National Instruments*. <http://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/06/acquiring-an-analog-signal--bandwidth--nyquist-sampling-theorem-.html>. Consulta: 27 de mayo de 2019.

## 2.4. Amplificador operacional

Es un elemento activo porque está formado por transistores, posee dos terminales, una inversora y la otra no inversora, tiene un funcionamiento lineal, es muy usado para la implementación de filtros, operaciones aritméticas, circuitos amplificadores, comparadores, circuito acoplador y amplificadores de instrumentación.

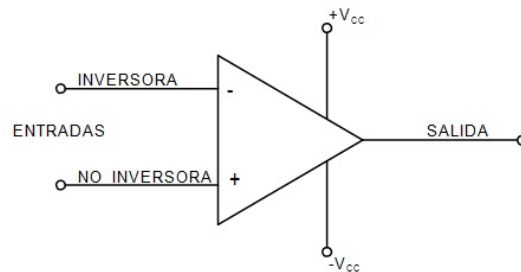
Los amplificadores operacionales son circuitos integrados, de alta fidelidad, existen diversos amplificadores los cuales poseen diferentes propiedades y frecuencias de trabajo, pero todos poseen el mismo funcionamiento.

Las principales propiedades de un amplificador operacional ideal son:

- Ganancia infinita.
- Ancho de banda infinito.
- La impedancia de entrada es infinita.
- La impedancia de salida es cero.
- Corriente de entrada igual a cero.
- Corriente de salida infinita.
- Corto circuito virtual entre sus terminales (esto ayuda mucho para hacer los cálculos).
- Puede alimentarse con fuente bipolar o únicamente voltaje positivo y tierra.

En la figura 17, se muestran las terminales del amplificador operacional y sus partes.

Figura 17. **Amplificador operacional**



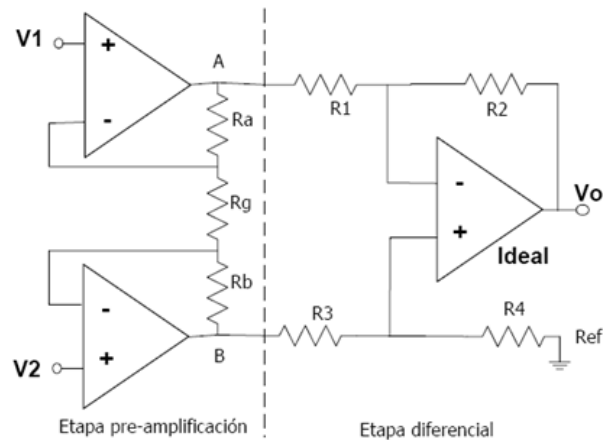
Fuente: *Electronicasi*. <http://www.electronicasi.com/enseanzas/electronica-avanzada/electronica-universitaria/electronica-analogica/introduccion-a-los-amplificaciones-operacionales/>. Consulta: 28 de mayo de 2019.

## 2.5. **Amplificador de instrumentación**

Cuando se desea medir un fenómeno con un sensor que trabaja en una escala muy pequeña, se debe amplificar la señal, este circuito es óptimo debido a que la ganancia diferencial de este amplificador de instrumentación, es precisa y estable. También es muy fácil de variar su ganancia, debido a que se hace uso de un único potenciómetro o resistor variable y es suficiente para tener una amplificación muy grande y lineal.

Se trata de una configuración que cuenta con tres amplificadores operacionales, dos en los cuales se colocan los voltajes que se quieren diferenciar. También puede utilizarse la señal de un sensor en uno y referencia en el otro; luego se encuentra el último amplificador operacional. Todas las resistencias pueden ser iguales y solo variar la resistencia de ganancia ( $R_g$ ), que se puede observar en la figura 18.

Figura 18. **Amplificador de instrumentación**



Fuente: *Instrumentación electrónica I.*

<https://bloginstrukarime.wordpress.com/2013/04/09/amplificador-de-instrumentacion/>. Consulta:  
28 de mayo de 2019.

## 2.6. Filtros

Todos los sensores poseen señales indeseables, como la señal de 60 Hz, dada por el ruido eléctrico de alimentación, por esto se debe utilizar un filtro rechaza banda para suprimir esta portadora y no tener señales que afecten las mediciones del dispositivo.

También se utilizan para suprimir todas las señales que se saben que no pueden ser parte del fenómeno por medir, por ejemplo cuando se trabaja con música y se quiere hacer un análisis digital, se sabe que la voz humana va de 0 a 20KHz entonces se puede aplicar un filtro en ese rango y con esto reducir la probabilidad de que señales que no pertenecen a este rango interfieran con la señal deseada.

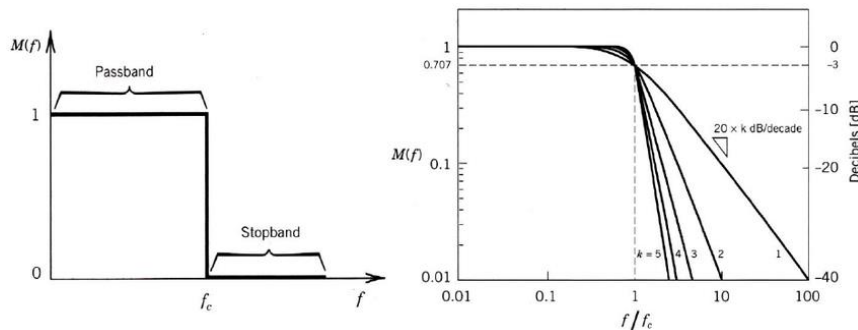
Esto es posible debido a que se puede modificar la señal de salida con un sistema lineal e invariante en el tiempo, teniendo una función de transferencia deseada para que se atenúe la señal como se desea.

### 2.6.1. Filtro paso bajo

Los filtros paso bajo, como su nombre lo indica, solo permiten el paso de las frecuencias que se encuentran por debajo de la frecuencia de corte. Esta es en la cual se produce una caída de 3 dB, puede decirse que es cuando el filtro empieza atenuar la señal.

La figura 19, muestra cómo debería de verse la función de transferencia de un filtro paso bajo ideal y uno real; el real presenta varias curvas debido a que varía dependiendo del orden del filtro o del tipo de filtro que se utilice.

Figura 19. Filtro ideal frente a real paso bajo



Fuente: ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/An-ideal-low-pass-filter-and-magnitude-characteristics-for-Butterworth-low-pass-filter-of\\_fig5\\_268467987](https://www.researchgate.net/figure/An-ideal-low-pass-filter-and-magnitude-characteristics-for-Butterworth-low-pass-filter-of_fig5_268467987). Consulta: 28 de mayo de 2019.

Las gráficas de las funciones de transferencia se obtienen al sacar la ganancia que provoca el circuito, en caso de voltaje se debe dividir el voltaje de salida respecto del voltaje de entrada al mismo.

Existen dos tipos de filtros, los filtros pasivos y los activos, al referirse a filtros pasivos se entiende que solo se hará uso de componentes pasivos como lo son las resistencias, inductancias y capacitores, los filtros activos son elaborados con componentes activos, en este caso un amplificador operacional.

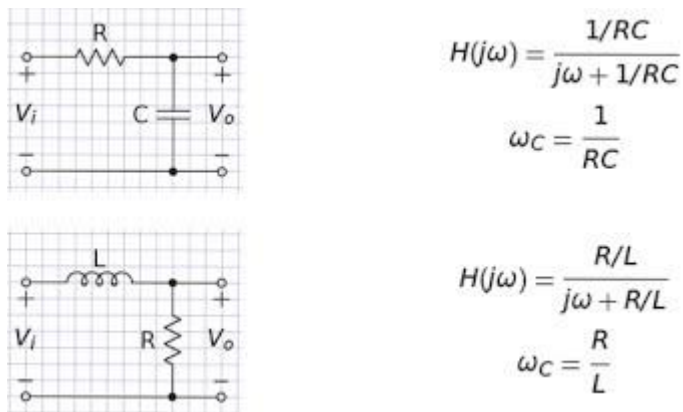
Para crear un filtro paso bajo pasivo de primer orden, se debe utilizar una resistencia y un capacitor en serie y se toma la caída de potencial del capacitor como salida. También se puede utilizar una resistencia en serie a una inductancia y tomar como salida la inductancia, esto debido a la función de transferencia de ambos circuitos, un ejemplo de este caso se muestra en la figura 20.

Puede elaborarse un filtro activo con varios tipos de circuitos usando el amplificador operacional, se nombran algunos a continuación.

- Butterworth: es un tipo de filtro que optimiza la respuesta plana en la banda de paso.
- Tschebyscheff: optimiza la transición dado que su respuesta es más abrupta.
- Bessel: filtro que optimiza la respuesta en fase.
- Chebyshev: optimiza la caída en frecuencias bajas debido a su rizado en estas frecuencias.
- Cauer: este filtro es muy similar al del inciso anterior, sin embargo, solo acota el rizado de la banda en un solo lado.

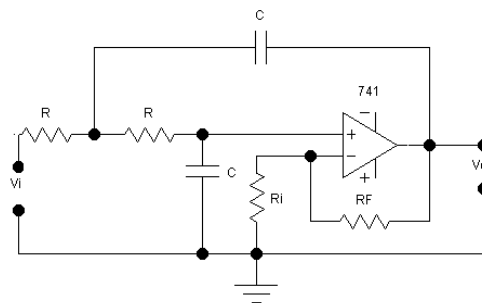
Para los filtros activos se puede aumentar el orden del filtro colocando en cascada varios filtros del mismo tipo.

Figura 20. **Filtro pasivo paso bajo de primer orden**



Fuente: *GoUmh*. <https://sites.google.com/a/goumh.umh.es/circuitos-electronicos-analogicos/transparencias/tema-2>. Consulta: 28 de mayo de 2019.

Figura 21. **Filtro paso bajo activo butterworth de primer orden**

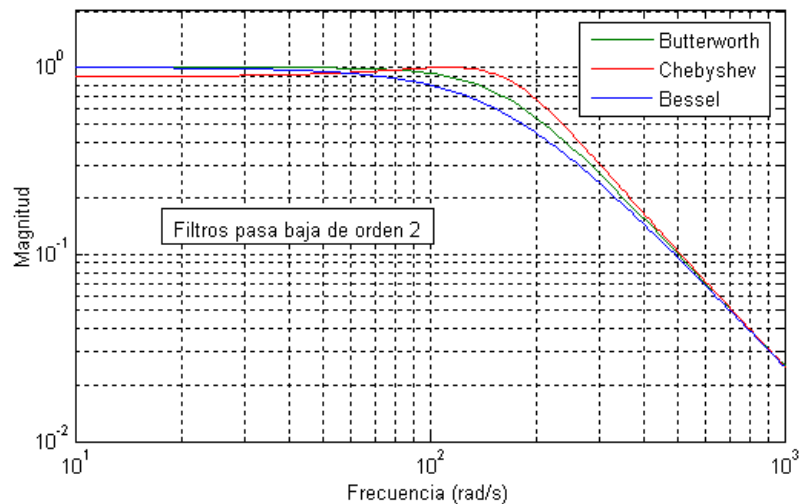


Fuente: *Filtros Butterworth*. <http://filtrosbutterworth.blogspot.com/>. Consulta: 28 de mayo de 2019.



El filtro que se muestra en la figura 21, es un ejemplo, pero los otros tipos de filtros poseen ciertas discrepancias y se utilizará el filtro butterworth para la elaboración del filtro paso bajo.

Figura 22. **Funciones de transferencia filtros activos**



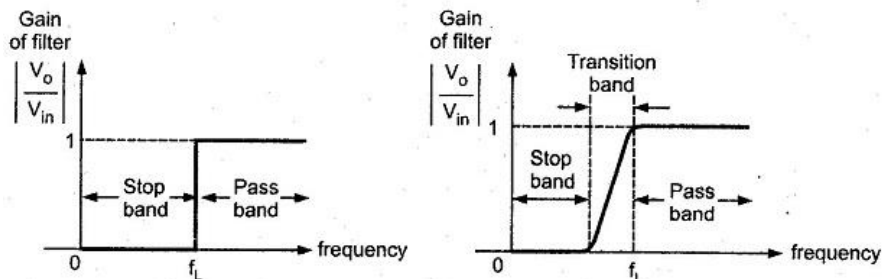
Fuente: *Electrónica analógica Pérez*. <https://sites.google.com/site/electronicaanalogicaperez/w/2-6-1-clasificacion-de-filtros-segun-su-funcion>. Consulta: 28 de mayo de 2019.

### 2.6.2. Filtro paso altos

Este tipo de filtros solo permite el paso de señales que posean frecuencias más altas que la frecuencia de corte, la forma ideal del filtro, se muestra del lado izquierdo de la figura 23 y la forma real del lado derecho de la misma.

También se debe tener en cuenta que se pretende que todas las frecuencias que estén por debajo sean nulas o al menos estén muy atenuadas, dado que como no es un filtro ideal podrán pasar aún algunas señales.

Figura 23. Función de transferencia filtro paso alto



Fuente: *EEEGUIDE*. <http://www.eeeguide.com/frequency-response-characteristics-of-filters/>.

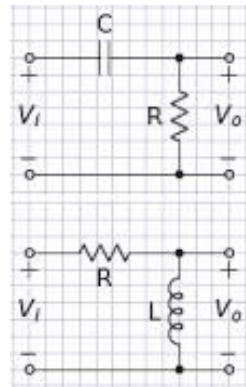
Consulta: 28 de mayo de 2019.

Al igual que el filtro paso bajo, se pueden tener filtros pasivos y activos, solo que en este caso para los filtros pasivos se deben tomar las salidas del componente contrario. Entiéndase que si se posee un circuito en serie RC, la salida para que sea un filtro paso alto debe ser la resistencia, pero si se tiene un circuito RL, la salida debe ser la inductancia.

La representación gráfica de lo explicado en el párrafo anterior se puede observar en la figura 24, con sus debidas funciones de transferencia, al valuar ciertas frecuencias en esa función de transferencia, se puede observar el patrón que se muestra en la figura 23.

Este circuito también puede ser utilizado para suprimir la señal directa o DC, porque puede filtrarse las señales que tengan cero Hz de frecuencia, que es el caso de estos tipos de señales, esto puede servir para cuando se le suma a una señal voltaje positivo para volverla de corriente directa y luego regresarla a como se encontraba sin la suma.

Figura 24. **Filtro paso alto pasivo de primer orden**



$$H(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + 1/RC}$$

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

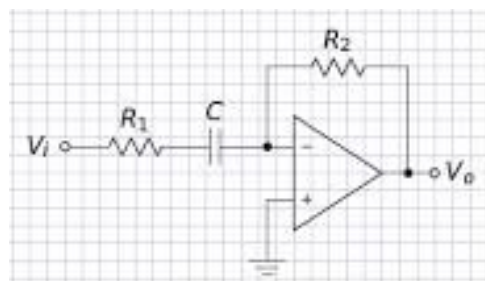
$$H(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + R/L}$$

$$\omega_c = \frac{R}{L}$$

Fuente: *GoUmh*. <https://sites.google.com/a/goumh.umh.es/circuitos-electronicos-analogicos/transparencias/tema-2>. Consulta: 28 de mayo de 2019.

También se cuenta con filtros activos un ejemplo de ellos se presenta en la figura 23, con el fin de mencionarlos, sin embargo, no se utilizará ningún filtro paso alto en la implementación del dispositivo.

Figura 25. **Filtro paso alto activo**



$$H(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{j\omega}{j\omega + 1/R_2C}$$

$$H_0 = -\frac{R_2}{R_1}$$

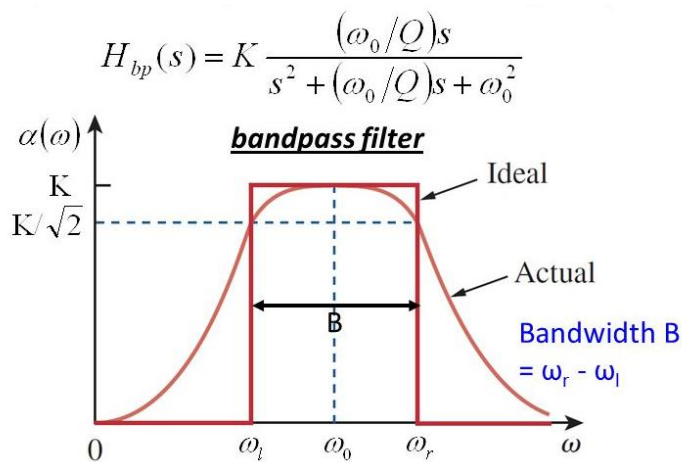
$$\omega_c = \frac{1}{R_1C}$$

Fuente: *GoUmh*. <https://sites.google.com/a/goumh.umh.es/circuitos-electronicos-analogicos/transparencias/tema-2>. Consulta: 28 de mayo de 2019.

### 2.6.3. Filtro pasa banda

Un filtro pasa banda, consta de dos frecuencias de corte una inferior y otra superior, esto con el fin de dejar pasar una banda completa o un ancho de banda que incluye varias frecuencias, se puede ver como que una unión entre un filtro paso bajo y un paso alto, su función de transferencia se presenta en la figura 24.

Figura 26. Función de transferencia de filtro pasa banda



Fuente: *SlidePlayer*. <https://slideplayer.com/slide/4173679/>. Consulta: 28 de mayo de 2019.

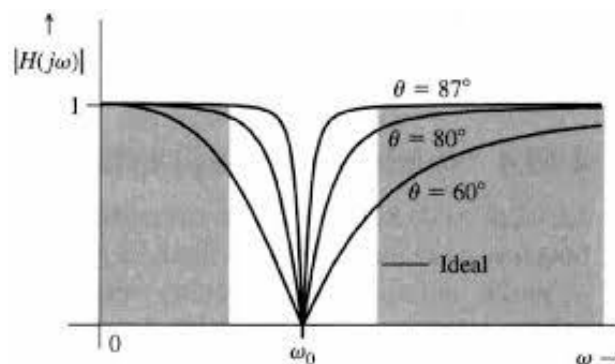
La elaboración de un filtro pasa banda es muy sencillo ya que solo se debe de conectar en serie un circuito de filtro paso bajo y uno paso alto, por esta razón no se colocará un ejemplo como tal.

### 2.6.4. Filtro rechaza banda

La función principal de este tipo de filtros es suprimir ruido o recuperar la señal original cuando se modula una señal con portadora incluida.

Se basa en eliminar cierta frecuencia de una señal ya sea ruido o una portadora de alta potencia que usualmente se usa para modular señales, debido a que las antenas mientras más baja sea la potencia de la señal, mayor será la longitud de la misma.

Figura 27. **Función de transferencia de un filtro rechaza banda**



Fuente: *Imperial College.*

[http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/ee2\\_signals/Lecture%209%20-%20Poles%20Zeros%20&%20Filters.pdf](http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/ee2_signals/Lecture%209%20-%20Poles%20Zeros%20&%20Filters.pdf). Consulta: 28 de mayo de 2019.

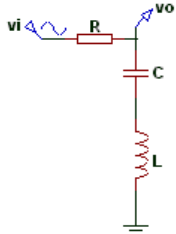
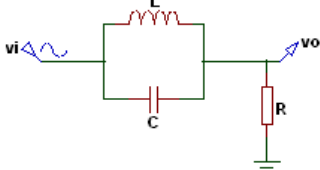
Existen varios tipos de circuitos al igual que el pasabanda se pueden poner en serie ambos circuitos de paso bajo y paso alto, también puede hacerse un circuito activo, pero se presenta uno a continuación como ejemplo de un circuito pasivo de segundo orden, puede observarse en la figura 28.

Lo que se hace para construir un filtro rechaza banda es colocar en serie una resistencia, un capacitor y una inductancia y se toma como salida del mismo la caída de potencial del capacitor e inductancia juntos. Otro modelo no tan común es colocar en paralelo el capacitor e inductancia y seguido de esto

colocar en serie una resistencia, se toma como salida la caída de potencial en la resistencia.

Las ecuaciones de diseño sirven para saber los valores de los componentes del mismo, basados en las frecuencias de corte deseadas, se puede tratar de hacer que los valores de los capacitores e inductancias sean valores reales mientras que la resistencia puede ser un potenciómetro para que se tengan los valores exactos requeridos y el filtro sea mucho más fiel y se pueda tener la frecuencia de corte exacta o muy aproximada a la deseada.

Figura 28. Filtro rechaza banda

Filtro Rechaza Banda RLC	Función de transferencia	Ecuaciones de diseño
<p><b>Circuito Forma 1</b></p> 	$\frac{v_o}{v_i}(s) = \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + s\frac{R}{L} + \frac{1}{LC}}$	$C = \frac{1}{2\pi f_o QR}$ $L = \frac{QR}{2\pi f_o}$
<p><b>Circuito Forma 2</b></p> 	$\frac{v_o}{v_i}(s) = \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + s\frac{1}{CR} + \frac{1}{LC}}$	$C = \frac{Q}{2\pi f_o R}$ $L = \frac{R}{2\pi f_o Q}$

Fuente: *Wilaeba Electrónica*. <https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2017/01/filtro-rechaza-banda-pasivo-de-2do-orden-rlc.html>. Consulta: 28 de mayo de 2019.

### **3. ELECCIÓN DE COMPONENTES Y DISEÑO DE MÓDULOS**

Se deben elegir los componentes correctos e ideales por utilizar, porque siempre tienen que cumplir con ciertos requerimientos, basado en el fenómeno que se quiere medir. También se debe tomar en cuenta que los componentes no se comportan de forma ideal. Esto es un factor determinante para el diseño del dispositivo ya que es necesario decidir entre costo y eficiencia, para encontrar el equilibrio entre ambos.

#### **3.1. Descripción de la parte física del dispositivo**

El dispositivo debe ser capaz de medir un fenómeno sísmico, el cual tiene un rango de frecuencia usual que va de 0 a 100 Hz, tomando en cuenta la señal de 60 Hz siempre presente en un sistema que utiliza electricidad.

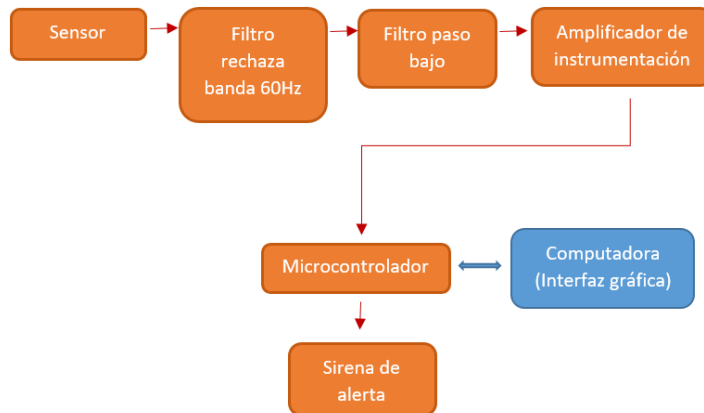
Las señales de actividad sísmica son muy pequeñas, esto se debe a muchos factores como el sensor empleado, la velocidad del movimiento que se registra, el procesamiento de la señal y otros. Es importante que la señal sea amplificada para apreciar bien los cambios presentes y tener medidas mucho mejores.

Para tener un control automatizado, se debe digitalizar la señal que se mide, esto ayuda para tener un método que ayude a generar alertas audibles o visibles, todo dependiendo de las magnitudes que se registren.

En la figura 29 se presenta el diagrama de bloques del dispositivo, la parte de color naranja representa todo el sistema análogo y su unión con el proceso

digital y lo azul representa la conexión con la computadora que es puramente digital.

Figura 29. **Diagrama de bloques**



Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Word.

### 3.2. **Geófono electromagnético**

Se eligió este sensor debido a que su implementación es sencilla y puede realizarse sin necesidad de hacer uso de componentes difíciles de conseguir o de precio muy elevado.

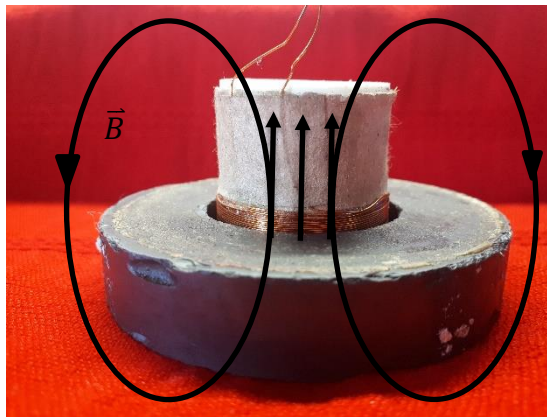
Para el diseño del mismo deben explicarse las bases teóricas para los cálculos del embobinado y las elecciones de imanes permanentes.

El imán que se eligió pertenece a una bocina la cual ya no servía, tiene forma circular y es perfecta para la bobina que se aproxime perpendicular a su superficie, dado que las líneas de campo magnético atraviesan dicha bobina de



forma lineal pero que varía según la velocidad con la que se aproxime. Se muestra un gráfico para explicar la colocación y ayudar a la comprensión de la teoría del geófono.

Figura 30. **Vista del campo magnético y de la bobina**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2.1. Ley de Faraday

Esta ley estipula que se puede generar un campo eléctrico alrededor de una longitud de material conductor, solo si se posee un campo magnético incidente que varía en el tiempo.

Esta ley se puede aplicar para una sola espira o para múltiples espiras, con la única variación de un escalar que multiplicara la ecuación por el número de espiras del embobinado.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3.1)$$

Al observar la figura 30, se aprecia un campo magnético generado por el imán permanente circular, el campo que genera va del polo norte al polo sur. Al insertar la bobina en el círculo interior el campo incide en la dirección de las flechas negras, al aproximar y alejar la bobina se genera un campo eléctrico en las espiras de la bobina obteniendo así un voltaje inducido.

La ecuación 3.1 debe multiplicarse por el número de espiras del lado derecho de la misma, el signo negativo indica que se produce una fuerza en sentido contrario a la que la provocó. La ecuación puede reducirse de la siguiente forma si se toma en cuenta que el lado izquierdo representa el voltaje inducido en la bobina y el lado derecho es la causa:

$$V_{ind} = -N \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3.2)$$

En este caso la ecuación 3.2, representa que el voltaje inducido en la bobina es proporcional al número de vueltas de la bobina y el cambio que haya de flujo magnético sobre la superficie o la variación del área superficial.

En el entorno que se desarrolla este dispositivo, no habrá cambios de áreas, por lo cual se tomará en cuenta solo el cambio en el flujo de campo magnético. Por esta premisa se puede simplificar aún más la ecuación porque la integral del área se reduce a un área conocida, el área de las espiras circulares.

$$V_{ind} = -NA \frac{d(\vec{B})}{dt} \quad (3.3)$$

### 3.2.2. Diseño del geófono

El diseño del geófono se basa en la elección del imán permanente, se probó con varios tipos de imanes, pero debido a las mediciones obtenidas se optó por el imán que se muestra en la figura 31.

Figura 31. **Imán permanente circular**



Fuente: elaboración propia.

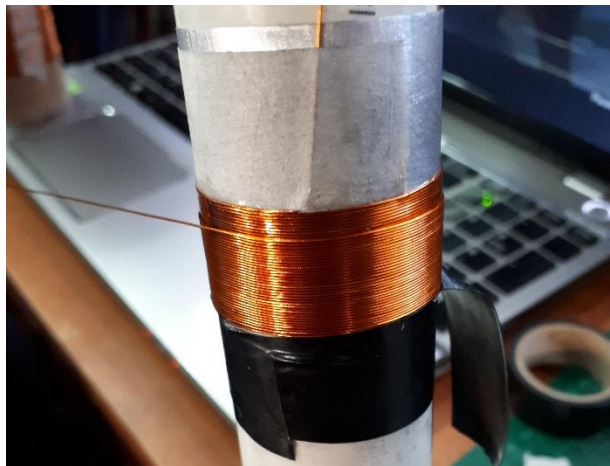
La bobina fue elaborada con alambre calibre 26, se utilizó un tubo de una pulgada, en la cual se colocó aluminio de lata, como núcleo para el embobinado, se procedió a embobinar un tramo de centímetro y medio, la bobina posee 6 capas de embobinado y aproximadamente son 500 vueltas, la bobina se presenta en la figura 32.

Respecto del procedimiento para realizar la bobina se presentan los siguientes pasos:

- Se colocó un pedazo de lata en el tubo y se utilizó cinta para sujetarlo, dejando un pequeño espacio entre los extremos del rectángulo.

- Se esparció pegamento de contacto para que el alambre se fijara a la superficie, se procede a embobinar la primera capa, al terminar con la primera capa se le cambia el sentido a las vueltas colocando el alambre sobre la capa anterior, así para cada una de las capas siempre aplicando pegamento.
- Se trata de limpiar el exceso de pegamento de la capa final y se deja secar por 24 horas.
- Por último, se toma el extremo del alambre con el que se inició y se marca para saber que es el lado positivo de la bobina y el negativo es con el que se finalizó las vueltas.

Figura 32. **Bobina**



Fuente: elaboración propia.

Lo último del diseño del geófono es colocar todo en un encapsulado o una caja, la bobina debe ser suspendida por un resorte y la señal tiene que ser

enviada por cable a los circuitos que modifican la señal para que pueda ser digitalizada y analizada.

### 3.3. Amplificador operacional

Los amplificadores operacionales son una parte esencial para toda la elaboración del dispositivo. Se eligió el amplificador operacional TL074CN o su genérico TL084CN, los dos funcionan de la misma manera, poseen 4 amplificadores operacionales encapsulados en un mismo integrado, se pueden alimentar con una fuente bipolar o con voltaje positivo y tierra.

Los TL074CN y TL084CN son amplificadores con un índice de ruido bajo, son elaborados con J-FET, por esto tienen una velocidad de respuesta muy alta, también soportan voltajes altos de hasta 18 voltios y -18 voltios, trabajan en un rango de temperaturas muy amplio que va desde los 0 a los 70°C, en la tabla III se muestran algunas características extras.

Tabla III. Características TL074CN y TL084CN

Especificación	Descripción
Ganancia de voltaje a gran señal	(15-25)V/mV
Factor de rechazo de la fuente de alimentación	70 dB
Velocidad de rotación	8 V/ $\mu$ s
Máxima ganancia por ancho de banda	2 MHz
Voltaje de alimentación	$\mp$ 18 V
Voltaje de entrada	$\mp$ 15 V
Potencia disipada	680 mW

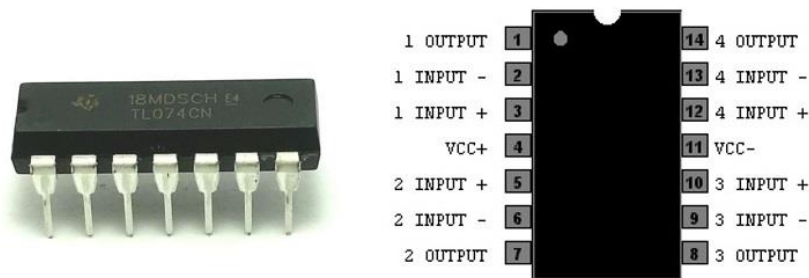
Fuente: elaboración propia, basado en la hoja de datos del fabricante.

[http://www.electroshopxl.be/files/3114/4974/8124/TL074\\_datasheet.pdf](http://www.electroshopxl.be/files/3114/4974/8124/TL074_datasheet.pdf). Consulta: 5 de junio de 2019.

Este amplificador operacional se utilizará en todos los circuitos del dispositivo, debido a su versatilidad y su excelente respuesta, se muestra el integrado con sus pines en la figura 33.

En el lado izquierdo de la figura 33 se observa cómo es físicamente el integrado, del lado derecho se presenta un esquemático indicando los pines del integrado.

Figura 33. **TL074CN**



Fuente: *CircuitSpecialists*. <https://www.circuitspecialists.com/tlo74cn.html>. Consulta: 5 de junio de 2019.

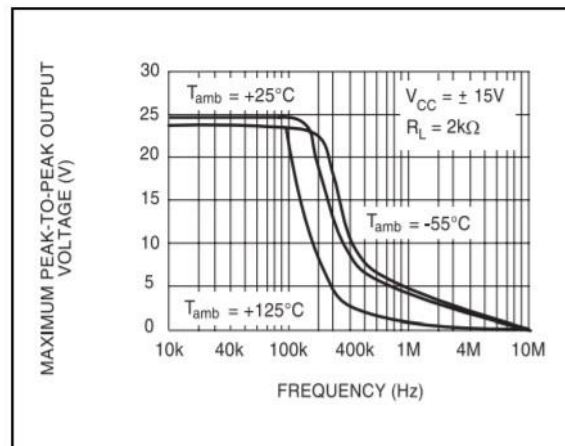
Los 14 pines que posee el integrado TL074CN son:

- Los primeros tres pines pertenecen al primer amplificador operacional, la pata 1 es la salida del amplificador, la 2 pertenece a la terminal inversora y la 3 a la no inversora.
- En el pin 4 se encuentra la alimentación positiva del integrado.
- El pin 11 es la alimentación negativa o referencia del amplificador.

- Los pines restantes son los otros 3 amplificadores operacionales y su especificación se muestra en la figura 33.

También es importante mencionar que los amplificadores operacionales tienen un rango de operación de frecuencia, el rango del TL074CN es de 0 a 400KHz, lo cual funciona para este dispositivo porque los rangos son menores. En la figura 34 se presenta una curva que muestra el comportamiento en frecuencia.

Figura 34. **Operación del TL074CN respecto a la frecuencia**

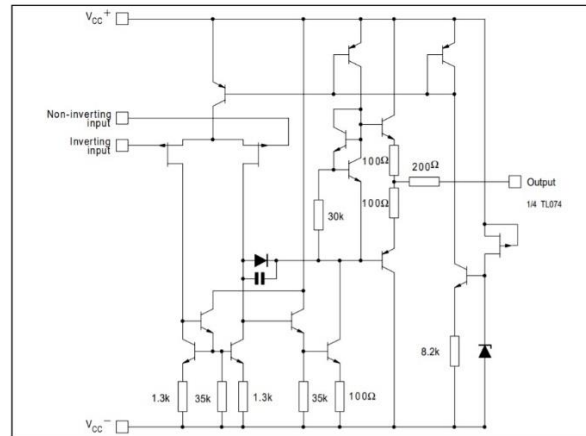


Fuente: *Hoja de datos del fabricante.*

[http://www.electroshopxl.be/files/3114/4974/8124/TL074\\_datasheet.pdf](http://www.electroshopxl.be/files/3114/4974/8124/TL074_datasheet.pdf). Consulta: 5 de junio de 2019.

En la figura 35 se muestra el esquemático que da el fabricante del TL074CN, en el cual se muestran los componentes que posee dentro y sus conexiones.

Figura 35. Esquemático del TL074CN



Fuente: Hoja de datos del fabricante.

[http://www.electroshopxl.be/files/3114/4974/8124/TL074\\_datasheet.pdf](http://www.electroshopxl.be/files/3114/4974/8124/TL074_datasheet.pdf). Consulta: 5 de junio de 2019.

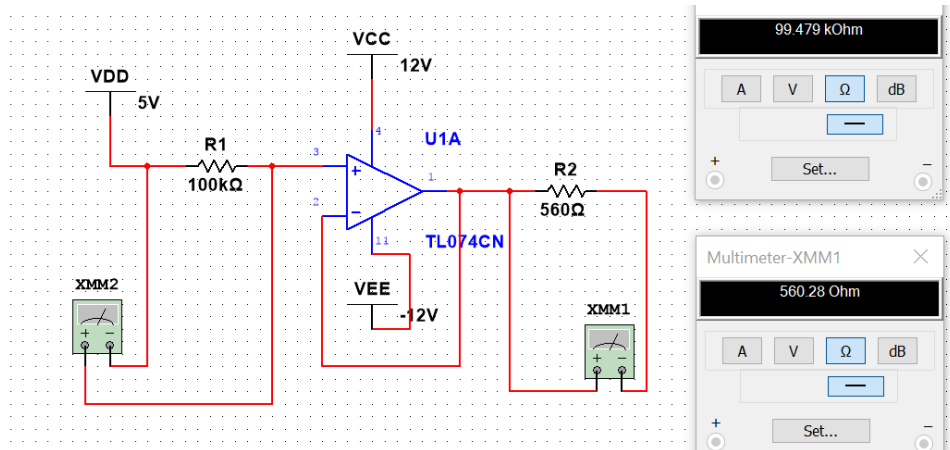
### 3.3.1. Amplificador operacional en modo seguidor

Este modo de uso del amplificador operacional hace uso de la propiedad que tiene el amplificador de poseer impedancia de salida muy baja, esto con el fin de no afectar las impedancias de los demás circuitos cuando se conectan unos con otros. Es muy importante que se acoplen perfectamente y por eso se debe usar un seguidor antes de la entrada a cualquier circuito.

La conexión del seguidor es muy sencilla, se une la pata inversora con la salida y en la pata no inversora se coloca la señal que se pretende ingresar a otro circuito, se muestra un diagrama en la figura 36.



Figura 36. **Circuito seguidor**

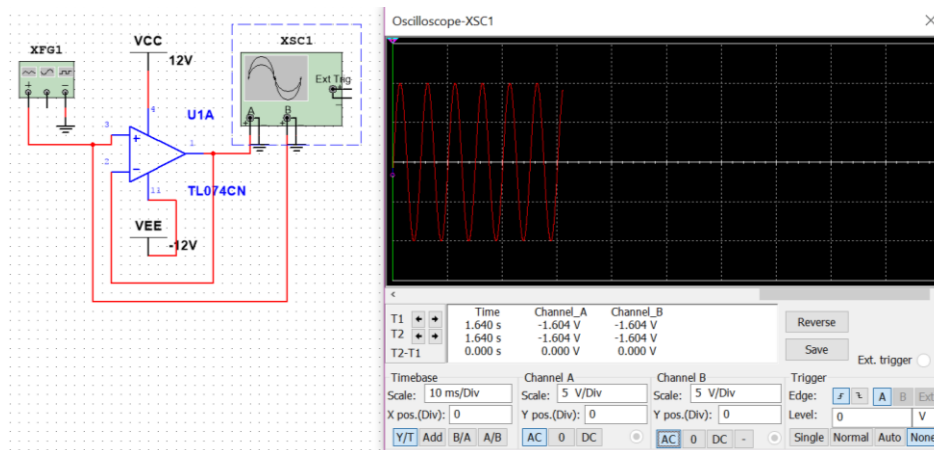


Fuente: elaboración propia.

En la figura 36 se muestra un seguidor de voltaje, en la pata no inversora se colocó una resistencia de  $100K\Omega$  para demostrar que, si se conecta de esta forma, el amplificador no continúa con la impedancia anterior. Del otro lado se colocó una resistencia de  $560\Omega$ . En la figura 36 se puede apreciar que las mediciones son muy cercanas a los valores dispuestos.

Ahora, se demostrará que la señal no sufre ningún cambio y la salida del amplificador operacional conserva los mismos valores de entrada esto debido al corto circuito virtual que existe entre la terminal inversora y no inversora, la señal de entrada se encuentra en la pata no inversora y como tiene retroalimentación con la salida, la salida también poseerá la misma señal.

Figura 37. Demostración del circuito seguidor



Fuente: elaboración propia.

En la figura 37 se puede apreciar que el canal A y el canal B poseen los mismos valores esto es debido a la propiedad antes mencionada y por esto se establece que la ecuación para este modo de amplificador de operación es la siguiente:

$$v_o = v_i \quad (3.4)$$

Esta ecuación conlleva que la función de transferencia será igual a 1 y no se posee ninguna ganancia, se presenta una ecuación 3.5 para expresar lo anterior.

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 \quad (3.5)$$

### 3.4. Filtro rechaza banda 60 Hz

La elaboración de un filtro para suprimir la portadora de 60Hz, es importante debido a que cualquier componente por el cual circule electricidad genera interferencia en todos los equipos que se encuentren en sus alrededores. La señal eléctrica es de alta potencia por lo que siempre será el ruido más común en un sistema electrónico, para evitarlo, se debe suprimir la frecuencia de la misma.

Se hará uso de un filtro con topología de doble "T", elaborado con componentes pasivos y los componentes activos se utilizan únicamente en modo seguidor, se presenta un esquemático del circuito después de explicar los cálculos a continuación.

Las ecuaciones para la topología son las siguientes:

$$w_o = \frac{1}{RC} \quad (3.6)$$

$$\beta = \frac{4(1 - \sigma)}{RC} * 100 \quad (3.7)$$

La ecuación 3.6 es la frecuencia de corte normalizada, es decir, que se quiere 60Hz, pero debe multiplicarse por  $2\pi$  y se tendrá el valor de  $w_o$ . Luego se puede elegir la capacitancia porque es más difícil encontrar los valores exactos de estos, es más sencillo encontrar los valores de los resistores. Por facilidad se utilizarán capacitores de  $100nF$ .

$$R = \frac{1}{(2\pi)(60)(100 \times 10^{-9})} = 26\,525,82 \, \Omega \quad (3.8)$$

La ecuación 3.8 se obtiene al despejar la resistencia y se consigue un valor aproximado de  $26,52K\Omega$ .

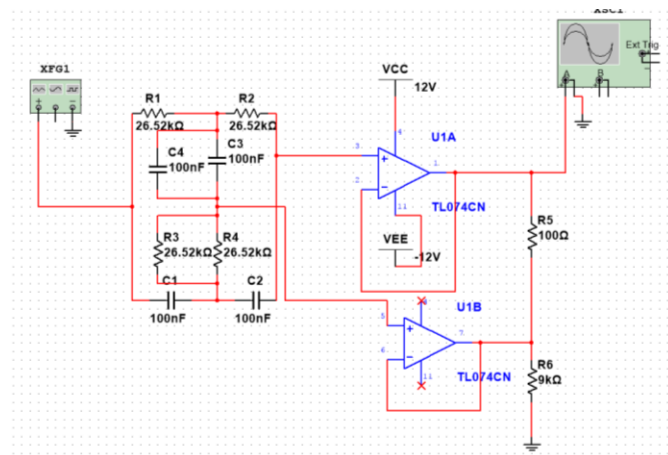
Ya se posee el diseño del filtro, pero se debe calcular el ancho de banda y el porcentaje del divisor de voltaje que se observa en los amplificadores operacionales del lado derecho del esquemático. Para calcularlo se utiliza la ecuación 3.7, donde  $\beta$  es el ancho de banda y  $\sigma$  es el porcentaje. Se requiere de un ancho de banda por lo menos de 5Hz para que sea un buen filtro.

$$\sigma = \left| \frac{5 * (26,52K\Omega) * (100nF) - 4}{4} \right| * 100 = 99,7 \quad (3.9)$$

Así se determina que se necesita que el divisor de voltaje posea el 99,7 %, sin embargo, se utilizará una resistencia de 100 ohms y una de 9 kilo ohms.

Finalmente, el esquema se presenta en la figura 38, su entrada es del lado izquierdo en donde se encuentra en generador de ondas y del lado derecho es la salida donde se colocó el osciloscopio.

Figura 38. **Esquemático filtro 60 Hz**



Fuente: elaboración propia.

### **3.5. Filtro paso bajos**

Para analizar la señal y también discriminar señales que no pertenecen al fenómeno estudiado, se suprimen las bandas que no se utilizarán, para la actividad de sismos las frecuencias que se manejan son bajas, van desde 0 a 100Hz, por esta razón se necesita un filtro que solo permita el paso de frecuencias menores a 100Hz.

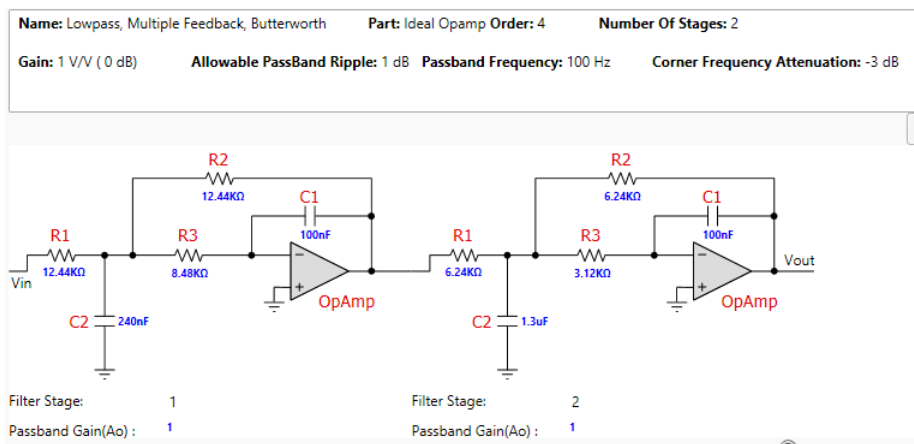
Como se desea que la señal mantenga su forma sin atenuaciones en estas frecuencias, se necesita optimizar la respuesta plana en la banda de paso, es por esto que se utiliza un filtro tipo Butterworth activo de segundo orden, para incrementar la caída decibeles por década, sin aumentar mucho los costos de elaboración. Para su diseño se utilizó ayuda del programa FilterPro Desktop, el cual pertenece a la compañía Texas Instrument, se puede obtener el software en la página oficial de la compañía.

En este programa se deben especificar varias cosas que se ordenan a continuación y se colocan los valores elegidos para el filtro.

- Elegir el tipo de filtro que se desea, filtro paso bajo.
- La ganancia debe ser la unidad porque no se necesita ganancia en el filtro.
- La frecuencia de corte en este caso es 100 Hz.
- Luego se elige la frecuencia de parada 500Hz.
- Se selecciona el orden del filtro, se usa de cuarto orden para poseer dos etapas y que los decibeles por década aumenten.
- Por último, se selecciona el tipo de filtro, Butterworth.

Si se seleccionan estos valores el programa devuelve el esquemático de la figura 39.

Figura 39. Esquemático del filtro paso bajo

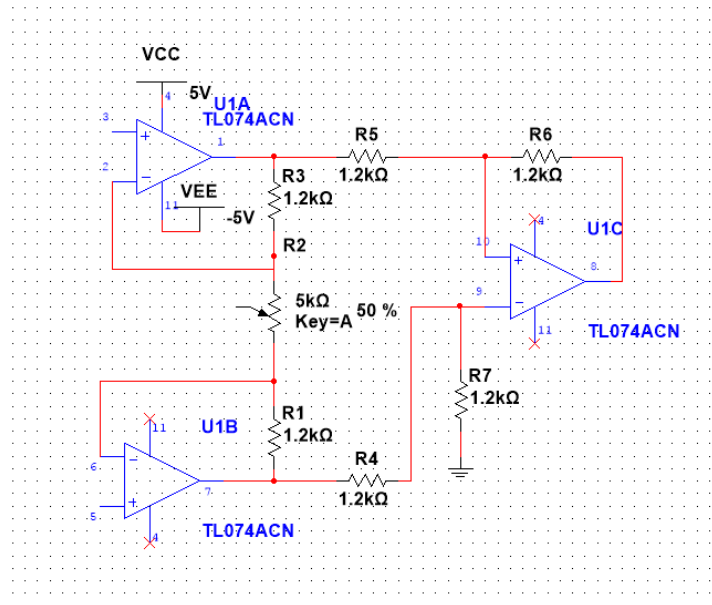


Fuente: elaboración propia, utilizando FilterPro.

### 3.6. Amplificador de instrumentación

La señal que genera el geófono electromagnético está en una escala de voltios pequeña y se debe amplificar linealmente para que la señal no se vea modificada, con el fin de que las lecturas sean más confiables. Es por esta razón que se debe implementar un amplificador de instrumentación que pueda variar su ganancia muy fácilmente y su amplificación sea lineal, como es el caso de esta configuración. A continuación, se muestra un esquemático y se explica el motivo por el cual se eligen los valores de las resistencias.

Figura 40. **Amplificador de instrumentación**



Fuente: elaboración propia.

Se eligieron todas las resistencias con valor de  $1,2K\Omega$ , con el fin de no obtener ganancia en ninguna región del circuito, únicamente se modificará la ganancia con el potenciómetro de  $50K\Omega$ . En el amplificador que se encuentra del lado inferior izquierdo se debe colocar la señal que se desea amplificar y en el superior se coloca la referencia, esto debido a la operación que ejecuta este circuito. En la ecuación 3.10 se muestra las operaciones algebraicas que se logran con esta configuración.

$$V_o = (V_2 - V_1) \left( \frac{2R_3}{R_g} \right) \left( \frac{R_6}{R_5} \right) \quad (3.10)$$

El amplificador de instrumentación es un comparador de voltajes, por medio de sus restas se pueden definir movimientos, posiciones, cantidades y

muchas otras cosas, pero en este caso se utilizará como un amplificador, es por esta razón que todas las resistencias son iguales, entonces, esta ecuación se reduce y da como resultado la 3.11.

$$V_o = (V_2) \left( \frac{2,4K\Omega}{R_g} \right) \quad (3.11)$$

Entonces el voltaje de salida depende únicamente de la variación de  $R_g$ , que en este caso es el potenciómetro, mientras más pequeño sea el valor, mayor será el voltaje de salida.

### **3.7. Microcontrolador Tiva C Series TM4C123GH6PM**

Este microcontrolador fue diseñado con un núcleo ARM Cortex-M, lo cual proporciona un rendimiento alto y un costo bajo, reduce el uso de pines y tiene bajo consumo energético, ofrece una capacidad a nivel computacional excelente, mejor rendimiento y una excelente respuesta del sistema de interrupciones.

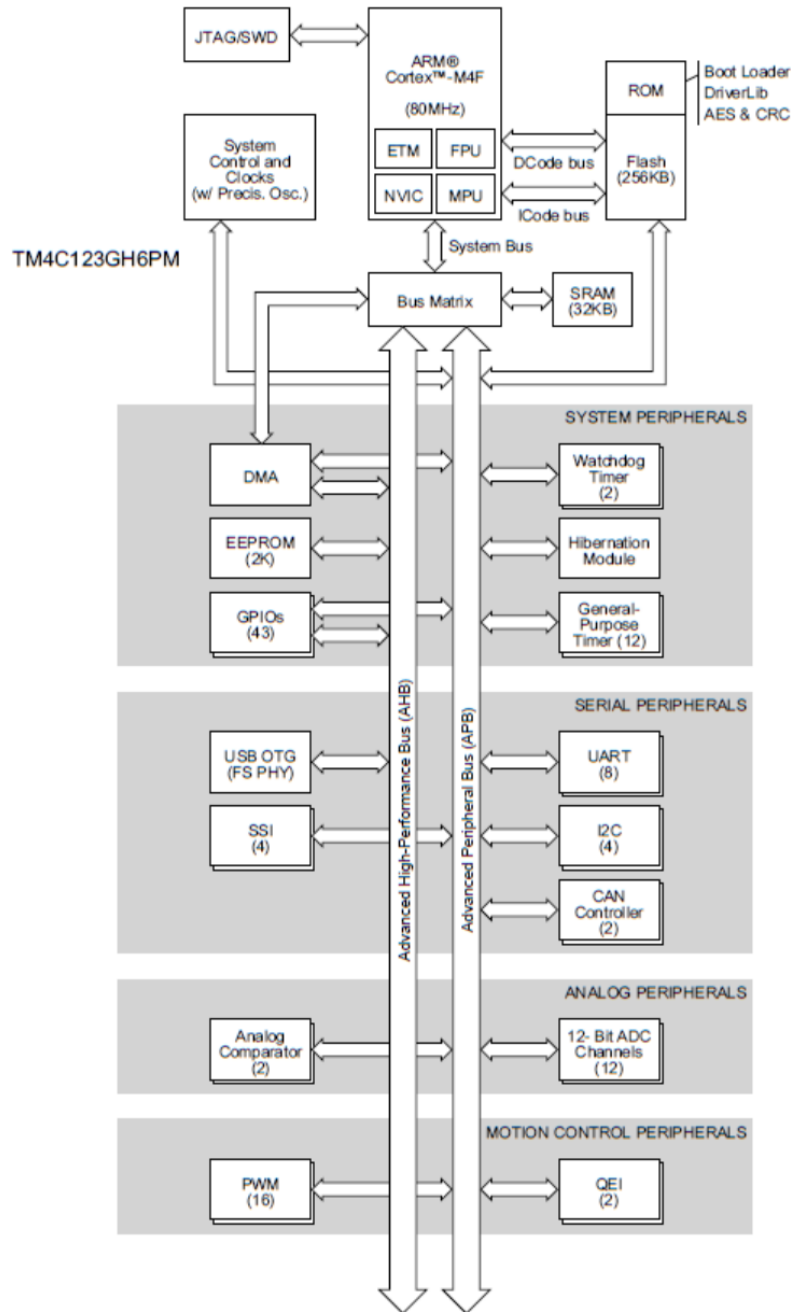
Algunas de las características más relevantes del núcleo Cortex, utilizado en el microcontrolador se enlistan a continuación:

- Posee una arquitectura de 32 bits.
- Trabaja con un reloj de 80MHz.
- Consta de Thumb2 combinado 16/32 bits, con lo cual hace un uso de memorias de forma eficiente logrando varios procesos.
  - Multiplicar instrucciones en un solo ciclo y dividir hardware.



- Acceso de datos no alineados, permite que los datos se almacenen de forma eficiente.
  - Manipulación de bits atómicos, logrando una optimización en el uso de memoria y simplificando el control de periféricos.
- 
- Cuenta con una unidad de punto flotante o FPU, por sus siglas en inglés.
  - Tiene una unidad de procesamiento de vectores SIMD, de 16 bits.
  - Su arquitectura es Harvard.
  - La división de hardware y el procesamiento rápido se acumulan.
  - Aritmética de saturación para procesamiento de señales.
  - Posee unidad de protección de memoria o MPU.
  - Contiene una mejor depuración del sistema con amplias capacidades de interrupción y rastreo.
  - Se reducen los pines de depuración y rastreo gracias al Serial Wire Debug y Serial Wire.
  - Proviene del ARM7 para un mejor rendimiento y optimización energética.
  - Optimizado para uso de memoria flash en un ciclo hasta frecuencias específicas.
  - Consumo de energía muy bajos con modo de suspensión integrados.

Figura 41. Esquemático Tiva C Series TM4C123GH6PM

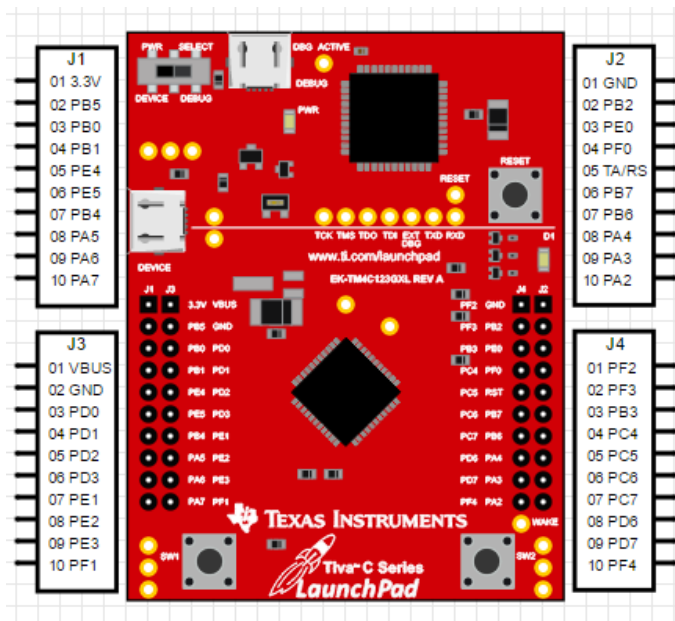


Fuente: Hoja de datos del microcontrolador. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c123gh6pm.pdf>.

Consulta: 13 de junio 2019.

En la figura 41 se muestra un diagrama de bloques con todas las funciones que posee la Tiva C series, las que serán utilizadas son únicamente los GPIOs, UART y ADC.

Figura 42. Tiva C Series TM4C123GH6PM



Fuente: *Embedded Lab*. <http://embedded-lab.com/blog/tiva-c-gpios/>. Consulta: 17 de junio 2019

### 3.7.1. Módulo UART Tiva C Series TM4C123GH6PM

El microcontrolador que se utilizará contiene 8 receptores UART y 8 transmisores los cuales poseen las siguientes características:

- Posee un generador de velocidad en baudios programable que permite velocidades de hasta 5Mbps para velocidad normal y 10 Mbps para alta velocidad.

- Cuenta con memorias FIFO de 16x8 separadas de transmisor y receptor para reducir la carga de interrupción.
- La FIFO posee un byte para la interfaz de buffer doble.
- Contiene bits de comunicación asíncrona estándar para inicio, parada y paridad.
- Generación y detección de saltos de línea.
- Tiene interfaz serial completamente programable.
  - 5, 6, 7 u 8 bits de datos
  - Generación y detección de bits par, impar o sin paridad
  - Generación de uno o dos bits de parada
- Se puede hacer uso de su codificador y decodificador de IrDA serial-IR para velocidades de hasta 115 200 bps en un canal half-dúplex.
- Posee interrupción estándar de nivel FIFO y fin de transmisión.
- Transferencias eficientes utilizando el controlador de memoria micro directo.

El microcontrolador tiene pines específicos que funcionan como transmisor o como receptor, todos se especifican en su hoja de funcionamiento, se utilizarán los dos pines que se envían por la terminal de micro USB, con el fin de enviarlo a la conexión USB de la computadora, los pines son A0 como receptor y A1 como transmisor. Estos pines hacen uso del módulo 0 de UART.

### **3.7.2. Módulo ADC Tiva C Series TM4C123GH6PM**

Se incluyen dos módulos ADC idénticos, que comparten 12 canales de entradas los cuales tienen una resolución de 12 bits, más un sensor de temperatura interno. Cada módulo de ADC contiene cuatro secuenciadores

programables que permiten el muestreo de múltiples fuentes analógicas sin intervención del controlador.

Cada secuenciador de muestreo posee una programación muy flexible y es completamente configurable, se pueden tener eventos que permitan un disparo, generación de interrupciones y la prioridad que se desea para el secuenciador. Las fuentes de disparo para el ADC0 y ADC1 pueden ser la misma o ser diferentes, además pueden operar con las mismas entradas o diferentes. Los dos módulos que se poseen de ADC cuentan con las siguientes características:

- 12 canales de entrada compartidos.
- La precisión del ADC puede ser de hasta 12 bits.
- Configuraciones de entrada única o diferencial.
- Sensor de temperatura interno.
- Velocidad de muestreo máxima de un millón de muestras por segundo.
- Cambio de fase opcional en el tiempo de muestreo que va de  $22,5^\circ$  a  $337,5^\circ$ .
- Cuenta con cuatro secuenciadores de muestreo con ocho entradas de largo, con sus debidas FIFOs de resultados de conversión.
- Control flexible de disparo
  - Controlador o programa
  - Temporizadores
  - Comparadores analógicos
  - PWM
  - GPIO
- Promedio de hardware hasta 64 muestras

- Posee 8 comparadores digitales

Para muestrear un único sensor se utilizará el pin E3, el cual es el primer canal de entrada, se hará uso del ADC0 con el secuenciador 0, el disparo será ejecutado con un temporizador que tendrá cuatro veces la velocidad de la señal que se muestrea, como el UART es capaz de enviar hasta 8 bits, se utilizará una resolución de 8 bits en el ADC.

### 3.8. Presupuesto de los componentes

A continuación, se muestra la tabla de precios.

Tabla IV. Precios de los componentes

Componente	Cantidad	Precio unidad	Precio total
Base para integrado	4	Q 0,50	Q 2,00
Fila de pines hembra	1	Q 4,50	Q 4,50
Placa	1	Q 11,00	Q 11,00
TL074CN	4	Q 7,00	Q 28,00
Capacitores de poliéster verdes	10	Q 1,00	Q 10,00
Capacitor de poliéster para potencia	1	Q 2,00	Q 2,00
Potenciómetros de precesión	8	Q 4,00	Q 32,00
Borneras	10	Q 2,00	Q 20,00
Resistencias	20	Q 0,10	Q 2,00
Alambre esmaltado calibre 26 por metro	50	Q 0,50	Q 25,00
Resorte	1	Q 16,99	Q 16,99
Lija de agua 120	1	Q 5,49	Q 5,49
Epóxido ACE	1	Q 36,99	Q 36,99
Armella	1	Q 1,50	Q 1,50
Tubo PVC para bobina 1 pulgada	1	Q 5,99	Q 5,99
Tapadera PVC 3 pulgadas	2	Q 15,00	Q 30,00
Tapadera PVC 1 pulgada	2	Q 1,40	Q 2,80
Tiva C Series TM4C123GH6PM	1	Q 130,00	Q 130,00
Fuente de poder	1	Q 50,00	Q 50,00
Imán de bocina de 8 ohmios	1	Q 50,00	Q 50,00
		Total	Q 466,26

Fuente: elaboración propia.

## 4. INTERFAZ GRÁFICA, SUS COMPONENTES Y SU ELABORACIÓN

Se necesita una interfaz gráfica para visualizar los datos obtenidos con los métodos de adquisición utilizados, con el fin de tener un registro de las actividades sísmicas, para observar la señal que se obtiene por medio del transductor. La interfaz gráfica necesita el envío los datos del conversor de análogo a digital, por medio del protocolo de comunicación serial UART, es por esta razón que se implementó un programa utilizando *Code Composer Studio*, el cual utiliza un lenguaje de programación estructurado llamado "C".

### 4.1. *Code Composer Studio (CCS)*

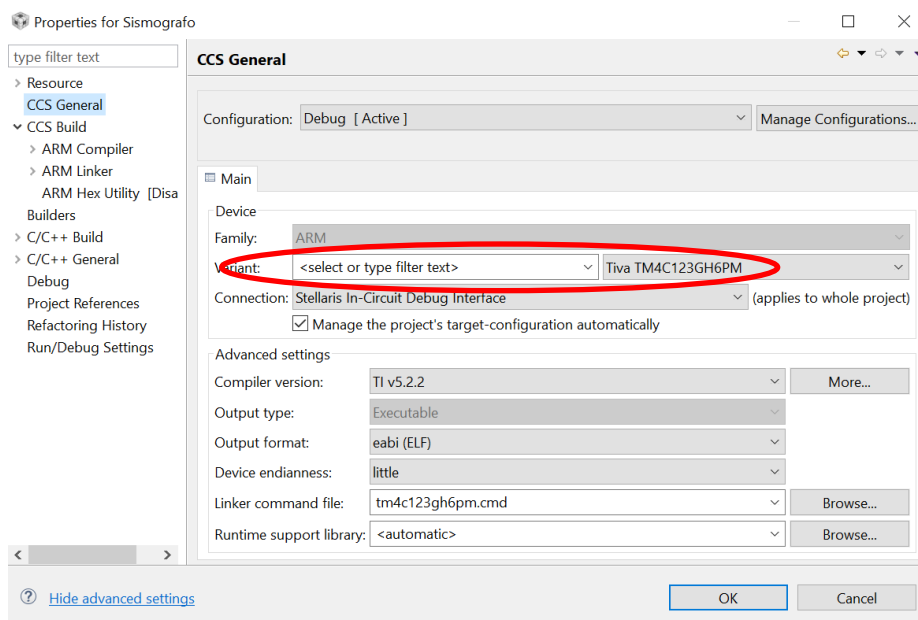
Se utilizó la versión 6.10 del mismo, sirve para compilar, ensamblar y depurar código, tanto en lenguaje estructurado, como en lenguaje de bajo nivel como es el lenguaje ensamblador. CCS puede instalarse de forma gratuita al crear un usuario en la página de Texas Instruments.

El uso del software es muy sencillo si se siguen los pasos de configuración para el lauchpad que se utilice, en este caso es la Tiva C Series TM4C123GH6PM Lauchpad, la cual debe indicarse antes de crear un proyecto, esto debido a que cada tarjeta cuenta con periféricos y registros específicos para cada elemento del que se compone.

#### 4.1.1. Configuraciones para el uso de CCS

Como primer paso se debe de abrir la herramienta, se selecciona la pestaña “Project”, luego la opción “Properties”, en la ventana emergente, se debe seleccionar el código de la tarjeta que se utiliza, en la figura 43, se muestra la ventana emergente y la selección realizada.

Figura 43. Selección de la tarjeta de desarrollo



Fuente: elaboración propia.

El segundo paso consta de crear un proyecto, se selecciona la pestaña “Project”, seguido de eso se elige “New CCS Project”, se coloca el nombre que se desee para el proyecto. Para tener todas las configuraciones deseadas se tienen que agregar librerías las cuales se descargan, se crea una variable para el proyecto con los pasos siguientes:



- En el lado izquierdo se pueden observar los proyectos existentes, se debe dar clic derecho y seleccionar propiedades.
- Luego debe de seleccionar “C/C++ Build”, a continuación, seleccionar “Build Variables”.
- Se debe elegir el botón “Add...”, el cual despliega una ventana emergente, en el nombre de variable se coloca “TIVAWARE\_INSTALL”.
- Luego debe de elegir el tipo de variable en este caso como es una carpeta, es de tipo “Directory”.
- En el valor debe poner la dirección en la cual guardó la carpeta, por defecto se encuentra en “C:\ti\TivaWare\_C\_Series-2.1.1.71”.
- Se da clic en “OK”.

Cuando ya se cuenta con una variable creada, se necesita incluirla para que se pueda hacer uso de ella. Los pasos para incluirla son los siguientes:

- En la ventana emergente de las propiedades del proyecto, se selecciona “CCS Build”, a continuación, seleccionar “ARM Compiler”.
- Luego dar clic en “Include Options”, en esas opciones hay un ícono con forma de archivo que tiene un signo de suma color verde, se selecciona ese ícono.
- Se selecciona el botón de variables y se busca “TIVA\_WARE INSTALL”, seguido de eso se presiona “OK” a ambas ventanas.

Por último, se debe ingresar a la carpeta donde están las librerías, seleccionar la carpeta que dice “driverlib”, luego “CCS”, “Debug”, se arrastra el archivo que se encuentra dentro de esa carpeta y se suelta sobre la carpeta del proyecto en CCS. Este paso es lo último que se debe realizar para empezar a escribir el código.

#### 4.1.2. Programación estructurada en CCS

Todos los proyectos constan de un “main.c”, el cual es el que contiene toda la programación, para la ejecución de las secuencias que se desean ejecutar. También consta de “startup.c”, este archivo se modifica únicamente si se realizarán interrupciones ya sea para un ADC, o cualquier secuencia que lo requiera.

Lo primero que se coloca en el archivo principal, son las librerías que se utilizan en la elaboración del proyecto, luego se pueden colocar las variables globales, para que todos los métodos puedan hacer uso de ellas o para observarlas cuando se esté probando la programación.

Todos los métodos que se utilicen deben ir antes del método principal o *main(void)*, para que luego puedan ser llamados por este método, se puede nombrar después de las variables globales o simplemente escribirlos antes de la secuencia principal.

La configuración para el reloj de la Tiva C Series, puede ser a una velocidad de 80MHz o 40MHz. En este caso se utilizó la velocidad menor, ya que al muestrear una señal que no supera los 100Hz, no se necesita más velocidad, para ello solo debe realizarse una división en el reloj principal dentro de 5.

Para muestrear y enviar la señal análoga, es necesario realizar una interrupción que se ejecute por medio de un temporizador, el cual debe calcularse según la frecuencia de muestreo requerida, en este caso es:

$$Temporizador = (40 \times 10^6) \left( \frac{1}{200Hz} \right) = 200\ 000 \quad (4.1)$$

También se deben configurar el ADC y el UART, con los parámetros de diseño requeridos, luego se deben llamar en la secuencia principal, configurar el temporizador y por último colocar lo que se calculó en la ecuación 4.1. Siempre se debe incluir un bucle infinito para que se siga muestreando y enviando toda la información en cada ciclo.

## **4.2. Bases de datos**

Las bases de datos son un elemento muy importante para el monitoreo y visualización del fenómeno, porque ayuda a guardar toda la información de los eventos sísmicos, garantizando que la información no se borre fácilmente y que tenga ciertas credenciales para su uso.

### **4.2.1. PostgreSQL**

Es un motor de base de datos, la cual es de código abierto, desarrollada por programadores sin fines de lucro, los cuales agregan mejoras y hacen pruebas de vulnerabilidad.

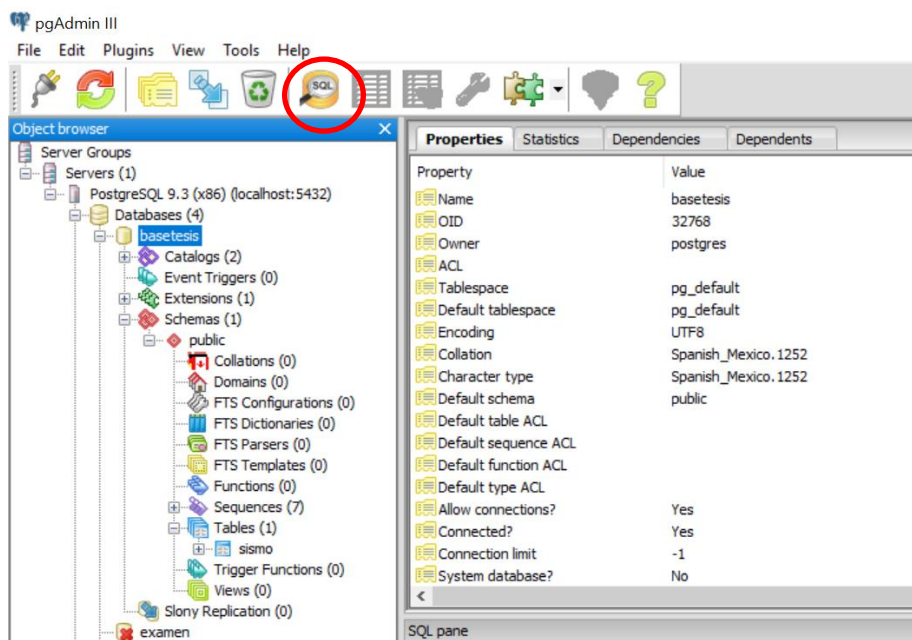
Postgres es muy fácil de utilizar, debido a que se puede crear tablas y objetos de manera muy sencilla con sentencias de SQL. Lo único que se debe hacer es descargar el programa, colocar una contraseña para la base de datos, después se puede crear la tabla con sus requerimientos en el botón SQL.

Debe tomarse en cuenta que para crear una tabla se hace uso de una secuencia, por lo cual se deben seguir los siguientes pasos:

- Crear una secuencia con la siguiente sintaxis: (*create sequence* Nombre).

- Crear la tabla que se desea: (*create table Nombretable*).
- Agregar todas las columnas que se desea en las tablas: (“*idevento int default nextval('si') primary key*”)

Figura 44. Vista de PostgreSQL



Fuente: elaboración propia.

En la figura 44 se muestra, el motor de bases de datos, el cual tiene una base de datos llamada “basetesis”, se puede ir a “Schemas” para mostrar más y confirmar que se creó con éxito la tabla.

#### 4.2.2. Sentencias utilizadas en SQL

Las sentencias en postgresQL son las mismas que se utilizan en SQL, hay comandos, para insertar información en las tablas, ver información

guardada, modificar datos, eliminar datos, crear tablas, eliminar tablas y crear columnas nuevas. Se presentan algunos ejemplos en la tabla V.

Tabla V. **Sentencias SQL**

Sentencia	Descripción
SELECT	Este comando es utilizado para acceder a la información de las tablas, puede seleccionarse toda la información o se puede aplicar filtros y condiciones.
UPGRADE	Sirve para modificar registros, pueden modificarse varios datos o simplemente uno.
DELETE	Elimina los registros que se le indiquen.
INSERT	Inserta datos en la tabla.
CREATE TABLE	Crea una tabla nueva.
DROP TABLE	Elimina toda la tabla y se pierden todos los registros que posee la misma.

Fuente: elaboración propia.

Puede utilizarse sentencias como “SELECT \* FROM nombre\_tabla”, lo cual devuelve todas las filas y columnas de la tabla, o puede hacerse un filtro basado en una condición, por ejemplo: “SELECT clave FROM nombre\_tabla WHERE usuario = dato\_deseado”.

### 4.3. Python

Es un lenguaje de programación interpretado, es de código abierto, el cual cuenta con muchas librerías que facilitan la programación, es orientado a objetos, lo que representa una ventaja porque pueden crearse clases que pueden ser usadas por objetos, esta práctica reduce la complejidad del programa ayudando a disminuir líneas de código, debido a que no se repite varias veces el mismo bloque de sentencias.

#### **4.3.1. Tkinter para Python**

Es una librería con la que cuenta Python, es muy útil para hacer una interfaz gráfica, porque es capaz de crear ventanas, botones, menú tipo lista, obtener datos ingresados por el usuario en las casillas de texto o agregar colores a las ventanas y objetos.

La librería Tkinter se encuentra instalada por defecto, existen otras librerías con las que se puede lograr una interfaz gráfica, sin embargo, se eligió Tkinter porque es fácil de utilizar y existe mucha documentación al respecto.

Se pueden configurar el tamaño de la ventana a crear, las posiciones de los botones, casillas de texto, menús desplegables, imágenes y cualquier objeto que se desee agregar a la interfaz. También es posible cambiar los colores, insertar información de los cuadros de texto y muchas aplicaciones más.

#### **4.3.2. Librería Serial de Python**

Permite la comunicación serial por medio de USB, tiene ciertas configuraciones que se hacen previo a su uso, pero es sencilla de utilizar. Los pasos para la utilización de la librería Pyserial son:

- Determinar en qué puerto está conectado el dispositivo, lo cual se puede hacer de dos formas.
  - Manualmente: se debe buscar el administrador de dispositivos, luego ir a “puertos (COM y LPT)”, debe aparecer el dispositivo y a un lado el COM que se le fue asignado.

- Utilizar programación: se hace uso de la librería del sistema para obtener todos los puertos COM que están en uso.
- Ejecutar la conexión serial al puerto deseado con la sentencia “ser = serial.Serial (puerto COM, velocidad que se desee)”
- Leer el puerto usando “ser.read()” o “ser.readline()”.
- Cerrar el puerto con “ser.close()”.

Esta librería fue utilizada con el fin de permitir la comunicación serial entre la computadora y la Tiva C serie TM4C123GH6PM Launchpad, únicamente se recibe el valor actual del ADC, para graficar la señal en tiempo real y almacenar los datos del evento.

#### **4.3.3. Librería del sistema operativo**

En este caso se hizo uso de la librería sys, para lograr la detección de los puertos y generar un menú desplegable con todas las opciones posibles, para que el usuario elija el dispositivo por conectar.

Esta librería devuelve mucha información con respecto al intérprete de Python, como información del sistema, se pueden obtener resultados como:

- Lista de argumentos pasados por líneas de comandos
- Devolver la plataforma sobre la cual se está ejecutando el intérprete
- Detectar la versión de Python instalada en el sistema operativo
- Forzar la salida del intérprete
- Y muchas otras aplicaciones más

#### 4.3.4. Librería para conectar Python a PostgreSQL

Psycopg2 es la librería que se encarga de conectar la base de datos a Python, también se encarga de enviar sentencias de SQL para obtener información o ejecutar órdenes por medio de Python.

Esta librería se utilizó para guardar los eventos registrados en una base de datos, la cual cuenta con la hora de inicio, hora de finalización, fecha, suma de los datos recibidos y, por último, un valor aproximado de la escala en la que se encuentra la actividad sísmica.

Para la conexión con la base de datos y ejecución de sentencias, se deben realizar estos pasos:

- Hacer la conexión a la base de datos con la sentencia: `conn = psycopg2.connect(database, user, password, host)`.
- Crear un cursor para recorrer las filas y columnas de la tabla y ejecutar sentencias: `cur = conn.cursor()`.
- Se debe ejecutar sentencias con esta sintaxis: `cur.execute("SELECT * FROM nombre_tabla;")`.
- Guardar en una variable los datos obtenidos de la consulta: `búsqueda = cur.fetchall()`.
- Confirmar la consulta: `con.commit()`.
- Cerrar el cursor: `cur.close()`.
- Terminar la conexión: `con.close()`.

Un paso muy importante es confirmar la consulta, porque sin ese paso no se guarda ninguna información ni se puede concluir la consulta.



#### 4.3.5. Librería time para Python

Se utiliza para obtener fecha, día, hora, segundos o cualquier unidad de tiempo, se puede configurar para desplegar diferentes formatos para la presentación de tiempo. Lo que se debe hacer es ejecutar una única línea de código, “ahora = time.strftime("%d/%m/%y")”, la cual devuelve la fecha en el formato utilizado en Guatemala que es, día/mes/año. La tabla VI, muestra distintos formatos.

Tabla VI. **Formatos de tiempo en Python**

Símbolo	Descripción
%a	Nombre del día de la semana abreviado
%A	Nombre del día completo
%b	Nombre abreviado del mes
%B	Nombre completo del mes
%c	Fecha y hora actual
%d	Día del mes
%H	Hora en formato de 24 horas
%I	Hora en formato de 12 horas
%j	Día del año
%m	Mes en número
%M	Minutos
%p	Devuelve si es por la mañana o noche (AM o PM)
%s	Segundos
%U	Número de semana del año
%w	Número del día de la semana
%x	Fecha actual
%X	Hora actual
%y	Número del año representado por dos dígitos
%Y	Número de año representado con cuatro dígitos
%Z	Zona horaria

Fuente: *Mi diario Python*. <http://www.pythondiario.com/2014/05/obtener-fecha-y-hora-actual-en-python.html>. Consulta: 23 de julio 2019.

#### 4.3.6. Matplotlib para gráficas

Para graficar en Python existen diferentes librerías, pero se eligió esta debido a su facilidad de uso, existe mucha documentación para esta librería y sobre todo es muy fácil de instalar.

Se pueden realizar muchos estilos de gráficas y se pueden hacer variaciones en escala, colores, puede agregarse el tipo de gráfica y muchas otras facilidades, ayudando a obtener una buena representación del fenómeno estudiado.

Matplotlib es muy utilizado para los análisis estadísticos, puede insertarse varias funciones en la misma gráfica y hacer muchas adaptaciones, por lo que es una herramienta versátil.

La librería se puede utilizar con pyplot o pylab, en este caso se hizo uso de pyplot combinado con el formato interactivo para que se ejecute cada vez que hay un nuevo dato en la variable serial. Se gráfica con el comando “Plot(función, color y trazo)”, hay varios símbolos para definir el color y el trazo de las líneas, se presentan ejemplos en la tabla VII y VIII.

Tabla VII. **Símbolos para colores de gráficas**

Símbolo	Color
b	Azul
g	Verde
r	Rojo
c	Cian
m	Magenta
y	Amarillo

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Símbolos para trazos en gráficas**

Símbolo	Trazo
--	Línea a trazos
-	Línea continua
O	Círculo relleno
:	Línea punteada
*	Símbolo de estrella
+	Símbolo de suma
<	Triángulo hacia la izquierda
>	Triángulo hacia la derecha

Fuente: elaboración propia.



## **5. DISEÑO FINAL Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO**

A continuación, se presentan las pruebas de funcionamiento y calibración del sismógrafo, se describe el funcionamiento y se documentan mediciones realizadas en un ambiente controlado.

### **5.1. Funcionamiento de la interfaz gráfica y forma de uso**

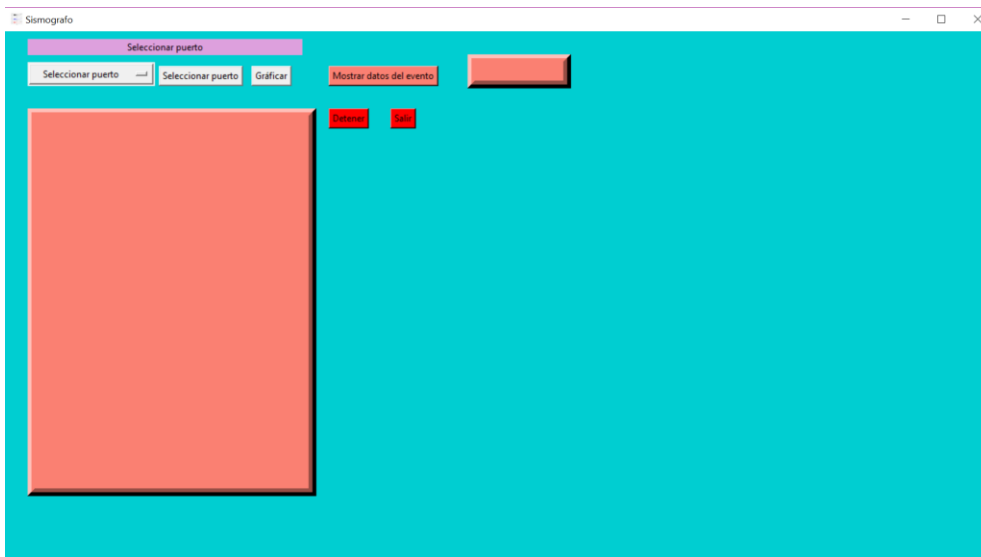
En la figura 44 se muestra la vista final de la ventana para el sismógrafo, cuenta con 7 funciones principales, las cuales son:

- Una lista desplegable en la cual se pueden observar todos los puertos COM en uso.
- Un botón para la selección del puerto deseado.
- Botón de inicio para graficar los puntos recibidos por medio del puerto seleccionado.
- Se puede detener la ejecución del programa, con el botón “Detener”, lo cual hace que se cierre la ventana del gráfico y se borre cualquier dato del recuadro de información.
- El botón de salir, sirve únicamente para terminar todos los procesos y cerrar la ventana.

- Con el botón mostrar datos del evento, se crea una lista con todos los eventos de la base de datos, con el fin de que se pueda seleccionar alguno y se despliegue información al respecto.
- La última función es el recuadro rosa pequeño que se muestra en la pantalla el cual posee el dato de que grado es el sismo.

Los colores elegidos son preferencia personal, pero puede elegirse cualquier color muy fácilmente, debido a la sencillez en la programación utilizando Tkinter de Python, cuenta con una amplia gama de colores y se pueden cambiar visualizando la paleta de colores de la librería.

Figura 45. **Interfaz gráfica**

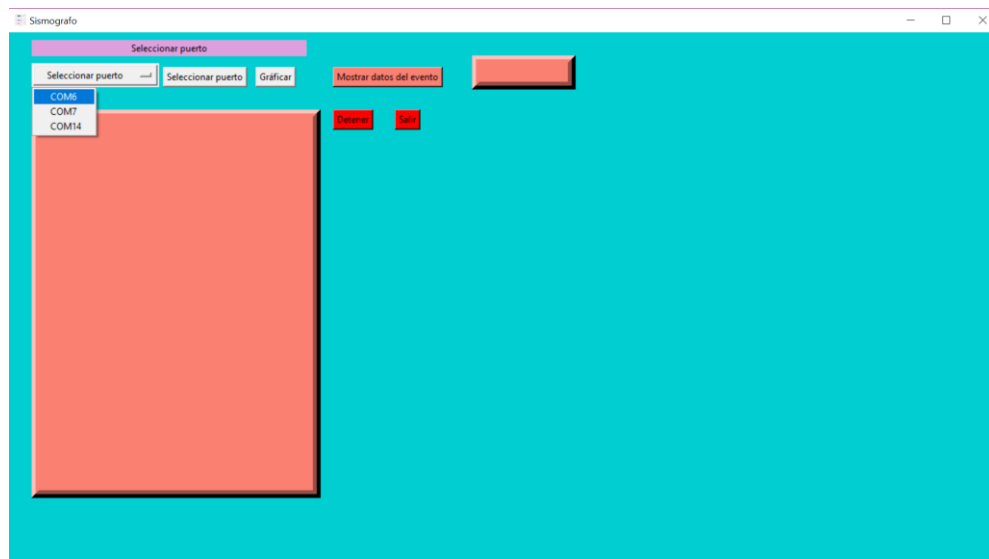


Fuente: elaboración propia utilizando Python.

### 5.1.1. Selección del puerto

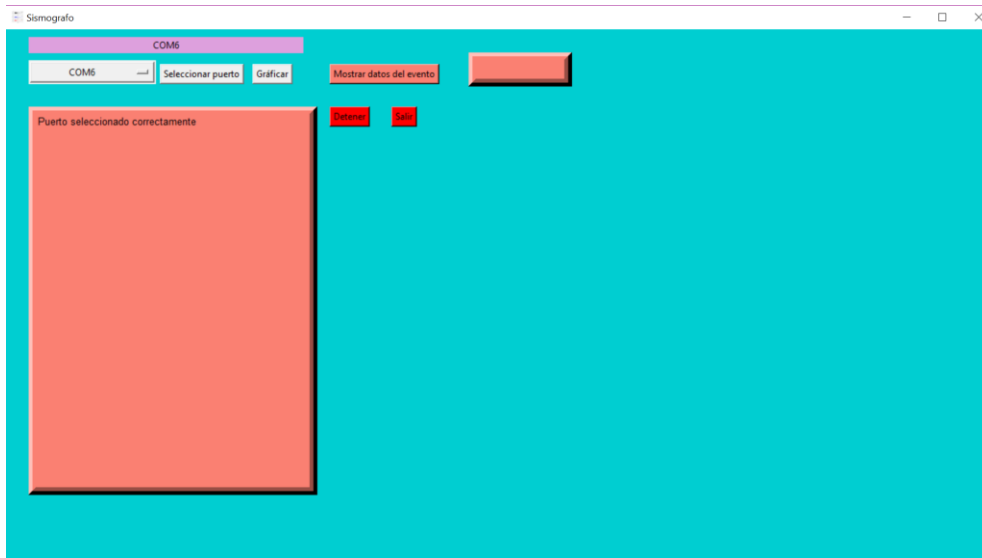
La figura 45, muestra cómo se despliega la lista con los COM que se están utilizando en el sistema, de los cuales se debe elegir el de la Tiva C series, que esté haciendo el envío de datos del sensor, luego debe elegir el botón de seleccionar puerto. En el recuadro rosa grande debe aparecer un mensaje de selección correcta del mismo, en la figura 46, se observa el mensaje en el encabezado rosa y en el recuadro.

Figura 46. Selección de puerto



Fuente: elaboración propia utilizando Python.

Figura 47. Selección de puerto correcto



Fuente: elaboración propia utilizando Python.

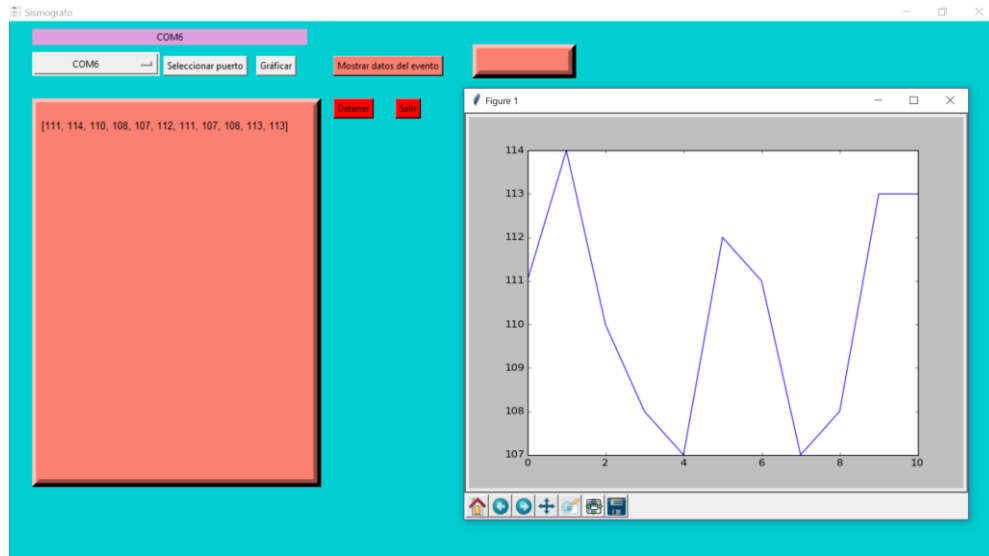
### 5.1.2. Gráficas de los datos recibidos

Después de seleccionar el puerto indicado y que se visualice el mensaje de su conexión correcta, se debe seleccionar el botón de “Graficar”, se abre una ventana que posee la gráfica en tiempo real del sensor, la cual realizará una secuencia de 30 iteraciones y luego comenzará otra secuencia para analizar una muestra diferente.

La secuencia principal de todo el programa es la gráfica, todos los demás eventos surgen en esa definición, se puede observar en la figura 47, la ejecución de la misma. En el recuadro rosado de dimensiones grandes se muestran los valores que se están obteniendo, al finalizar las 30 iteraciones se ejecutan todos los demás métodos.



Figura 48. **Gráfica del fenómeno**



Fuente: elaboración propia utilizando Python.

### 5.1.3. **Magnitud aproximada del sismo**

Al terminar las 30 iteraciones aparece el grado aproximado del sismo, el cual puede tener 9 valores distintos los cuales son:

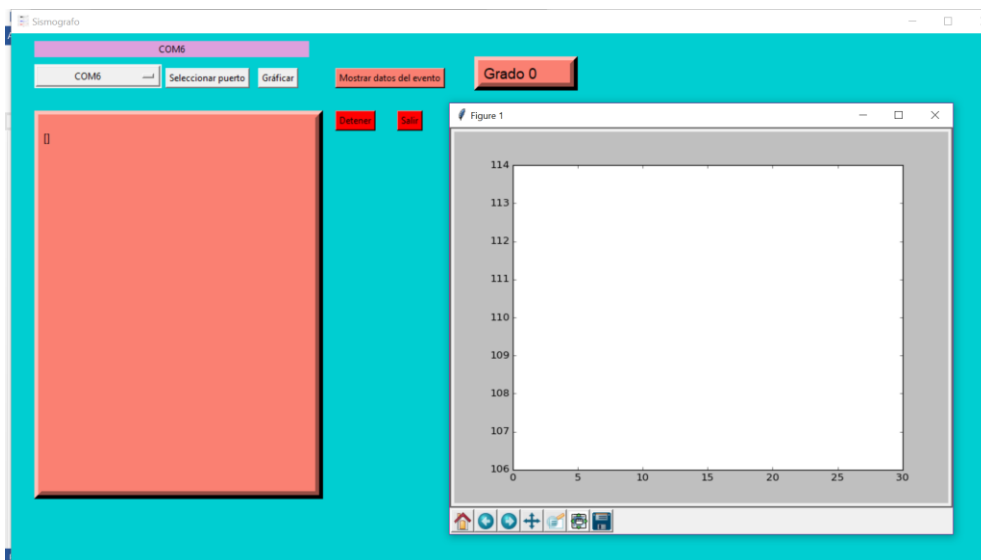
- Grado leve (0): el cual indica que no hay movimiento o es mínimo.
- Grado 3: indica que hay movimiento o alguna perturbación, pero es mínima.
- Grado 4: existe movimiento, pero no hay riesgo muy alto.
- Grado 5: el movimiento es un poco más fuerte pero no representa un daño grave.
- Grado 6: en este punto existe un pequeño riesgo para las edificaciones.
- Grado 7: este grado implica que el sismo es bastante fuerte y puede haber pérdidas tanto en infraestructura como de vidas.

- Grado 8, 9 y 10: es menos probable su aparición, pero estos grados serían catastróficos.

Luego de que aparece el grado en el recuadro rosa pequeño, la gráfica y todos los procesos se repiten, se verá que en el recuadro rosa grande vuelve a iniciarse la toma de datos para el siguiente evento y la gráfica se ejecuta con los valores que van apareciendo, en este punto puede elegirse el botón para detener y con ello se pueden visualizar los eventos guardados en la base de datos.

La calibración del sensor fue realizada con una aplicación para el teléfono, el cual devuelve un valor aproximado para el sismo según el movimiento que se realice, es por esta razón que no es tan sensible a movimientos muy pequeños, y el grado 0 engloba movimientos de grado 0, 1 y 2.

Figura 49. **Grado del sismo**



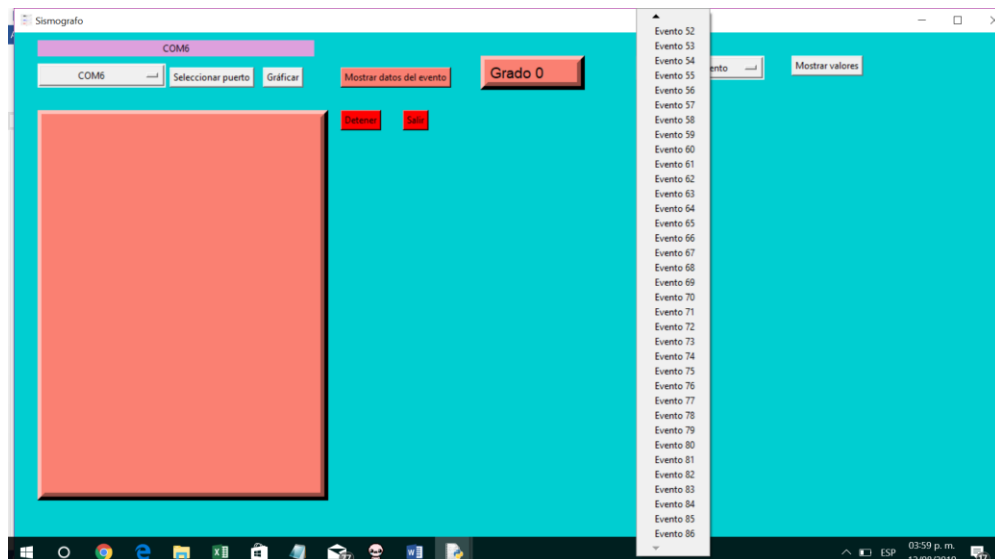
Fuente: elaboración propia utilizando Python.

#### 5.1.4. Base de datos y eventos almacenados

Cuando se terminan las 30 iteraciones, se realiza un algoritmo para determinar el grado del sismo y luego se guardan todos los datos utilizados, la fecha, hora de inicio y hora de finalización del evento, todos esos eventos pueden ser visualizados en la interfaz gráfica, seleccionando mostrar datos, luego se despliega un menú tipo lista con los eventos guardados, tal como se muestra en la figura 49.

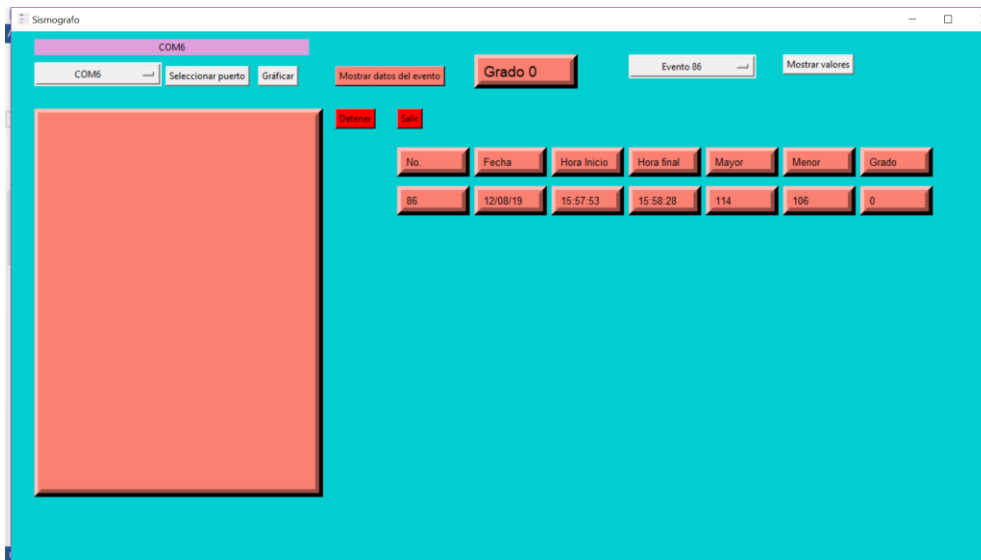
Después de que se selecciona un evento se despliega una tabla con la descripción del valor y los valores pertenecientes a cada evento, puede visualizarse la tabla únicamente después de haber seleccionado un evento, se puede observar la tabla en la figura 50.

Figura 50. **Mostrar datos de los eventos**



Fuente: elaboración propia utilizando Python.

Figura 51. **Tabla de un evento guardado**



Fuente: elaboración propia utilizando Python.

## 5.2. Sistema de alertas

Como alerta para evacuar o para tener un parámetro de qué tan grave es el sismo, se integró una bocina para emular una sirena, la cual varía su frecuencia dependiendo del grado detectado, esto se logró incorporando una multiplexación por ancho de pulso, también se integró una alerta visual utilizando un led RGB, se muestra un color diferente para cada grado, los colores asignados por grados son:

- Blanco: para un grado leve o nulo.
- Amarillo: se colocó para un grado 3.
- Verde: es para grado 4.
- Azul: se utilizó para indicar un grado 5.
- Morado: indicativo de un grado 6.

- Rojo: es para todos los grados del 7 al 10, para indicar que es altamente peligroso.

Al terminar el algoritmo que calcula el grado del sismo, se envía directamente a la Tiva C series, la cual se encarga de activar todo el sistema de alertas terminando así con todos los procesos y reiniciándolos cada 30 iteraciones.

### **5.3. Calibraciones realizadas**

La señal del sensor fue calibrada para determinar una magnitud perteneciente a una vibración, todo basado en la amplificación que se obtuvo y el voltaje promedio de la señal. Se aplicaron varias pruebas para determinar un patrón para cada magnitud y obtener una escala de medición aproximada.

Los métodos utilizados en este dispositivo son:

- Suma de todos los valores censados.
- Desviación estándar de los valores obtenidos.
- Determinación el punto máximo y mínimo de la señal, para luego realizar una resta entre ambos.

#### **5.3.1. Suma de los valores**

La suma de todos los valores que se encontraban en la memoria no representaba correctamente la magnitud del sismo, por esta razón no se logró encontrar un patrón o un parámetro para diferenciar entre cada grado deseado.

### 5.3.2. Desviación estándar

El valor de la desviación debería aumentar si los puntos están más lejanos y disminuir si las muestras tomadas se encuentran más cercanas entre sí, por este motivo se decidió implementarlo, pero tampoco se encontró un patrón entre los resultados obtenidos.

### 5.3.3. Punto máximo y mínimo de la señal

El último método utilizado fue el determinar el punto máximo y mínimo de la señal, luego se procedió a restar ambos valores, con lo cual se obtuvo un patrón muy marcado y se logró tener una magnitud aproximada del sismo.

En la tabla IX, se presenta algunos datos con los que se realizó la calibración del dispositivo.

Tabla IX. **Datos de calibración**

Magnitud	Máximo más frecuente	Mínimo más frecuente	Resta
Leve o 0	115	104	11
3	116	102	14
4	122	95	27
5	129	57	72
6	154	34	120
7	176	20	156

Fuente: elaboración propia.

Se tomaron muchas mediciones para obtener los patrones que se muestran en la tabla IX, son los valores que más se repitieron, sin embargo, se

dejó un margen de valores en los cuales puede tener esa misma magnitud, los rangos se presentan en la tabla X.

Tabla X. **Rangos utilizados**

Magnitud	Rango
Leve o 0	0-13
3	14-16
4	17-40
5	41-80
6	81-130
7	131-190

Fuente: elaboración propia.

#### **5.4. Montaje final del dispositivo**

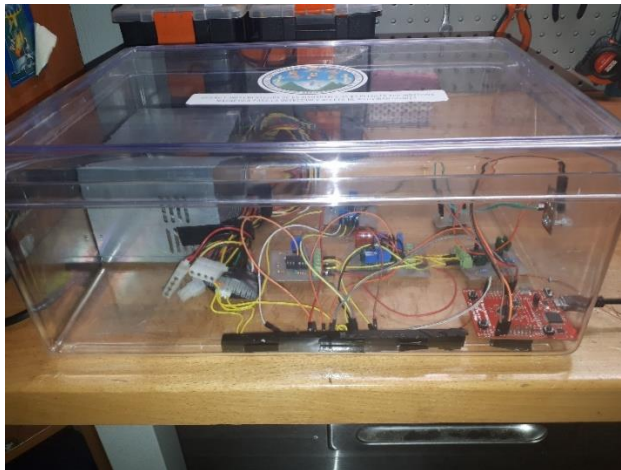
Todas las placas y partes del sismógrafo se colocaron dentro de una caja transparente, lo único que permanece fuera es el sensor debido a que será el único que se mueva o se entierre. En las figuras 51, 52 y 53 se presenta la vista final del dispositivo.

Figura 52. **Módulo principal**



Fuente: elaboración propia.

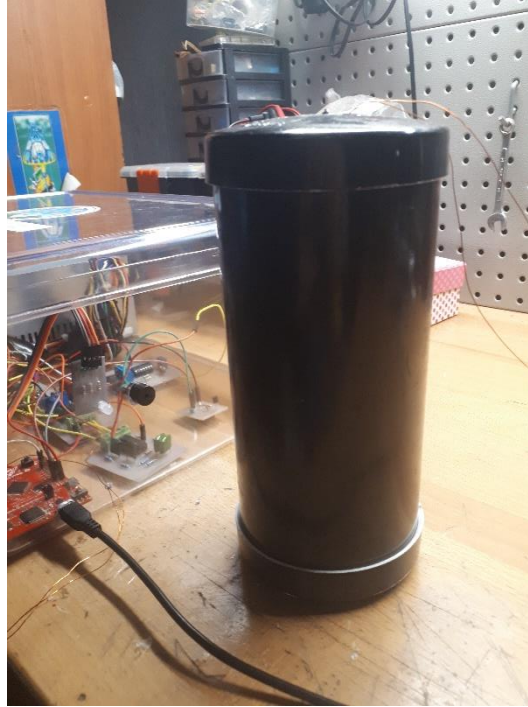
Figura 53. **Módulo principal vista lateral**



Fuente: elaboración propia.



Figura 54. **Geófono electromagnético**



Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. Se expusieron los conceptos fundamentales de la actividad sísmica y sus métodos de medición, determinando que la mejor opción es la escala sismológica de magnitud de momento.
2. Con el desarrollo de la teoría de los componentes electrónicos, se determinó que el geófono por inducción magnética es el más económico, dado que todas sus partes son accesibles y facilitan su elaboración.
3. Los módulos diseñados cumplen con los requerimientos necesarios para la obtención de la señal, la eliminación de ruido y el procesamiento de la señal.
4. El envío de la señal se hizo por medio de una conexión de puerto serial con comunicación bidireccional entre el microcontrolador y la computadora, con los datos recibidos se elaboró una interfaz gráfica capaz de seleccionar el puerto, graficar los datos en tiempo real, mostrar eventos, visualizar una magnitud aproximada del sismo y almacenar información de los eventos.
5. La calibración del sensor fue realizada en un ambiente controlado haciendo uso de una aplicación para celular, las pruebas se documentaron y almacenaron en la base de datos.



## RECOMENDACIONES

1. Experimentar con diferentes resortes e imanes para la disminución del tamaño del sensor y buscar la combinación ideal para mejorar la sensibilidad del dispositivo.
2. Construir una mesa sísmica para mejorar la calibración del sensor, debido a que el sector privado no permite el uso de sus equipos para calibrar y la Universidad de San Carlos de Guatemala no cuenta con el equipo necesario para la experimentación en vibraciones.
3. Verificar que la frecuencia del sistema eléctrico del país en el que se implemente el dispositivo sea 60 hercios o modificar el filtro que suprime las portadoras con esa frecuencia.
4. Buscar una colaboración para la mejora visual de la interfaz gráfica para que sea más amigable para el usuario.
5. Agregar más sensores para incrementar la exactitud de las mediciones y detectar el epicentro de la vibración o actividad sísmica.
6. Para no poseer perturbaciones del ambiente, se debe aislar el sensor, ya sea enterrándolo o haciendo pruebas en lugares controlados.
7. Debido a las variaciones de voltajes e interferencias de cada lugar, el dispositivo debe calibrarse nuevamente en el entorno de trabajo deseado o puede agregarse tierra física al sistema.

8. Trabajar de la mano con una persona experta en actividad sísmica, para obtener información respecto de patrones o fenómenos relacionados, como el efecto de locomotora antes de la erupción de un volcán.

## BIBLIOGRAFÍA

1. GÁLVEZ, Paul. *Tipos de ondas sísmicas* [en línea]. <<http://geofisicasismospgf.blogspot.com/p/ondas-p-y-ondas-s.html>>. [Consulta: 30 de enero de 2019].
2. Geografía. *Los movimientos sísmicos* [en línea]. <<https://lageografia.com/geografia-fisica/movimientos-sismicos>> [Consulta: 15 de enero de 2019].
3. GIL, Camila; MORENO, Yagio. *Geófonos como sensores* [en línea]. <<https://es.calameo.com/read/001847468580fbc640aa3>> [Consulta: 23 de enero de 2019].
4. Python Software Foundation. *Documentación de Python* [en línea]. <<https://docs.python.org/3.4/>>. [Consulta: 15 de junio de 2019].
5. SEDRA, Adel.; SMITH, Kenneth. *Circuitos microelectrónicos*. Cuarta edición. México: Oxford University Press, 1999. 1158 p..
6. Servicio Geológico Mexicano. *Escalas de los sismos* [en línea]. <[https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion\\_complementaria/Escalas-sismos.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html)>. [Consulta: 29 de enero de 2019].
7. Texas instruments. *Tiva TM4C123GH6PM Microcontroller, Data sheet*. Austin TX: Texas instruments, 2014. 1409 p.

8. \_\_\_\_\_. TivaWare Peripheral Driver Library. Austin TX: Texas instruments, 2013. 704 p.
9. TLELO DÍAZ, Gabriel. *Sismógrafo digital de movimiento trepidatorio*. Trabajo de graduación de licenciatura en ingeniería en comunicaciones y electrónica. Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacan, 1984. 86 p.
10. Universidad Nacional de Cuyo. *Formas de medir un sismo* [en línea]. <<http://www.unidiversidad.com.ar/cuales-son-las-formas-de-medir-un-terremoto>>. [Consulta: 23 de enero de 2019].