



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



**Gonzalo Javier Martínez Lazo**

# Miniaturización de un sismómetro de fuerzas balanceadas (FBA)

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 12 de marzo de 2019



# Miniaturización de un sismómetro de fuerzas balanceadas (FBA)

Gonzalo Javier Martínez Lazo

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,  
aprobada por la comisión de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Facultad de Ingeniería de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
conformada por

Sr. Sebastián Carlos Fingerhuth Massmann  
Profesor Guía

Sr. Héctor Renato Vargas Oyarzún  
Segundo Revisor

Sr. Jorge Mendoza Baeza  
Director de Escuela

Valparaíso, 12 de marzo de 2019

## Resumen

En este proyecto se presenta el desarrollo de un sensor sísmico, cuyo funcionamiento se basa en el utilizado por los acelerómetros de fuerzas balanceadas (FBA, Force Balance Accelerometer en inglés). El desarrollo consiste en el prototipaje de un dispositivo capaz de medir y registrar las vibraciones en una dirección, provocadas por el movimiento del suelo, sean estas provocadas por el movimiento de la corteza terrestre, o bien, por las vibraciones producidas en la estructura de un edificio o mesa vibratoria.

Se utiliza como base del diseño un FBA de dirección de sensibilidad vertical desarrollado anteriormente en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, el cual se migra a un diseño orientado a la sensibilidad triaxial. Para esto, se usa un tipo de arreglo simétrico de sensores, donde tres ejes, simétricos y ortogonales :  $U$ ,  $V$  y  $W$ ; son procesados para su traducción en los ejes cartesianos  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ . Este tipo de configuración es conocida como arreglo Galperin o Triaxial Simétrico.

Finalmente, se realiza la caracterización del dispositivo para la realización de su sistema de control, debido a que necesita de una realimentación para funcionar como un sistema de balance de fuerzas, un FBA. Este lazo de realimentación se desarrolla mediante un sensor capacitivo de placas paralelas, el cual mide el desplazamiento de una masa, que debe mantener una posición de referencia, lo que se conoce como un Sistema Inercial. Para mantener esta referencia, se utiliza un actuador electromecánico, que cierra un lazo de realimentación negativa.

Palabras claves: Sismómetro, vibraciones, FBA, realimentación, sistema inercial, arreglo Galperin.

# Abstract

This project presents the development of a seismic sensor, whose operation is based on that used by the force balance seismometers (FBA, for Force Balance Accelerometer). The development consists in the prototyping of a device capable of measuring and recording the vibrations caused by the movement of the ground, whether caused by the movement of the earth's crust, or by those produced in the structure of a building or shaking table.

A vertical sensing direction FBA, previously developed at the School of Electrical Engineering, is used as the basis of the design, which is migrated to a tri-axial sensitivity oriented design. A type of symmetric arrangement is used as base, where three symmetrical and orthogonal axes:  $U$ ,  $V$  and  $W$ , are processed for translation into well-known Cartesian  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  axes. This type of configuration is known as the Galperin or Symmetric Tri-axial arrangement.

Finally, the characterization of the device for the realization of its control system is performed because it needs a feedback to work as a force balance system, an FBA. This feedback loop is developed by a parallel plate capacitive sensor measuring the displacement of a mass, which must maintain a reference position, this is known as an Inertial System. To maintain this reference, an electromechanical actuator is used, which closes a negative feedback loop.

Key words: Seismometer, vibrations, FBA, feedback loop, inertial system, Galperin arrangement.

# Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	3
1 Sismología y el movimiento de la corteza terrestre .....	4
1.1 Movimiento de las placas tectónicas y sus consecuencias .....	6
1.1.1 Ondas que se propagan por la tierra.....	8
1.1.2 Consideraciones de magnitud y frecuencia en sismología .....	9
1.1.3 Sismómetro y sismograma .....	11
1.2 Estado del arte de los sismómetros de fuerzas balanceadas.....	11
1.2.1 Sismómetro de Sean Thomas Morrisey.....	12
1.2.2 Sismómetro de Brett M. Nordgren.....	12
2 FBA desarrollado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica.....	14
2.1 Sistema mecánico .....	14
2.2 Diseño del sismómetro.....	17
2.3 Sensor de desplazamiento en el FBA .....	18
2.3.1 Capacitancia del sensor .....	18
2.4 Actuador de fuerza en el FBA .....	20
2.5 Sistema de adquisición de datos .....	22
2.5.1 Tarjeta de adquisición de datos .....	22
3 Sensores triaxiales simétricos.....	24
3.1 Principios de los sensores inerciales .....	25
3.2 Elementos esenciales del eje de banda ancha.....	26
3.3 La configuración Galperin de sensores.....	27
4 Descripción y diseño de sensores capacitivos.....	31
4.1 Carga eléctrica, campos y potenciales .....	31
4.2 Capacitancia.....	33
4.2.1 Constante dieléctrica .....	35
4.3 Sensores capacitivos de desplazamiento.....	37
4.4 Sensor capacitivo del FBA triaxial.....	38

---

5 Descripción y diseño de actuadores electromecánicos .....	40
5.1 Magnetismo y Electromagnetismo .....	40
5.1.1 Fuerza de Lorenz .....	41
5.2 Actuador electromecánico del FBA triaxial .....	41
5.3 Simulaciones por medio de elementos finitos .....	46
6 Diseño de sistema mecánico para aplicación de arreglo Galperin .....	49
6.1 Diseño general en 3D.....	49
6.1.1 Sistema de pivoteo y ajuste de resorte “Leaf-Spring” .....	50
6.1.2 Sistema de ajuste de centro de masa .....	52
6.1.3 Sistema de soporte de actuador electromecánico.....	53
6.1.4 Sistema de soporte de sensor capacitivo.....	54
6.2 Montaje del dispositivo. ....	55
7 Pruebas de funcionamiento y análisis de resultados.....	57
7.1 Descripción de las pruebas realizadas .....	57
7.2 Prueba de funcionamiento del sensor .....	58
7.3 Prueba de funcionamiento al amplificador AD706. ....	59
7.4 Prueba de funcionamiento a INAS LT1010 y LT1013.....	59
7.5 Prueba a frecuencia de muestreo alta. ....	60
Discusión y conclusiones.....	62
Bibliografía .....	64

# Introducción

La sismología en Chile es un tópico de interés en la investigación debido a la alta recurrencia de sismos que este país presenta. La razón de esto es principalmente geográfica, y es que Chile se encuentra ubicado en la juntura de dos placas tectónicas: La Placa de Nazca y la Placa Sudamericana, cuya interacción genera las ondas de movimiento que se estudian en la sismología. Los registros de las catástrofes naturales generadas en la zona por estas dos singularidades terrestres se han registrado oficialmente desde el año 1575, por los conquistadores españoles [1].

El término “Alerta temprana de terremoto”, está bien descrito en [2] y se refiere a los sistemas de información en tiempo real que proporcionan una advertencia sobre el movimiento significativo de la tierra. Los dispositivos encargados de realizar estas mediciones se denominan sismómetros, los cuales varían su diseño dependiendo del funcionamiento en que se basan.

Actualmente existen sensores diseñados para medir las vibraciones del suelo, ya sea para fines asociados a la sismología, como para el control vibratorio de estructuras y edificios, cuyo precio suele no ser accesible para fines demostrativos, como puede ser requerido en aulas de universidades que deseen educar bajo el principio de funcionamiento de estos dispositivos. Es por esto que la idea de desarrollar dispositivos de bajo costo, se ha manifestado en la comunidad de ingenieros de distintas áreas [3].

En ingeniería, el aplicar sistemas de control automático es una herramienta fundamental para el desarrollo de prototipos de dispositivos con una respuesta estable. Dentro de la sismología, el uso de acelerómetros de fuerza balanceada (FBA) para medir los desplazamientos de la superficie terrestre es el mejor ejemplo del control automático asociado a la ingeniería aplicada a esta ciencia. Como ya se ha mencionado, equipos tipo FBA existen, pero de muy alto costo, por lo que se ha desarrollado previamente en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso un prototipo, de bajo costo, y con fines pedagógicos, de un FBA. Esta herramienta, construida y controlada gracias al trabajo de tres alumnos memoristas ([4], [5] y [6]) que consiste en un sistema masa-resorte-amortiguador, mide desplazamientos verticales mediante un sensor capacitivo y tiene su lazo de control con la realimentación negativa de un actuador electromecánico (bobina-imán). El hito de este dispositivo es que ha logrado imitar en una medida aceptable la respuesta de un dispositivo profesional existente en el mercado; pero posee los contras de tener un diseño rústico, sin dimensiones muy claras y su limitante a un solo

eje. Es por esto que en esta oportunidad se desea lograr el desarrollo de una versión que optimice el diseño y, que además trabaje para medir de manera tanto vertical, como en ambas componentes horizontales: norte, este y vertical (o bien  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ).

En el mundo de los sensores sísmicos existen dos tipos básicos: los sensores inerciales y medidores de tensión o extensómetros. Los primeros se encargan de medir el movimiento del suelo con respecto a una referencia inercial, como una masa suspendida. Los segundos se encargan de medir el movimiento de un punto con respecto a otro. Los sensores inerciales generalmente son más sensibles a señales sísmicas.

Los sensores inerciales actualmente convierten un movimiento terrestre en una señal eléctrica, pero sus propiedades no dependen de un simple factor de escalamiento, como volts por milímetro de movimiento de la tierra. Su respuesta no depende sólo de la magnitud, sino que también de la escala de tiempo del movimiento, es decir, qué tan repentino es éste. Esto se debe a que la masa en suspensión debe mantenerse en su posición mediante la ayuda de una fuerza restauradora mecánica o electromagnética, como un amortiguador o un actuador electromecánico. En otras palabras, bajo realimentación, el factor de escalamiento de la lectura del dispositivo dependerá de la frecuencia del movimiento.

En el mundo de los sensores existe el sensor directo, que es aquel que puede convertir una señal no eléctrica en una señal de salida que sí lo sea de manera “directa” sin necesidad de un transductor (sólo amplificación y acondicionamiento de señal), y los sensores capacitivos pueden ser una gran ayuda al momento de realizar mediciones pequeñas de desplazamiento, un pilar fundamental en los sensores sísmicos, ya que actúan como sensores directos, al detectar cómo varía alguna propiedad geométrica o física del capacitor (generalmente la separación de sus electrodos). En este tipo de sensores se suele utilizar como medio dieléctrico del capacitor al aire, ya que presentará una viscosidad despreciable para movimientos pequeños.

Dentro de los elementos fundamentales en un sensor sísmico de fuerzas balanceadas, se encuentra el amortiguamiento, generalmente realizado por un actuador electromecánico. Al igual que para el sensor, el diseño del actuador es base para el diseño final del dispositivo. Es por esto que es necesario estudiar la relación tamaño-desempeño del actuador con el mismo cuidado, siendo necesario un estudio exhaustivo de los principios que rodean a este tipo de implementación. En [7] se exponen los aspectos relativos al desarrollo y calibración de los sismómetros de fuerzas balanceadas.

Un actuador es un transductor que convierte una señal eléctrica en una magnitud física, es decir, cumple la función inversa de su contraparte, el sensor o detector, que convierte una magnitud física en una señal eléctrica, en volts o ampere. En particular, un actuador de fuerza convierte alguna perturbación de determinada intensidad en una fuerza que actúa sobre algún cuerpo. El actuador de fuerza puede ser de diversas naturalezas, existen actuadores neumáticos, hidráulicos, eléctricos y piezoeléctricos. En el caso de los actuadores eléctricos, se transforma una señal eléctrica en la acción de una fuerza mecánica, es por esto que generalmente se les llama actuadores electromecánicos. Una aplicación de estos actuadores es que estén construidos mediante la interacción de una bobina y un arreglo de imanes, el cual suele ser más conocido en

su uso para la construcción de altavoces, donde un actuador electromecánico se utiliza para hacer vibrar una membrana, generando variaciones de presión en el aire que pueden ser escuchadas por el oído humano.

Es de esperar que un dispositivo que mida el movimiento de la tierra, lo haga teniendo en cuenta tres ejes ortogonales, con su respectivo vector unitario, donde la representación de un vector se realiza mediante una combinación lineal de estos. Sin embargo, lograr la clásica representación en los ejes  $XYZ$  representa un desafío al momento de construir un sensor inercial, debido a que cada eje (vertical y horizontales) deberá ser construido y diseñado bajo ciertas consideraciones exclusivas para ese eje. Es por esto que suele ser utilizado en los sismómetros de tres ejes el arreglo Galperin, en honor a G. A. Gal'perin, quien creó un arreglo de sensores de tres ejes, donde estos son ortogonales entre sí y cuyas direcciones de sensibilidad están a  $54.7^\circ$  del eje vertical y  $35.3^\circ$  del plano horizontal. De esta forma se pueden representar, mediante una combinación lineal de estos ejes y sus respectivos vectores unitarios, los ejes coordenados tradicionales, con la ventaja de que los tres sensores de este arreglo deben ser diseñados bajo las mismas consideraciones, pues se trata de un arreglo simétrico.

La etapa del diseño dentro de la miniaturización de dispositivos es una de las más importantes, ya que implica seleccionar el material adecuado bajo el diseño que optimice de alguna manera las dimensiones del dispositivo, manteniendo un buen rendimiento en las mediciones, además de utilizar de manera eficiente los materiales dispuestos para su construcción.

El diseño de dispositivos en la actualidad se ha visto facilitado para las distintas ramas de la ingeniería, dada la existencia de software dispuestos para el modelado en 3D. Sin embargo, la optimización de un diseño es una tarea para la que existe especialización, lo cual, es otra razón por la que el desarrollo de sensores es un proceso multidisciplinario.

## **Objetivos generales**

- Desarrollar el Prototipo de un sismómetro de fuerza balanceada, teniendo en consideración el proyecto desarrollado por F. Vega [4].
- Utilizar herramientas de software para optimizar el diseño del sismómetro.
- Conducir el diseño para lograr mediciones tri-axiales.

# 1 Sismología y el movimiento de la corteza terrestre

Para el estudio de las vibraciones terrestres existen los geófonos y los sistemas de fuerzas balanceadas. El valor agregado de estos últimos tipos de sistemas es un mayor rango de medición y una mejora en la linealidad de esta.

En [8] se describe que el principal objetivo en el diseño de un sismómetro es “traducir un leve movimiento de la tierra en uno más significativo y medible, pudiendo quedar en un determinado registro permanente y en condiciones de ser medido y analizado”. En este documento citado se describe el funcionamiento del sismómetro de Lehman. De un universo de posibilidades de construcción, Lehman selecciona el diseño “cantiléver” (del inglés: viga voladiza), y puede observarse con detalle en la Figura 1-1. Este modelo consiste básicamente en una viga, un imán de herradura montado en este y una bobina de cable posicionada entre los polos del imán. Cuando un movimiento de la tierra ocurre, el movimiento entre el imán y la bobina generan una corriente que luego es amplificada y registrada por un “strip-chart”, como el que se puede observar en la Figura 1-2, donde el resorte que se muestra y la fuerza aplicada estarían representando la corriente amplificada por el sistema. De esta manera, un leve movimiento de la tierra se vería representado por un registro de movimiento significativo en la aguja del strip-chart. El movimiento general del sistema es de tipo pendular horizontal, alrededor de una posición de reposo. Si se permite el movimiento, lo que indicaría el sismógrafo solo sería el balanceo natural del sistema, perdiéndose la información que entrega el balanceo de la tierra.

Es por esto que es necesario el desarrollo de un sistema de fuerzas balanceadas, donde el factor más importante se encuentra en el amortiguamiento. El diseño de Lehman integra el amortiguamiento mediante una pieza de aluminio montada en el otro extremo de la viga que se balancea a través de un campo magnético. El movimiento genera corrientes en el aluminio que a su vez generan campos magnéticos propios. Los campos magnéticos inducidos por el movimiento se oponen al movimiento adicional de la viga, que pronto deja de balancearse. Esto permite que el sistema sea sensible a frecuencias inferiores a la frecuencia natural de balanceo del sistema sin amortiguamiento, la cual suele estar alejada de la banda asociada a las mediciones deseadas para un sensor sísmico.

En resumen, un sistema de fuerzas balanceadas es capaz de soportar establemente un balanceo u oscilación natural, mediante el amortiguamiento. Es por esto que para este trabajo se han considerado sistemas de masa-resorte-amortiguador, que son los que pueden llegar a ser más económicos y profesionales en su construcción.

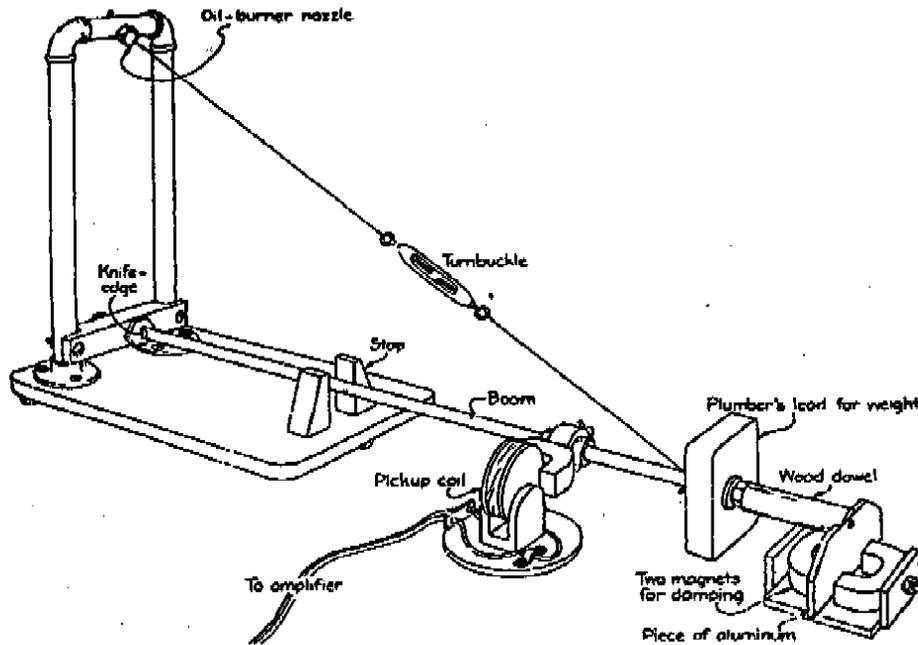


Figura 1-1: Diseño del sismómetro Lehman [fuente: [www.infiltec.com](http://www.infiltec.com)]

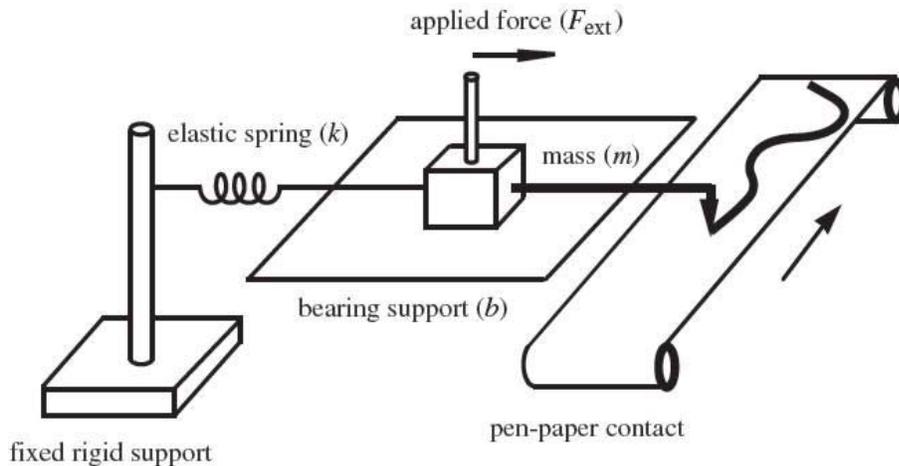


Figura 1-2: Diagrama de un strip-chart [fuente: <https://www.engr.colostate.edu>]

Antes de entrar detalle con los FBA, que son utilizados en este proyecto como sistema de medición de sismos, es necesario describir el fenómeno estudiado en sí. En este capítulo se describen aspectos generales de la sismología, el estado del arte de los sismógrafos, y una descripción del

proyecto realizado previamente en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y sus principios de funcionamiento.

## 1.1 Movimiento de las placas tectónicas y sus consecuencias

La tierra está en constante movimiento, algo que no es trivial, debido a que la percepción humana funciona de forma adaptativa y se encarga de eliminar la información innecesaria. Es por esto que sólo son perceptibles las perturbaciones en el entorno que son significativas con respecto a este movimiento constante. A estas perturbaciones generalmente las se les llama de manera coloquial temblores, pero en sí a todo movimiento terrestre perceptible por el ser humano se le denomina Terremoto.

El planeta interiormente está constituido por placas tectónicas, las cuales, desde la creación, sea cual sea la creencia al respecto, han sido las causantes de las variaciones geográficas presentes. Se dice que una prueba irrefutable de esto último, es lo que está ocurriendo en Kenia, una grieta que se abre y pareciese que está dejando al continente africano dividido [9]. Se puede observar el impacto de este caso en la Figura 1-3. Las placas tectónicas de la Tierra están constantemente en movimiento. A medida que estas placas se mueven, pueden deslizarse una al lado de la otra, colisionar entre sí formando cadenas montañosas como el Himalaya, o separarse una de la otra, que es lo que está sucediendo en el este de África. A medida que la placa somalí se separa lentamente de la placa de Nubia, la corteza terrestre se vuelve más delgada. A pesar de que este proceso es lento, con el tiempo la corteza se vuelve demasiado delgada y se rompe, creando un valle de grietas. Este es el primer paso en el proceso de ruptura continental. La Figura 1-4 muestra los límites de estas placas en el este de África y resalta dónde se está dividiendo África, lo que ilustra dónde se puede formar una nueva cuenca oceánica. Si bien las generaciones actuales no estarán vivas para ver eso, podrán ser testigos de algunas de las etapas iniciales.



Figura 1-3: Impacto de la grieta que se abre en Kenia (fuente: <http://temblor.net>)

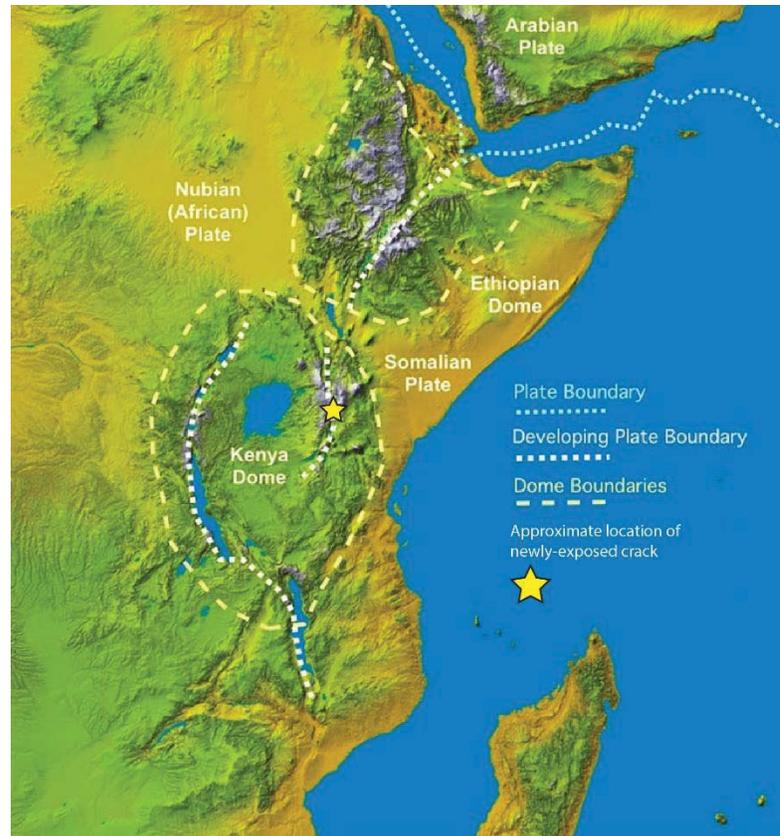


Figura 1-4: Geografía y fronteras de las placas ubicadas en el territorio afectado por la grieta (fuente: NASA)

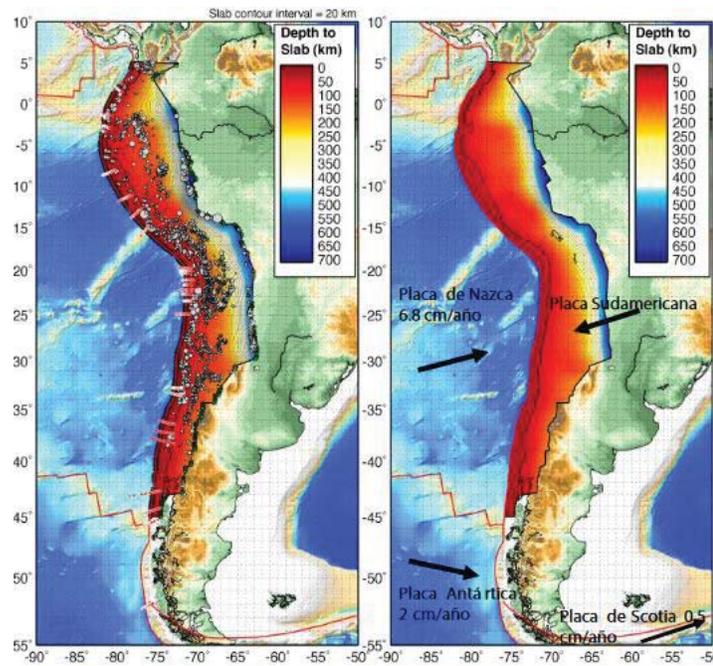


Figura 1-5: Marco tectónico de Chile (fuente: <http://www.csn.uchile.cl>)

En el caso de los sismos, la causante es el deslizamiento y acomodación generado entre placas colindantes. En el territorio nacional, las placas culpables de los recurrentes terremotos ocurridos a lo largo de la historia, y que han aumentado durante las últimas décadas, son la placa de Nazca y la placa Sudamericana, principalmente. Aunque en Chile en realidad actúan cuatro placas, agregándose a estas dos la placa de Scotia y la placa Antártica, como se puede observar en la Figura 1-5. Una extensa explicación de la ruptura de casi 1000 kilómetros, ocurrida en el terremoto de 1960 en Valdivia, el más grande conocido en la historia nacional, y sus eventos predecesores, se expone en [1]. Y un listado con algunos de los sismos más importantes de la historia nacional se expone en [10]. Además, en [11] se muestra un listado con los sismos más recientes ocurridos a nivel nacional.

### **1.1.1 Ondas que se propagan por la tierra**

La propagación de ondas por la corteza terrestre se puede dividir en dos puntos de foco, las ondas que se propagan por el interior de la tierra se denominan ondas P y S (Primarias y Secundarias), por otro lado, las ondas que viajan por la superficie de la tierra son llamadas L y R (Love y Rayleigh). En la Figura 1-6 se puede observar esta diferencia de forma gráfica, es necesario considerar que en el caso de las ondas primaria y secundaria las deformaciones ocurren al interior de la tierra, y en el caso Rayleigh y Love, estas ocurren a nivel de la superficie.

Las ondas P consisten en que el material por el que viajan es altamente comprimido y dilatado. La vibración se produce en el sentido de avance de la onda, son las más rápidas y este tipo de ondas pueden viajar a través de materiales sólidos y líquidos. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material. Las velocidades típicas son 330 m/s en el aire, 1450 m/s en el agua y cerca de 5000 m/s en el granito.

Las ondas S son más lentas que las ondas primarias, la vibración se produce en el sentido perpendicular a la propagación de la onda, por lo que realizan esfuerzo de corte. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es alrededor de 58% la de una onda P para cualquier material sólido. Usualmente la onda S tiene mayor amplitud que la P y se siente más fuerte que ésta.

Las ondas L se originan en la interface de dos medios con propiedades mecánicas diferentes, o conocido como un medio estratificado y con un movimiento de las partículas que es perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación, similar a las ondas S, pero solo ocurre en el plano de la superficie terrestre, polarizada de manera horizontal. Esta característica de medio estratificado es la más común en el planeta pues se encuentra formado por capas de diferentes características físicas y químicas. La amplitud decrece rápidamente con la profundidad.

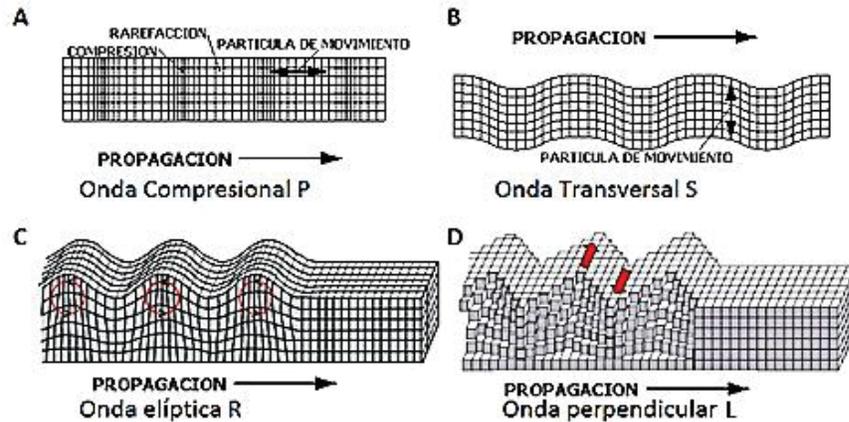


Figura 1-6: tipos de ondas sísmicas y su forma de propagación (fuente: <https://www.lpi.tel.uva.es>)

Las ondas R se forman cuando un sólido posee una superficie libre, como la de la tierra, viajando a lo largo de esta. Son de baja frecuencia y gran longitud de onda. Estas ondas tienen su máxima amplitud en la superficie libre, la cual decrece exponencialmente con la profundidad. La trayectoria que describen las partículas del medio al propagarse la onda es elíptica retrógrada y ocurre en el plano de propagación de la onda.

### 1.1.2 Consideraciones de magnitud y frecuencia en sismología

Para cuantificar la magnitud de un sismo se utiliza la escala Richter o escala de magnitud local  $M_L$ , que es una escala logarítmica que asigna un número a la energía que libera un terremoto. Para calcular la magnitud se utiliza la amplitud máxima en milímetros y la diferencia de tiempo entre la llegada de la onda P y la onda S, valores obtenidos directamente de un sismograma. La sismología usa esta escala para determinar la magnitud de sismos entre 2 a 6,9 y 0 a 400 km de profundidad.

La escala Richter para una magnitud mayor o igual a 7 no es correcta, por lo que para este rango de magnitud se utiliza la escala sismológica de magnitud de momento  $M_w$ , la cual coincide y continúa con los parámetros de la escala de Richter. En la Tabla 1-1 se pueden observar eventos comparativos a estas magnitudes.

Estas son las magnitudes que suelen utilizarse en los informes sismológicos, pero también existen escalas como la de magnitud de ondas superficiales ( $M_s$ ) y magnitud de ondas internas ( $m_b$ ). En [12] se realiza una descripción de estas y otras magnitudes. En la Figura 1-7 se enseñan los diferentes rangos de representación adecuados con respecto a  $M_w$ .

Tabla 1-1: Sismos y magnitud  $M_L$  o  $M_w$ 

Magnitud Local $M_L$	Magnitud de Momento $M_w$	Evento
2.0		Explosión de un tanque de gas Butano
4.0		Bomba atómica de baja potencia
6.9		Terremoto en Costa Rica año 2009
	8.8	Terremoto en Chile año 2010
	9.0	Terremoto en Japón Año 2011

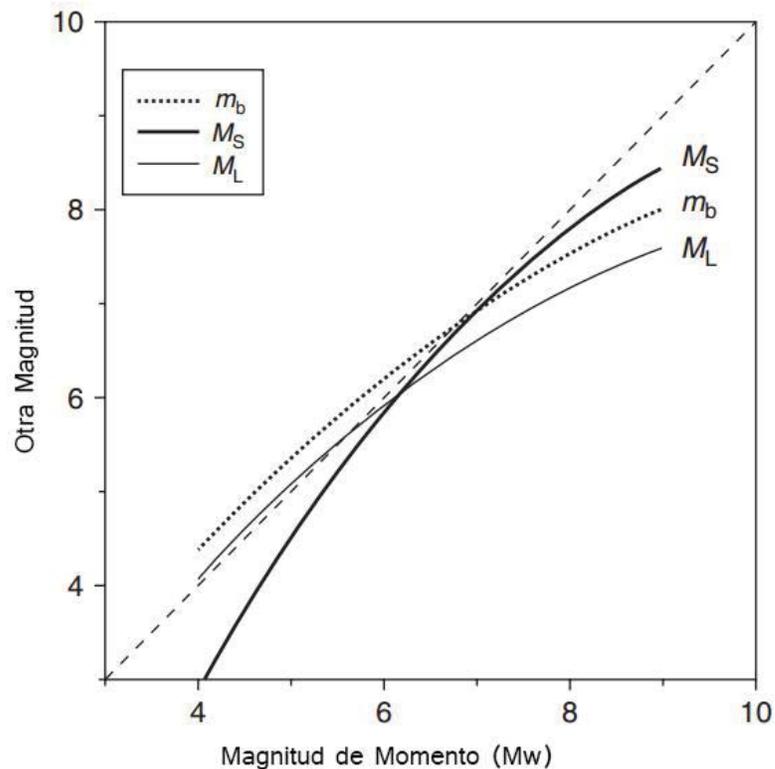


Figura 1-7: Representación adecuada de diferentes magnitudes en relación a la Magnitud de Momento ( $M_w$ ) [fuente: <http://www.csn.uchile.cl>]

Los sismos tienen muchas fuentes de origen posibles y cada una de ellas tiene sus propias características en cuanto a frecuencia y amplitud. La Tabla 1-2 muestra los eventos de interés y sus frecuencias asociadas. La fuente de interés para el caso, son los sismos cuya banda de frecuencia van desde los 0,0001 a 1000 Hz y desplazamientos de 0,1nm a 10m.

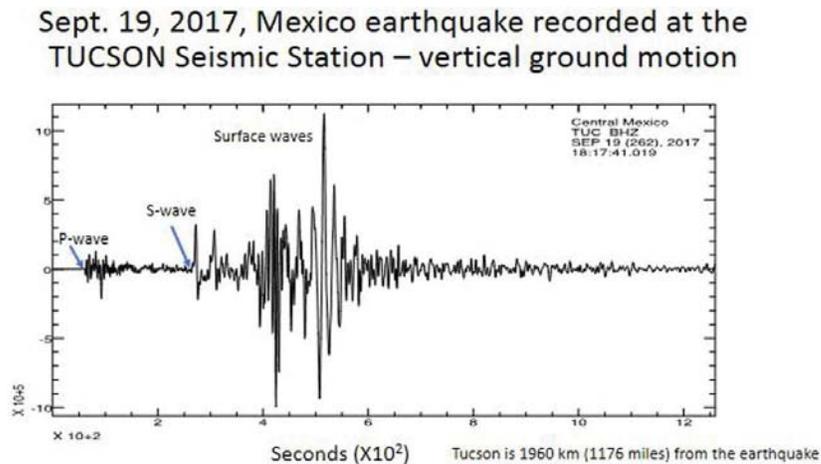
Para realizar mediciones de calidad adecuada en estaciones de monitoreo tanto locales como globales, las mediciones idealmente deben cubrir al menos una banda de frecuencia de 0,01 a 100 Hz y amplitudes de 1 nm a 10 mm.

Tabla 1-2: Niveles de frecuencias para distintos eventos de interés en la sismología

Frecuencia (Hz)	Fuente
0.00001 – 0.0001	Mareas en la costa
0.0001 – 0.001	Oscilaciones libres de la tierra, sismos
0.001 – 0.01	Ondas superficiales, sismos
0.01 – 0.1	Ondas superficiales, P y S, sismos de magnitud >6
0.1 – 10	Ondas P y S, sismos de magnitud >2
10 – 100	Ondas P y S, sismos de magnitud <2

### 1.1.3 Sismómetro y sismograma

Es importante resaltar la diferencia entre estos dos conceptos. Un sismómetro o sismógrafo se puede definir como una caja negra, donde la entrada es el movimiento de la tierra, y la salida es la señal que condiciona al sismograma. Esta definición se ha aceptado en proyectos previos ([4] y [5]). Un sismograma es un registro donde se observan las mediciones del movimiento de la tierra llevadas a cabo por el sismómetro, cuyas líneas de mayor o menor amplitud señalan la intensidad del de movimiento. En caso de un sismo, como se mencionó anteriormente las ondas que se propagan más rápido son las ondas P, por lo que son las primeras en ser registradas en el sismograma, ver Figura 1-8.

Figura 1-8: Sismograma de un terremoto real [fuente: <https://www.univision.com>]

## 1.2 Estado del arte de los sismómetros de fuerzas balanceadas.

Un sismómetro es una caja negra donde la variable de entrada es el movimiento de la corteza terrestre; y la variable de salida es una señal que representa este movimiento. Como dispositivo, funciona como transductor, pero además de adquirir datos, un dispositivo que sea de fuerzas balanceadas, es necesario que actúe en base a estos datos adquiridos. Hoy en día un sismómetro

profesional se puede comprar por millones de pesos chilenos, debido a su precisión y materiales usados para su construcción, pero sabiendo el principio de funcionamiento de fuerzas balanceadas se puede construir un prototipo de bajo costo con materiales más accesibles y con una precisión aceptable. Es por esto que ya existen varios tipos de sismómetros hechos por ingenieros en la búsqueda de realizar mediciones en tiempo real [8]. A continuación, se describen algunos trabajos de renombre en el área del desarrollo de sismógrafos que servirán de referencia, junto con los trabajos [4], [5] y [6], para el desarrollo del dispositivo miniaturizado que el alumno desea implementar.

### 1.2.1 Sismómetro de Sean Thomas Morrisey

Este sismómetro es del tipo vertical con suspensión leaf-spring, el cual fue construido con materiales que se pueden encontrar en ferreterías y tiendas de electrónica. El desarrollo un sismómetro de ancho de banda capaz de medir sismos con frecuencias entre los 0.01 a 30 (Hz). Las magnitudes de estos sismos se encuentran en el orden de los 5.5 grados en la escala Richter o superiores. Su prototipo se muestra en la Figura 1-9.



Figura 1-9: Sismómetro de S. T. Morrisey (fuente: <http://www.eas.slu.edu>)

### 1.2.2 Sismómetro de Brett M. Nordgren

Con un equipo de ingenieros eléctricos, mecánicos y civiles, Nordgren logra construir de una forma más profesional varios prototipos de sismómetros, entre los cuales los más importantes son los del tipo vertical de fuerza balanceadas de banda ancha. Esto sismómetros logra medir magnitudes entre los 0.02 a 30 (Hz). El primero de estos lo llamó “Inyo” y lo utilizó para medir movimientos telúricos en la ciudad de California. El segundo lo bautizó como “Yuma” y lo utilizó en la ciudad de New Jersey. Ambos prototipos son capaces de medir movimientos terrestres en el eje vertical y se pueden apreciar en la Figura 1-10.

Otro proyecto interesante de Nordgren, debido a su reducido tamaño, se puede ver con detalle en [13], se ilustra en la Figura 1-11, y se conoce como Napa Force-Balance Vertical Seismometer.



Figura 1-10: “Inyo” y “Yuma” respectivamente (fuente: <http://bnordgren.org/seismo>)

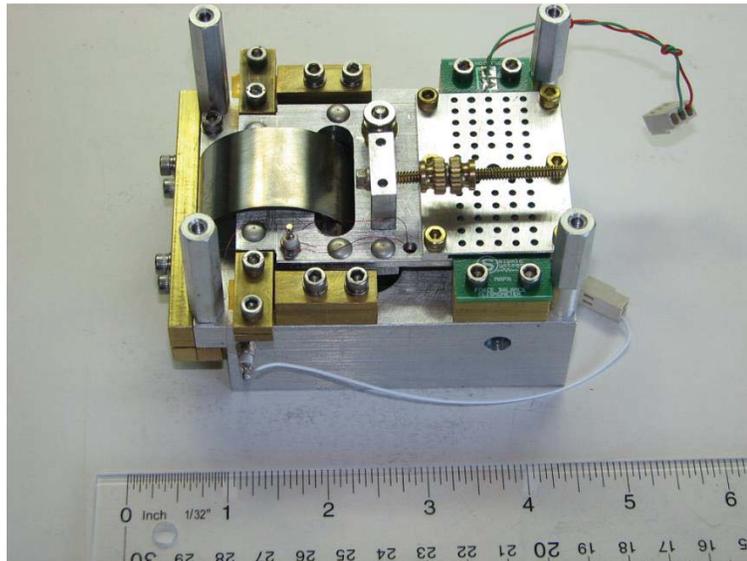


Figura 1-11: Sismómetro Napa de Nordgren (Fuente: <http://bnordgren.org/seismo>)

## 2 FBA desarrollado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica

En este capítulo se describe el funcionamiento general del sismómetro vertical desarrollado por F. Vega [4]. Se presenta su funcionamiento mecánico, su sensor capacitivo y actuador electromecánico, así como una breve explicación del sistema de adquisición de datos utilizado.

### 2.1 Sistema mecánico

El sistema mecánico cumple un papel importante en el sismómetro FBA, ya que está en contacto con la variable cinemática a medir. La particularidad del sistema mecánico masa-resorte-amortiguador es que su respuesta en frecuencia es plana para la aceleración a las frecuencias bajo la frecuencia natural. Este hecho es el que permite medir la aceleración linealmente a bajas frecuencias [14].

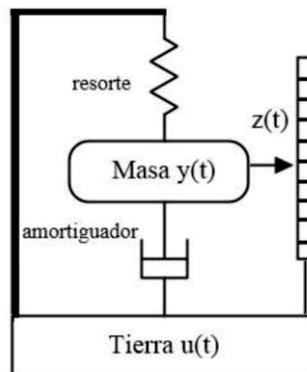


Figura 2-1 Sismómetro mecánico inercial.

El movimiento de la tierra no se puede medir directamente con un sismómetro, debido a que éste se movería junto con ella, por lo que es necesario tener un punto de referencia para realizar las mediciones. Una solución a este problema nace del principio de inercia, el cual consiste en que todos los cuerpos tienen una resistencia a cambiar su estado de movimiento uniforme o reposo, a no ser que fuerzas externas actúen sobre él. Utilizando este principio se creó el sismómetro

mecánico inercial y actualmente la mayoría de los sensores sísmicos se basan en la inercia de una masa suspendida desde un resorte.

En la Figura 2-1 se puede observar un sistema simplificado de un sismómetro mecánico inercial, donde el desplazamiento de la tierra producto de las ondas sísmicas, puede ser obtenido directamente del desplazamiento relativo entre la masa y la tierra, el cual se representa en el esquema como una regla, pero puede implementarse de la forma que el diseñador del sensor estime conveniente, ya sea por costo o nivel de sensibilidad. Si la tierra se mueve hacia arriba impulsivamente, la masa, producto de la elasticidad del resorte y la viscosidad del amortiguador, se moverá relativamente hacia abajo (manteniendo su inercia) con respecto a la regla, lo cual corresponde a un cambio de fase de  $180^\circ$  en la medición del desplazamiento de la tierra. La amplitud del desplazamiento sería la misma, por lo que se presenta una ganancia (relativamente) unitaria.

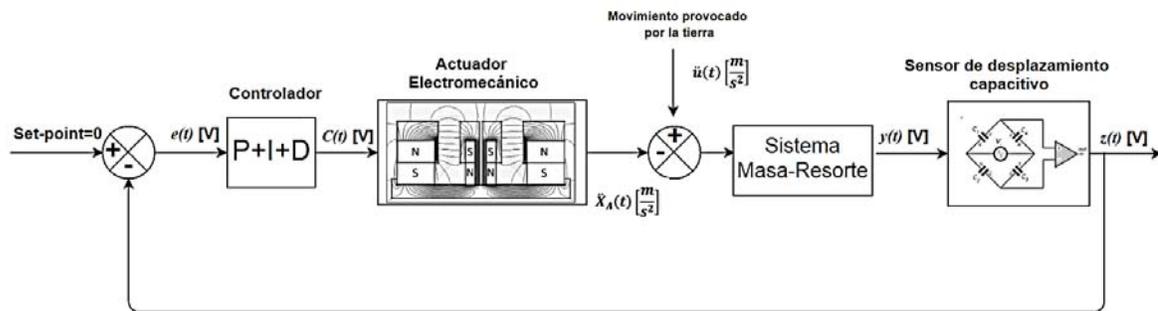


Figura 2-2 Diagrama general del sismómetro FBA.

En el caso del FBA, generalmente se utiliza un sensor de desplazamiento capacitivo, es decir, dos o más placas paralelas dispuestas en el sistema de tal forma que entreguen información sobre el movimiento generado. Además, el amortiguamiento se realiza mediante un actuador electromecánico trabajando en una realimentación negativa. En la Figura 2-2 se muestra un diagrama general de cómo se generarían en un FBA las señales  $u(t)$ ,  $y(t)$  y  $z(t)$  de la Figura 2-1 en un lazo realimentado bajo control automático. Notar que en este caso la señal  $z(t)$ , que corresponde a la lectura de la regla en la Figura 2-1, corresponde a un voltaje entregado por el sensor capacitivo (transductor) de la Figura 2-2, valor que debe ser procesado para entregar la información correspondiente a la lectura; la señal  $u(t)$  corresponde de igual manera al movimiento de la tierra, y actúa como perturbación al acelerar el sismómetro; por otra parte, el amortiguamiento en este caso no actúa de forma pasiva, sino que gracias a la acción del actuador electromecánico, cuya señal de entrada actúa mediante la realimentación para mantener la masa inmóvil con respecto al sismómetro, o dicho de otra manera, lograr que  $y(t)$  siga a  $u(t)$ .

Cabe destacar que al existir una referencia que es cero, lo cual se indica en la Figura 2-2 como "Set-point", el diagrama se puede reducir al indicado en la Figura 2-3 donde  $\alpha$  representa la ganancia del actuador electromecánico, mientras que  $\beta$  representa la ganancia del detector. Además, el sismómetro se representa mediante su función de transferencia, que se puede explicar con su ecuación de movimiento.

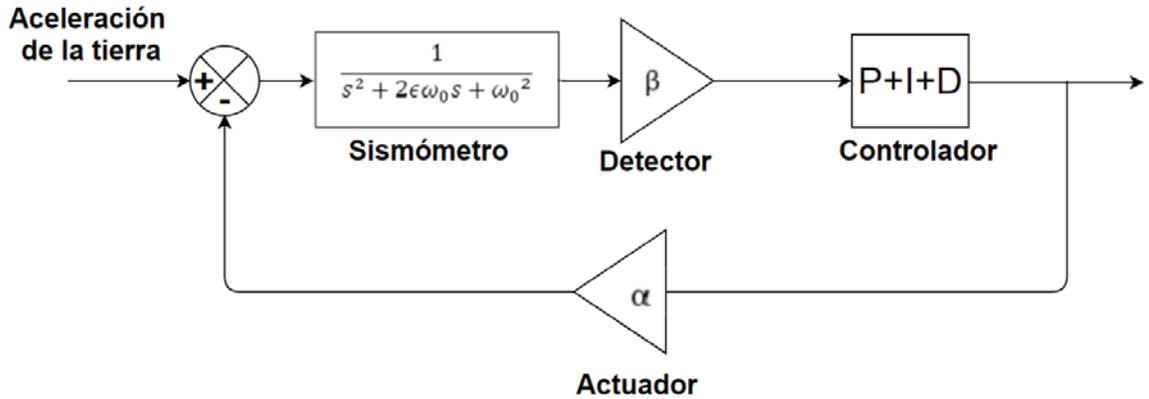


Figura 2-3 Sismómetro FBA lazo cerrado. [15]

La ecuación de movimiento del sistema, considerando la constante elástica  $k$  del resorte, el coeficiente de amortiguamiento  $d$  y la masa  $m$  que se estudia en estado inercial, es la siguiente:

$$-kz - d\dot{z} = m\ddot{z} + m\ddot{u} \quad (2-1)$$

Ordenando los términos de la ecuación (2-1) se tiene:

$$\ddot{z} + \frac{d}{m}\dot{z} + \frac{k}{m}z = -\ddot{u} \quad (2-2)$$

La frecuencia de resonancia del sistema es:

$$\omega_0 = \frac{k}{m} \quad (2-3)$$

Y asumiendo como el factor de amortiguamiento del sismómetro:

$$\epsilon = \frac{d}{2m\omega_0} \quad (2-4)$$

Reemplazando la ecuación (2-3) y (2-4) en la ecuación (2-2), la ecuación de movimiento para el sismómetro es:

$$\ddot{z} + 2\epsilon\omega_0\dot{z} + \omega_0^2z = -\ddot{u} \quad (2-5)$$

De esta ecuación se pueden deducir dos importantes características, la primera es que para movimientos rápidos, es decir, altas frecuencias, la aceleración será mayor en comparación con la velocidad y el desplazamiento, por lo que el término  $\ddot{z}$  dominará, es decir, para  $\omega \gg \omega_0$ , la ecuación (2-5) puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\ddot{z} \approx -\ddot{u} \quad (2-6)$$

Esta aproximación muestra que la aceleración de la masa es muy parecida a la aceleración de la tierra con una diferencia de fase de  $180^\circ$ . En este caso, ya que los movimientos son similares, el sismómetro medirá desplazamiento.

La segunda característica es si la frecuencia es baja, el término  $z$  dominará sobre los otros términos. Para  $\omega \ll \omega_0$  la ecuación puede ser aproximada a:

$$\omega_0^2 z \approx -\ddot{u} \quad (2-7)$$

Y ordenando los términos de la ecuación (2-7) se obtiene:

$$z \approx -\frac{\ddot{u}}{\omega_0^2} \quad (2-8)$$

Por lo tanto, para bajas frecuencias, el desplazamiento relativo de la masa es directamente proporcional a menos la aceleración de la tierra e inversamente proporcional a la frecuencia natural del sensor al cuadrado. Este hecho indica que el sismómetro mide la aceleración linealmente a bajas frecuencias, lo cual es usado para la construcción de acelerómetros.

## 2.2 Diseño del sismómetro

Para el diseño del sismómetro vertical en [4], se usó el principio de un sismómetro tipo péndulo horizontal, cuyos elementos principales son el pivote y el brazo. Para contrarrestar la fuerza de gravedad y de cualquier otra fuerza sobre la masa, se utiliza una suspensión de tipo resorte de lámina. Para el diseño del pivote se utilizó el pivote de flexión cruzada el cual fue aplicado por Morrissey S. (Ver Sección 1.2.1) para un sismómetro vertical.

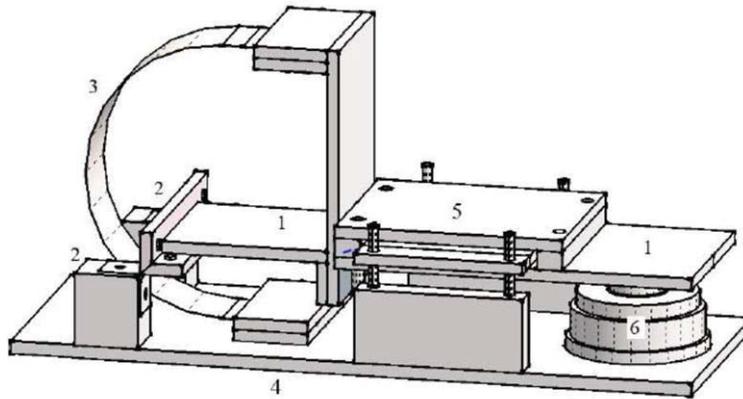


Figura 2-4: Esquemático del diseño creado por F. J. Vega

Para medir el movimiento del brazo (ver Figura 2-4), se utiliza un sensor de desplazamiento capacitivo, el cual está conformado por cuatro placas PCB; se utiliza un actuador electromecánico, que está conformado por imanes y una bobina, la cual va fija al brazo, mientras que los imanes se colocan de forma fija, de manera que el campo magnético que genera no afecte el desempeño del sismómetro. En la fabricación y unión del actuador con el brazo del sismómetro se consideran materiales no magnéticos. Los materiales utilizados se enumeran en la Tabla 2-1 y la construcción final del sistema se muestra en la Figura 2-5.

Tabla 2-1: Nombre de las partes del FBA

Número	Elemento correspondiente
1	Brazo
2	Pivote
3	Resorte de lámina
4	Marco de referencia
5	Sensor de desplazamiento
6	Actuador de fuerza
7	Centro de masa

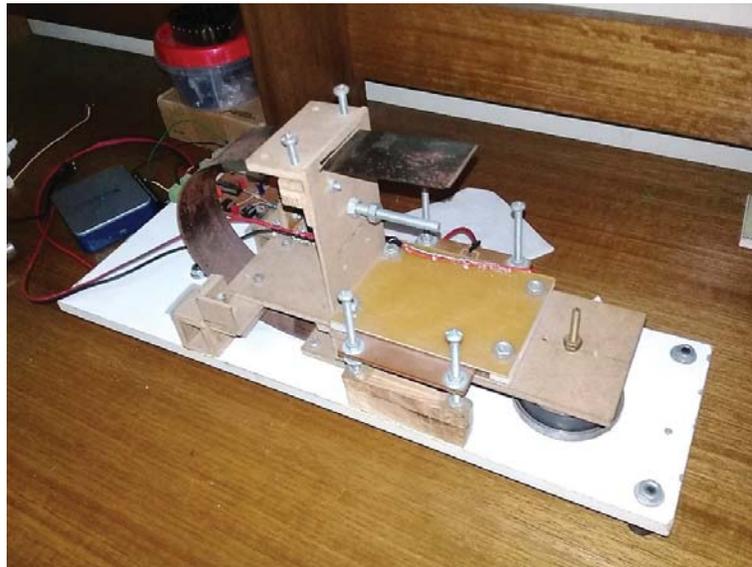


Figura 2-5: Estado actual del dispositivo construido en la Escuela de Ingeniería Eléctrica.

## 2.3 Sensor de desplazamiento en el FBA

En el FBA el sensor será el encargado de transformar la variación de distancia, respecto a un punto de equilibrio del sistema mecánico, en una variable de corriente o voltaje. El sensor a utilizar se basa en los pequeños cambios de capacitancia que se produce entre dos electrodos móviles relativos a un electrodo fijo, al variar la distancia entre ellos.

### 2.3.1 Capacitancia del sensor

La capacidad es una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada para un voltaje dado. Dos conductores separados por un aislante o vacío constituyen un capacitor, el cual también depende de la geometría por la cual está constituido (placas paralelas, cilíndrico, esférico).

Existen métodos para medir los cambios de capacitancias, entre los cuales está la modulación y demodulación por amplitud o por la transferencia de cargas. Para el caso del sismómetro de FBA se utiliza el método de transferencia de cargas. El circuito integrado LTC1043, es capaz de

distribuir la carga a través de dos interruptores capacitivos cuya conmutación es controlada por una frecuencia externa.

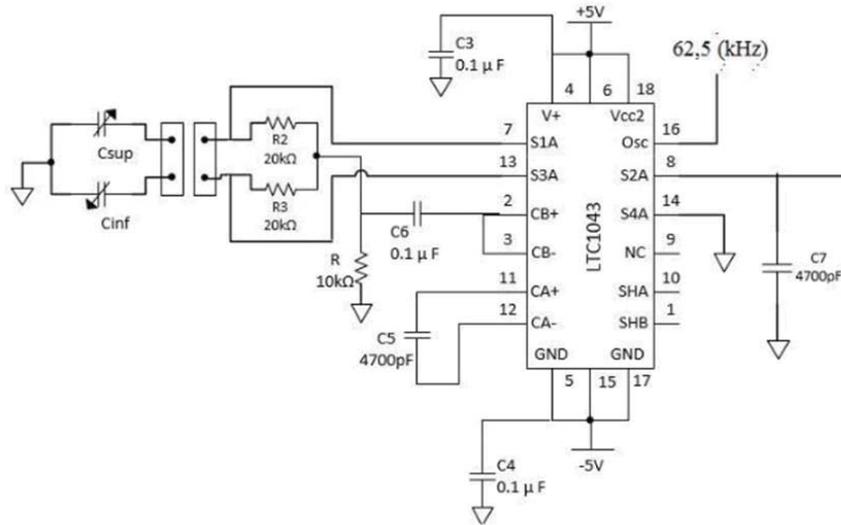


Figura 2-6: Circuito electrónico del sensor de desplazamiento

En la Figura 2-6 se ven representados los capacitores que se forman con las placas de PCB,  $C_{sup}$  para el capacitor que se forma en la placa superior y la intermedia, mientras que  $C_{inf}$  es el que se forma con la placa inferior e intermedia, junto con las resistencias  $R_2$  y  $R_3$  conforman el puente. Al puente se le suministra un voltaje de onda cuadrada de 5 V peak-to-peak con una frecuencia de 62,5 kHz a través del LTC1043.

Ante cualquier diferencia que presenten las capacitancias en el sensor, el circuito integrado LTC1043 entrega un voltaje, el cual se obtiene de la función de transferencia de puente, utilizando la ecuación (2-9), con una frecuencia de 62,5 kHz y una impedancia de 20 k $\Omega$ , el voltaje que entrega el sensor de desplazamiento  $V_{sd}$  es:

$$V_{sd} = 7,58 \cdot 10^9 \cdot (C_{sup} - C_{inf}) \quad (2-9)$$

De esta manera si se obtiene una variación de 1 pF en el sensor de desplazamiento, el voltaje que se obtendrá es 7,58 mV.

Ya que la capacitancia medida para la posición de equilibrio es de 50 pF y la distancia entre las placas es 1,084 mm, la variación de voltaje por una diferencia de un milímetro en el sensor de desplazamiento es 0,75 V/mm.

Para amplificar y filtrar la señal entregada por el circuito integrado LTC1043, se le agrega al circuito el amplificador operacional AD706, el cual presenta poco ruido, del orden de los 0,5  $\mu$ V peak-to-peak entre los 0,1 a 10 Hz.

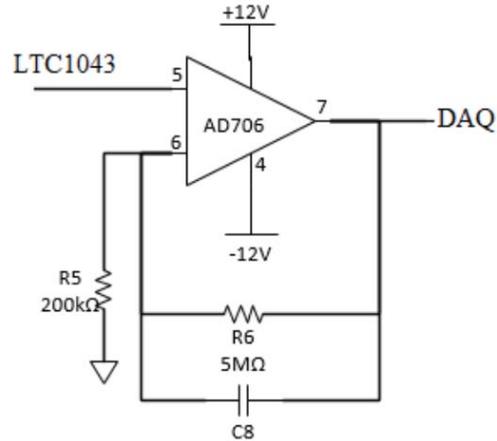


Figura 2-7: amplificador AD706

El amplificador operacional AD706, mediante la configuración presentada en la Figura 2-7, entrega una señal de salida correspondiente a 25 veces la señal de entrada y la frecuencia de corte es de 31 Hz. La frecuencia de corte se debe a que la banda de frecuencia para los sismómetros FBA pueden llegar a medir frecuencias hasta los 10 Hz, y llegan hasta los 30 Hz de ancho de banda. La señal amplificada y filtrada es llevada a la tarjeta de adquisición de datos DAQ.

De esta manera la señal de salida del sensor de desplazamiento capacitivo a través del amplificador operacional AD706 entrega un voltaje proporcional al desplazamiento igual a 18,13 V/mm.

## 2.4 Actuador de fuerza en el FBA

Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en otro tipo de energía con la finalidad de activar un elemento final de control como, por ejemplo, una válvula.

El principio del actuador de fuerza electromecánico es utilizado para generar una fuerza lineal controlada mediante un flujo de corriente. Esto permite al acelerómetro de fuerzas balanceadas, a través de su lazo de realimentación, mantener el equilibrio de fuerzas.

El actuador se basa en la fuerza de Lorentz, es decir, para que se cumpla este principio y el actuador realice una fuerza vertical lineal debe se deben cumplir dos condiciones: tener un campo magnético permanente radial y una corriente horizontal que fluya de manera perpendicular a través del campo magnético. Las líneas de campo, simuladas en el software FEMM en el trabajo realizado previamente en [4], se pueden apreciar en la Figura 2-8.

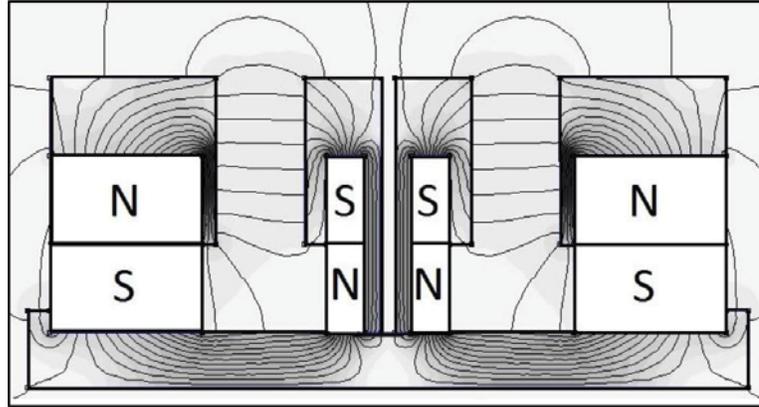


Figura 2-8 Líneas de campo deseadas en el actuador.

Para el actuador se utiliza un arreglo de imanes descrito en la Tabla 2-2, y una bobina de alambre esmaltado. En el sistema de fuerza balanceada, el actuador mecánico realiza la función de amortiguador, dentro del sistema masa-resorte-amortiguador.

Tabla 2-2: Imanes del actuador

Imán	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Espesor (mm)	Intensidad (T)	Magnetización
Neodimio N35	10	3	4	$28 \cdot 10^{-2}$	Axial
Cerámico	60	32	4	$8 \cdot 10^{-2}$	Axial

El campo magnético que se genera con el arreglo es radial, además concentra una mayor densidad de flujo magnético, que es donde se ubica el elemento por el cual circulara el flujo de corriente.

Para construir la unidad donde se enrollará el material conductor y así formar la bobina, se utiliza Technyl, un material no magnético y aislante eléctrico. Las características del material conductor, para el caso del cobre esmaltado se observa en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Características del material conductor

AWG	Resistencia ( $\Omega$ )	Vueltas	Inductancia (mH)
31	20.5	650	15

Otro punto importante a tomar en cuenta del actuador de fuerza es que debe manejar corrientes de amplitud elevada, debido a la aceleración máxima que el acelerómetro puede medir depende de cuanta fuerza de retroalimentación este puede generar, por lo que es necesario una manera de amplificar la corriente que entrega el circuito.

Para el amplificador de corriente ilustrado en la Figura 2-9, se utilizan dos amplificadores de instrumentación, el LT1013 en serie con el LT1010. El arreglo de los dos amplificadores está configurado como un inversor con ganancia unitaria.

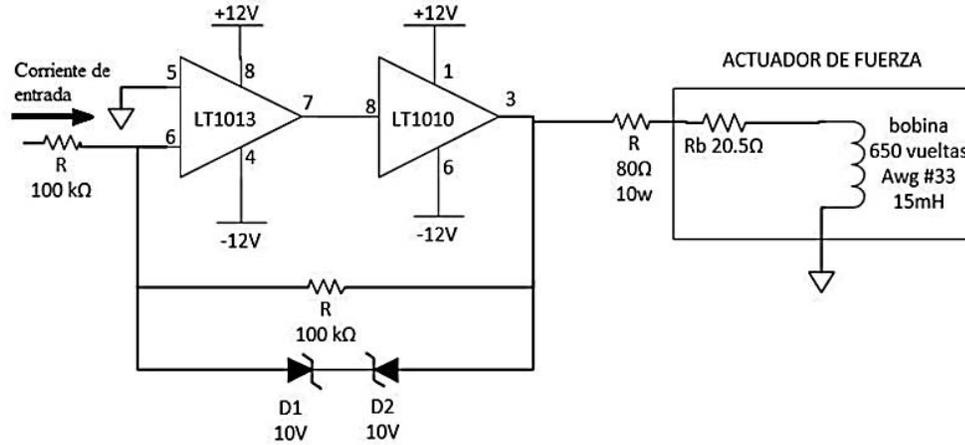


Figura 2-9: Amplificador de corriente.

## 2.5 Sistema de adquisición de datos

Se exponen a continuación los aspectos relevantes de la adquisición de los datos entregados por el sistema en la medición de las variables de interés.

### 2.5.1 Tarjeta de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos ayuda a cerrar el lazo de control del sismómetro FBA. Para esto se usa una tarjeta DAQ NI-USB 6002, la cual permitirá visualizar la señal amplificada por el AD706 y la señal de control que entra al amplificador LT1013, a través del software Labview.

La tarjeta de adquisición cuenta con ocho convertidores ADC y dos convertidores DAC, con la cual se realizará la lectura del sensor de desplazamiento y la escritura de la señal al actuador respectivamente. Las características del convertidor DAC se encuentran en la Tabla 2-4, mientras que las del ADC se encuentran en la Tabla 2-5.

Tabla 2-4: Salida analógica NI-USB 6002

Especificaciones salida analógica	Valor
Resolución	16 bits
Voltaje de salida	$\pm 10$ V
Corriente máxima	5 mA
Impedancia de salida	0.2 $\Omega$
Razón de escritura	5 kS/S

Tabla 2-5: Entrada análoga NI-USB 6002

Especificaciones de entrada análoga	Valor
Resolución	16 bits
Voltaje de entrada	$\pm 10$ V
Corriente máxima	5 mA
Impedancia de entrada	1 G $\Omega$
Muestras por segundo	50 kS/s

El sistema de adquisición de datos, y posterior entrega de energía para el funcionamiento del actuador, está controlado por el software de computadoras LabView. El detalle del funcionamiento y mejoras del algoritmo de control fueron realizados por Samuel Vargas [6] y no se entrará en detalle en este informe, debido a que no se utilizará directamente este controlador, pero se estudiará la forma de migrarlo a un sistema embebido mediante alguna otra técnica de manejo de la tarjeta de adquisición de datos.

## 3 Sensores triaxiales simétricos

Los instrumentos que miden movimientos de la corteza terrestre generalmente se diseñan de tal forma que se representen, en sus salidas, variaciones mutuamente ortogonales en la dirección Norte, Este y vertical (o bien llamados *XYZ* o ejes cartesianos por convención). Algunos son diseñados para responder a las direcciones de sensibilidad vertical (*Z*), ver Figura 3-1, y horizontales (*X* e *Y*), ver Figura 3-2, por separado. El problema con estos sistemas es que tanto los dispositivos sensibles a variaciones verticales tanto como horizontales deben diseñarse de manera distinta, por lo que su calibración y construcción se realiza de manera diferente, y cuesta algo de trabajo adicional lograr que sus respuestas sean similares (como se indica en [16], [17] y [14]). Otros sismómetros triaxiales son diseñados usando una configuración diferente conocida como arreglo Galperin, también conocido como diseño “triaxial simétrico” u “homogéneo”. En este arreglo, todos los sensores se encuentran inclinados con el mismo ángulo desde la horizontal, ver Figura 3-3, de forma de que se mantengan mutuamente ortogonales. [16]

El consenso logrado para la elevación de los sensores en arreglo Galperin es de  $35.26^\circ$  a la horizontal y de  $54.74^\circ$  a la vertical, con sus proyecciones simétricamente espaciadas en  $120^\circ$ . A veces en la literatura se refiere a esta configuración como la “Geometría  $54^\circ$ ” o “configuración simétrica”. Esta disposición, al ser ortogonal, da paso a una conversión directa, mediante una combinación lineal, de los ejes *XYZ* a los *UVW*, y viceversa. [17]

El primer sismómetro moderno de banda ancha basado en el arreglo Galperin fue el Streckeisen STS-2 (Figura 3-4) introducido en 1990. [16]

En este capítulo se abordarán los conceptos fundamentales de los sismómetros de fuerzas balanceadas que responden a variaciones tanto verticales como horizontales. Se describirá en detalle la física y matemática involucrada en el arreglo Galperin, así como sus implicancias ante perturbaciones causantes de ruido, como lo puede ser la temperatura o la presión atmosférica, razones por las cuales estos sismómetros suelen diseñarse dentro de alguna vasija de vacío.

En [17] se aborda el análisis de la respuesta de los sismómetros triaxiales simétricos ante perturbaciones complejas, como la inclinación de su base en algún eje de referencia (como los *XYZ* o *UVW* por separado). En este estudio se observan respuestas no lineales ante estos movimientos cuando el sistema no es de fuerzas balanceadas, debido a que la realimentación minimiza las desviaciones de los péndulos desde la posición de equilibrio.

Este capítulo se centra directamente en las direcciones de sensibilidad que se desea medir, como una forma de migrar el sismómetro de F. Vega [4] a un sismómetro triaxial de manera óptima. El análisis está basado principalmente en [16].

### 3.1 Principios de los sensores inerciales

Los sismómetros por definición usan una referencia inercial, esto es, que el movimiento es medido con respecto a una masa de prueba que está suspendida de tal forma que esta tiende a mantenerse estacionaria mientras que el sismómetro, que está acoplado a la tierra (o una estructura), se mueve con respecto a esta. La masa de prueba en la mayoría de los sensores se encuentra fijada a una plataforma pivoteada en un extremo, y mantenida en una posición de equilibrio por un resorte y algún amortiguamiento. Un sensor actúa como transductor de desplazamiento o velocidad y, gracias a una realimentación de fuerza generada por un actuador electromecánico, se intenta mantener la masa de prueba constantemente (lo cual no es exactamente cierto) en una posición fija. De acuerdo a su construcción, los sismómetros tendrán su dirección de sensibilidad ( $F_g$  en Figura 3-1 y Figura 3-2).

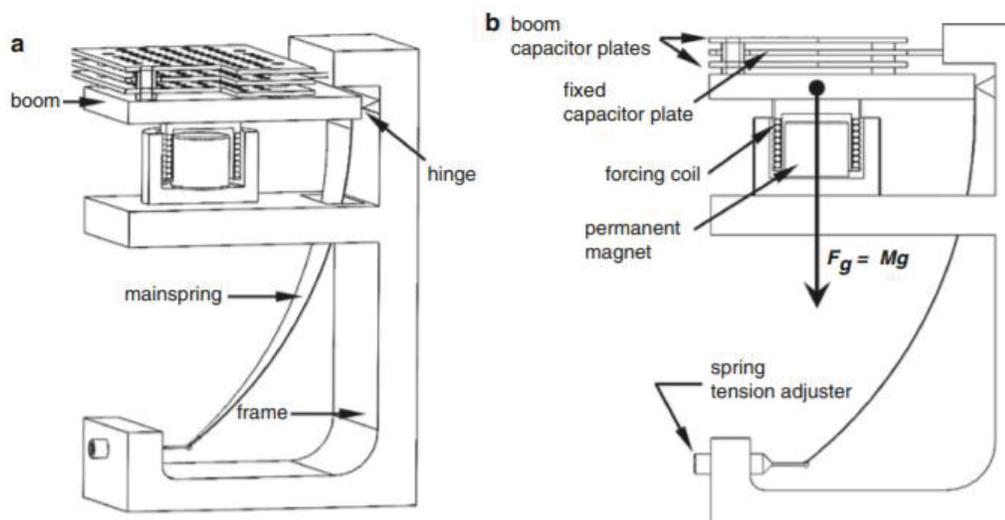


Figura 3-1 Sismómetro vertical de fuerzas balanceadas. (a) Vista en perspectiva. (b) Vista lateral [16]

La bobina del actuador debe aplicar en cada instante una fuerza relativa a exactamente la aceleración que está experimentando la masa para mantenerse estacionaria con respecto al sismómetro. La salida del sismómetro se puede obtener desde una señal dentro del circuito de control (o bien, el controlador) que es proporcional a la integral en el tiempo de la aceleración, entregando una señal representativa en tensión o corriente de la velocidad.

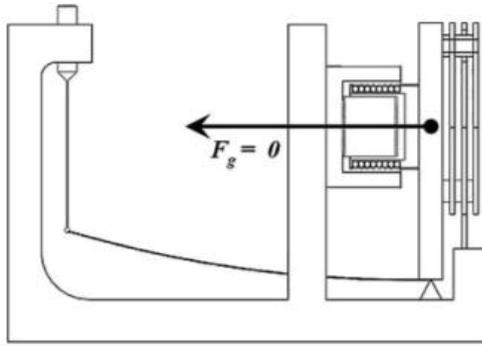


Figura 3-2 Sismómetro horizontal de fuerzas balanceadas [16]

### 3.2 Elementos esenciales del eje de banda ancha

Un arreglo típico de ejes de banda ancha es una parte móvil pivoteada en un extremo con dos capacitores de placas paralelas y un embobinado montado en un arreglo de imanes permanentes para servir como transductor de desplazamiento y actuador de fuerza, respectivamente. Usualmente, el circuito electrónico de realimentación junto con el acondicionamiento de señal, señales de salida, controladores, y circuitos relacionados se encuentran en placas impresas distribuidas sobre los tres elementos de medición, como se puede observar en la Figura 3-4.

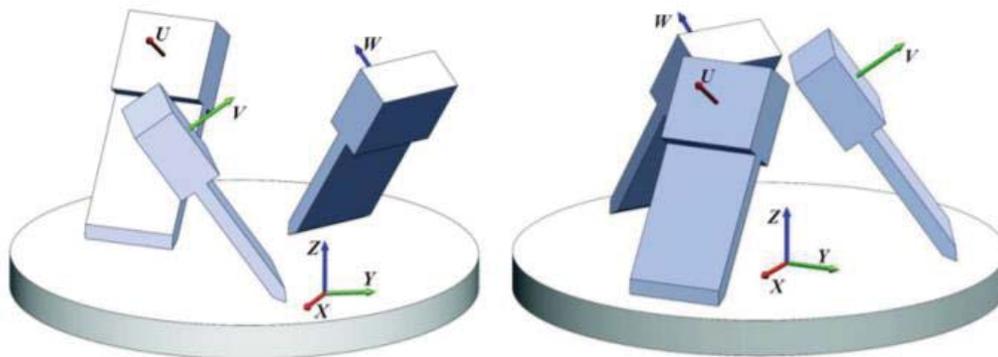


Figura 3-3 Dos arreglos de ejes tipo Galperin [16]

Cada eje está asociado a una dirección de sensibilidad, la cual se representa por la dirección de  $F_g$  en las Figuras Figura 3-1 y Figura 3-2. En el caso de un eje vertical, la masa inercial se encuentra sometida constantemente a una fuerza de gravedad ( $F_g = Mg$ ), lo cual en el eje horizontal no ocurre ( $F_g = 0$ ). Esto es principalmente lo que hace que ambos tipos de ejes sean distintos tanto en su construcción mecánica como en su calibración (centrado de la masa).

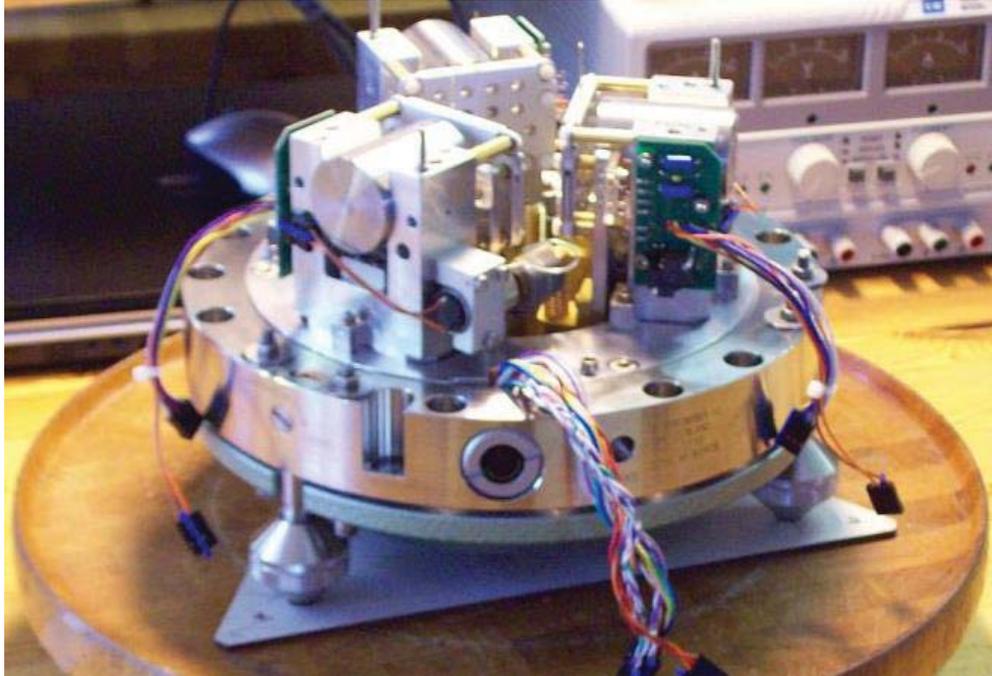


Figura 3-4 Vista interna del Sismómetro Streckeisen STS-2 [Fuente: [www.osop.com.pa](http://www.osop.com.pa)]

Estas diferencias son las que generan que el arreglo sea considerado asimétrico. Por lo que se vuelve necesario utilizar una configuración en la que tanto la construcción como calibración de los tres ejes sea exactamente la misma, con un arreglo simétrico como el que se observa en la Figura 3-3.

En [16], se realiza el análisis (matemático) de la respuesta de los sensores verticales y horizontales a ciertos ángulos de elevación de un eje vertical y horizontal. En donde se concluye la elevación óptima y separación de los ejes, que se exponen en la siguiente sección.

### 3.3 La configuración Galperin de sensores

La configuración Galperin consiste en posicionar tres ejes de sensibilidad ( $UVW$ ) de forma simétrica, para luego ser procesados en la forma cartesiana  $XYZ$ , como se observa en la Figura 3-5. Existen dos convenciones, donde el vector unitario  $\hat{u}$  se encuentra proyectado sobre el sentido positivo de  $\hat{x}$ , como en la Figura 3-5 (desarrollada en [16]), y la mostrada en la Figura 3-6 (analizada en [17]), donde el vector unitario  $\hat{u}$  se encuentra proyectado sobre el sentido negativo de  $\hat{x}$ . El cálculo de la combinación lineal para la transformación de los ejes no posee mayor complejidad para una u otra configuración, pero es necesario tener ambas en cuenta para no confundir los cálculos.

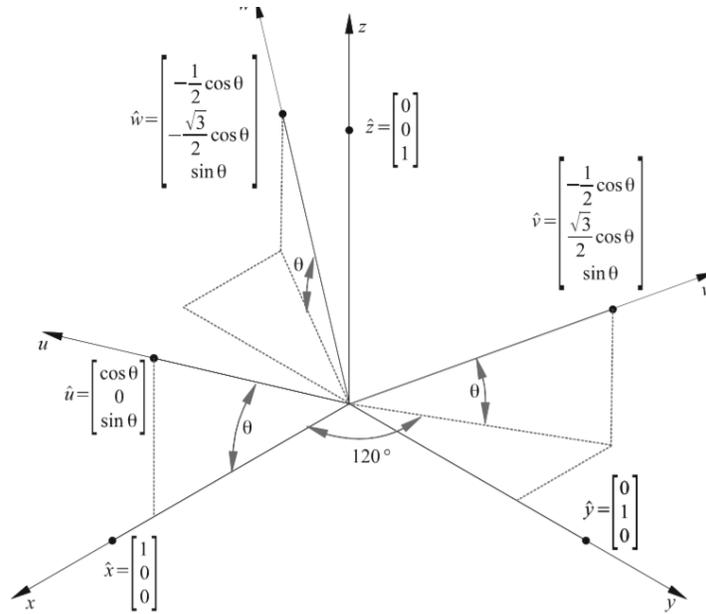


Figura 3-5 Vista isométrica de los sistemas de coordenadas UVW y XYZ (©Nannometrics) [16]

El cálculo de los ejes simétricos, para el caso visto en la Figura 3-5 es:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Y su transformación inversa:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 2 & 0 & \sqrt{2} \\ -1 & \sqrt{3} & \sqrt{2} \\ -1 & -\sqrt{3} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Se puede observar que el cálculo de la respuesta de cada eje se reduce a una combinación lineal o suma ponderada de los ejes correspondientes. Cabe destacar que estos valores corresponden a una elevación de  $\theta = 35.26^\circ$  con respecto al plano horizontal, y a una desviación de  $90^\circ - \theta$  con respecto al eje vertical ( $Z$ ) de referencia. La forma general para cualquier ángulo se puede observar en la Figura 3-5. Este ángulo es el que mantiene una los ejes  $UVW$  ortogonales, junto con una simetría de  $120^\circ$  entre los ejes.

Para el caso observado en la Figura 3-6, donde cambia el sentido de proyección del eje  $U$  respecto al eje  $X$ , la transformación triaxial queda como:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

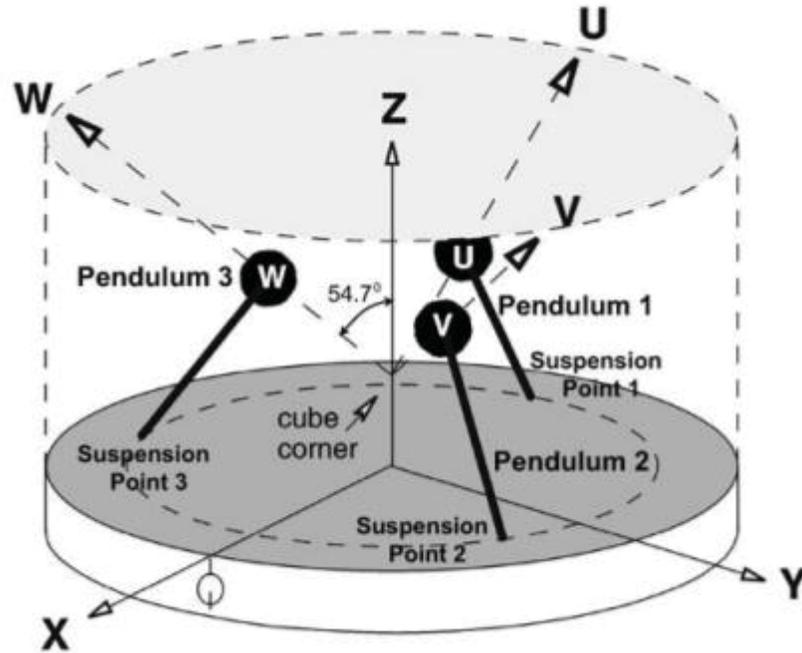


Figura 3-6 Geometría triaxial del sismómetro Streckeisen STS-2 [17] modificado desde [14].

Y la transformación inversa para este caso es:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} -2 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{3} & \sqrt{2} \\ 1 & -\sqrt{3} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

Al igual que en el caso anterior, los valores mostrados corresponden a un ángulo de elevación  $\theta = 35.26^\circ$ .

En la Figura 3-7 se observa una idea general de cómo debería construirse un sensor inclinado, con el ángulo adecuado para lograr la configuración simétrica triaxial. Se puede observar que la dirección de sensibilidad de  $F_g$  está orientada  $\theta = 35.26^\circ$  por sobre la horizontal y que en esta configuración existe interacción con la fuerza de gravedad en todo instante de medición, por lo que el proceso de centrado de la masa inercial sería similar al de un sismómetro vertical. Además, debido a que el arreglo Galperin es simétrico, los tres sensores se construyen con la misma sensibilidad, ya que tienen la misma dirección de sensibilidad y están sometidos a la misma interacción con la fuerza de gravedad, que es de  $F_g = Mgsin\theta$ .

Por supuesto, la construcción de un sismómetro en arreglo Galperin conlleva a ventajas y desventajas; una de las principales ventajas es la simplicidad del diseño, ya que los tres sensores son idénticos y por ende se diseñan una vez y luego se realizan réplicas de este. Sin embargo, esto implica que todos deben estar muy cercanamente adaptados desde su manufactura, con el menor error posible entre estos. Luego, existe la seguridad de que las funciones de transferencia de los ejes XYZ son consistentes con aquellas obtenidas en UVW, de acuerdo a las expresiones (3-1) a (3-4).

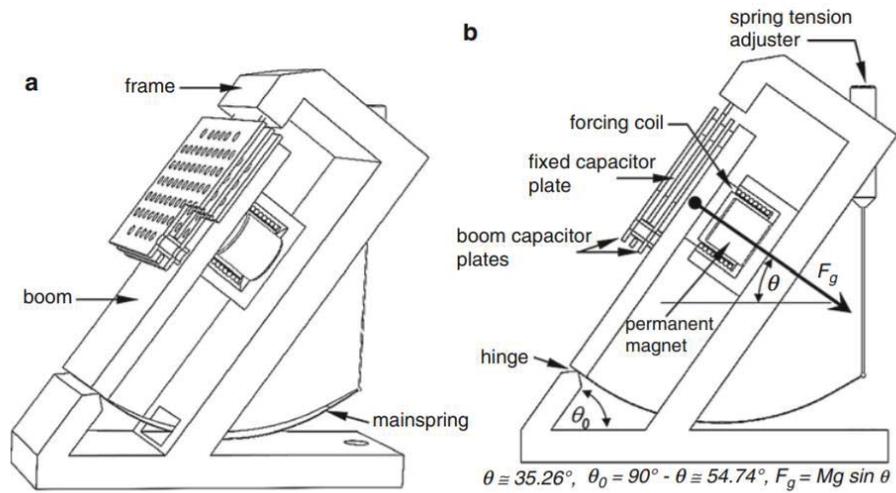


Figura 3-7 Eje oblicuo ubicable para un sismómetro triaxial simétrico (©Nannometrics) [16]

Otras ventajas y desventajas asociadas a este arreglo de sensores sísmicos, junto con otros factores como la identificación de las distintas fuentes de ruido, se encuentran detalladas en [16].

# 4 Descripción y diseño de sensores capacitivos.

En este capítulo se presentan algunos de los principios fundamentales en la fabricación de sensores capacitivos. Se presenta desde la física hasta la implementación. La explicación de estos aspectos se orienta directamente al proyecto que se está desarrollando, y se basan en la fuente [18].

## 4.1 Carga eléctrica, campos y potenciales

Existen tres tipos de materiales: conductores, aisladores y semiconductores, que se diferencian principalmente en la libertad que tienen los electrones para moverse dentro de ellos. Para el caso de los semiconductores, la conductividad se debe ver incrementada mediante la agregación de pequeñas cantidades de otros elementos, lo cual se denomina como dopaje. Para la tecnología de sensores, los semiconductores pueden ser materiales interesantes debido a que su habilidad para conducir electricidad puede ser manipulada aplicando excitaciones externas, como campos electromagnéticos y luz.

Si una pequeña carga eléctrica de prueba (positiva)  $q_0$  se sitúa cerca de un objeto cargado con carga positiva  $q$ , será sometida a una fuerza de repulsión  $f$  (Figura 4-1 A). El campo eléctrico en cada punto se define a través de la fuerza como:

$$E = \frac{f}{q_0} \quad (4-1)$$

Todo vector de campo se debe caracterizar por su distribución vectorial, conocida como flujo (de símbolo  $\Phi$ ). Si imaginamos una superficie cerrada hipotética (superficie Gaussiana)  $S$ , se puede establecer una conexión entre la carga  $q$  y el flujo como:

$$\epsilon_0 \Phi_E = q \quad (4-2)$$

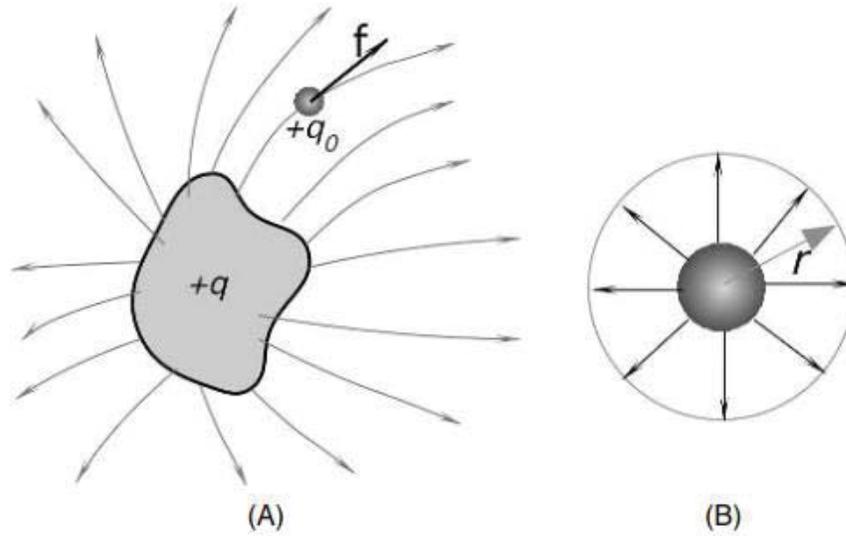


Figura 4-1 Carga positiva en la vecindad de un objeto cargado (A) y el campo eléctrico de un objeto esférico. [18]

Donde  $\epsilon_0 = 8.8541878 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$  es la permitividad constante del vacío. Al integrar el flujo sobre la superficie se obtiene:

$$\epsilon_0 \oint \mathbf{E} ds = q \quad (4-3)$$

La carga  $q$  es la carga neta rodeada por la superficie Gaussiana, la ecuación (4-3) es conocida como la Ley de Gauss. Una carga exacta en un conductor aislado está en equilibrio, completamente en su superficie. La ley de Coulomb postula que la magnitud de la fuerza que actúa sobre una carga de prueba es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la carga:

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \quad (4-4)$$

La magnitud del campo eléctrico a una distancia  $r$  desde el centro de una esfera con distribución simétrica de carga, al exterior de esta, como en la Figura 4-1B, es dirigida radialmente y tiene el valor:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (4-5)$$

De igual manera, la magnitud de campo dentro de una esfera uniforme de carga  $q$ , radio  $R$  y a una distancia  $r$  de su centro es:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qr}{R^3} \quad (4-6)$$

Donde es trivial notar que la magnitud en el centro de la esfera ( $r=0$ ) es igual a cero.

Si la carga se distribuye a través de una línea infinita (Figura 4-2a), el campo eléctrico se dirige perpendicularmente a la línea y tiene magnitud:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (4-7)$$

donde  $r$  es la distancia desde la línea y  $\lambda$  se define como la densidad lineal de carga (carga por unidad de longitud).

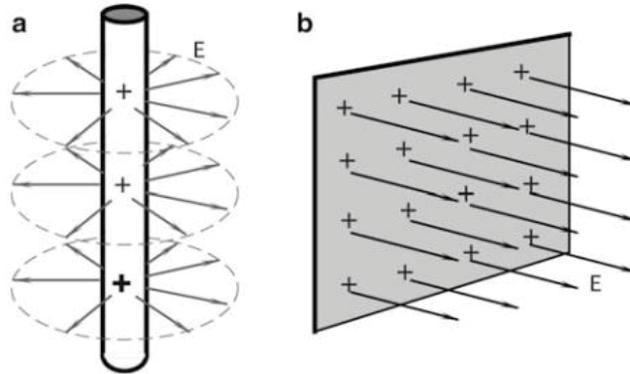


Figura 4-2 Campo Eléctrico alrededor de una línea infinita (A) y cerca de una placa o plano infinito (B). Un conductor en punta que concentra campo eléctrico (C). [18]

La placa infinita (Figura 4-2b) de superficie  $S$  y densidad de carga superficial  $\sigma$  genera un campo eléctrico perpendicular a ella con magnitud:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (4-8)$$

Y para un elemento conductor aislado

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (4-9)$$

La diferencia aparente entre todas las versiones anteriormente mencionadas acerca de la magnitud del campo eléctrico recae en las diferentes geometrías del problema analizado, lo cual puede ser aprovechado, si se generan las condiciones necesarias, para obtener información a partir de cambios instantáneos en estas condiciones.

## 4.2 Capacitancia

Si se tienen dos conductores con forma arbitraria, como por ejemplo, placas planas de área  $A$ , y estos son conectados a una fuente de voltaje constante, cada uno en un polo opuesto (Figura 4-3), habrá un equilibrio en el flujo de cargas entre ambos polos. Si se desconecta la batería, las placas existen en el vacío y están totalmente aisladas, estas se mantendrán cargadas por un tiempo infinitamente largo. La combinación de placas, que pueden mantener la carga eléctrica, se conoce como capacitor. Esta combinación de cargas, generará que una carga de prueba positiva sea

movida desde la placa positiva a la negativa, siendo sometida a una fuerza definida por el vector  $f$ .

El capacitor se define por la carga  $q$  que existe, con signo opuesto e igual magnitud en cada placa, y por la diferencia de potencial entre estas:

$$C = \frac{q}{V} \quad (4-10)$$

Cabe señalar que  $q$  no es la carga neta en el capacitor, la cual es nula. Y tampoco  $V$  es el potencial en cada placa, sino la diferencia de potencial entre estas [18]. Este cociente se define como la capacitancia  $C$  del capacitor. Su valor depende de la distancia entre las placas y su geometría, y se mide en Faradios (F), donde  $1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$ . Además, el medio en el cual se sitúen las placas será determinante en el valor de la capacitancia, debido a su permitividad eléctrica.

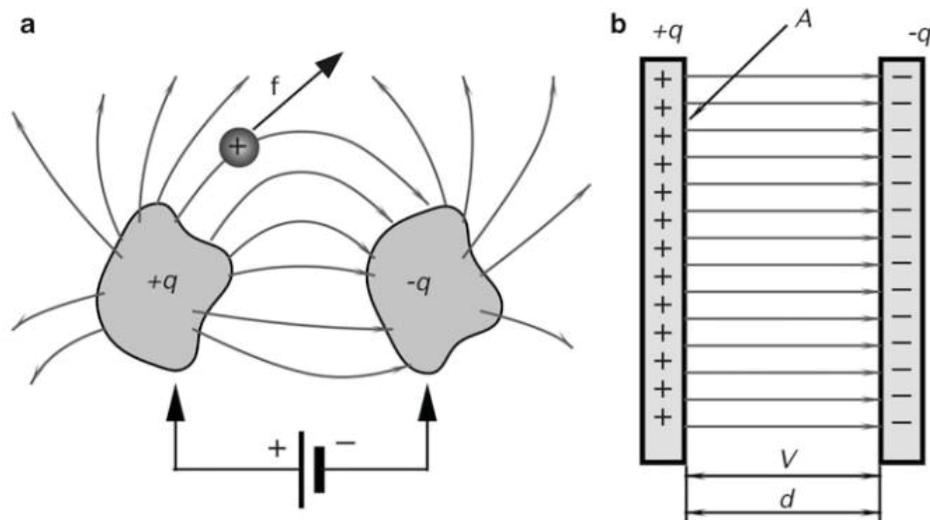


Figura 4-3 El campo eléctrico y el voltaje que definen la capacidad entre dos objetos (A). Capacitor de placas paralelas. [18]

Cuando un capacitor es conectado a un circuito electrónico, este se representa por su impedancia capacitiva:

$$Z_c = \frac{V}{i} = -\frac{1}{j\omega C} \quad (4-11)$$

Con  $j = \sqrt{-1}$  e  $i$  la corriente sinusoidal que circula por el capacitor, de frecuencia  $\omega$ . El signo negativo y el argumento complejo indican que la corriente se encuentra desfasada en  $90^\circ$ .

La capacitancia es un fenómeno físico de gran utilidad en el desarrollo de sensores, ya que tan solo cambiando alguna propiedad física o geométrica del capacitor es posible observar un cambio de forma análoga en la tensión vista entre las placas (terminales) del elemento capacitivo. Esto se debe principalmente a la naturaleza que se presenta en la ecuación (4-11).

La Figura 4-3b muestra un capacitor de placas paralelas, de igual área  $A$  y separación  $d$ . Si  $d$  es mucho más pequeño que las dimensiones de las placas, entonces el campo eléctrico que se forma entre estas será uniforme (líneas de campo paralelas y equi-espaciadas). Las leyes del electromagnetismo indican que debiese existir un desbordamiento en los bordes de las placas, pero con las condiciones propuestas esto se puede despreciar.

El cálculo de la capacitancia se puede obtener desde la ecuación (4-10), por lo cual se debe relacionar el potencial entre las placas paralelas y la magnitud de la carga neta en cada placa. La expresión que define la capacitancia de un capacitor plano es:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (4-12)$$

Luego, para fabricar un sensor, alguna de las características del capacitor debe ser cambiada, modulando la capacitancia por algún estímulo externo o por una señal proveniente de un transductor intermedio. La ecuación (4-12) indica que la capacitancia puede ser modificada tanto por el área como la separación de las placas, y esto, según la ecuación (4-10) afectará también al voltaje. El y será distinto según la geometría factor  $A/d$  se conoce como factor geométrico, del capacitor.

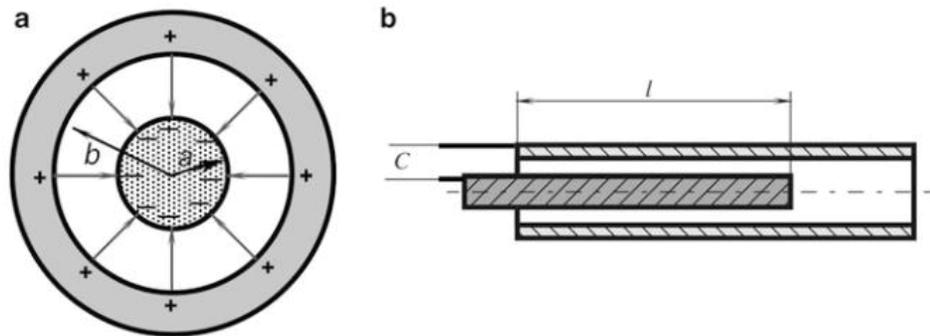


Figura 4-4 Capacitor cilíndrico (A). Sensor de desplazamiento capacitivo (B). [18]

Un capacitor cilíndrico consiste en dos cilindros coaxiales con las características que se pueden apreciar en la Figura 4-4. Para el caso en que  $l \gg b$  se pueden ignorar los efectos de “desborde” y calcular su capacitancia:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{b}{a}} \quad (4-13)$$

Aquí,  $2\pi l(\ln b/a)^{-1}$  es el factor geométrico, se observa que existe una relación lineal de la capacitancia con respecto al valor de  $l$ .

#### 4.2.1 Constante dieléctrica

Hasta ahora se ha hablado de capacitores en los que el medio en el que se genera el campo eléctrico es el vacío (o aire en términos prácticos). En 1837, Michael Faraday investigó el caso en

que el espacio entre las placas se rellena con un dieléctrico, y descubrió que la capacitancia del dispositivo aumenta en un factor  $\kappa$ , el cual se denomina constante dieléctrica del material.

El efecto se produce principalmente por la presencia de dipolos orientados aleatoriamente dentro del material dieléctrico (Figura 4-5), los cuales, en presencia de un campo eléctrico externo ( $\mathbf{E}_0$ ), se reordenan, generando un campo eléctrico en sentido contrario, volviendo más débil al campo entre las placas ( $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'$ ), como se observa en la Figura 4-5b. Esta reducción de campo conlleva a una menor diferencia de potencial a través del capacitor:  $V = V_0/\kappa$ . Y de acuerdo a la ecuación(4-14) implica una mayor capacitancia.

$$C = \kappa \frac{q}{V_0} = \kappa C_0 \quad (4-14)$$

De acuerdo a lo anterior, se puede desprender que, por ejemplo, para un capacitor de placas paralelas:

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (4-15)$$

Y en términos generales:

$$C = \epsilon_0 \kappa G \quad (4-16)$$

Donde G corresponde al factor geométrico del capacitor.

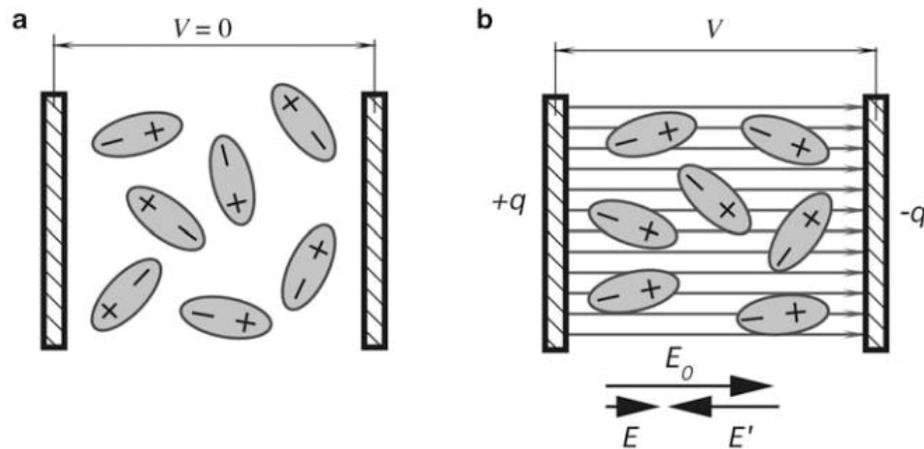


Figura 4-5 Polarización de un dieléctrico. Dipolos orientados aleatoriamente en ausencia de un campo eléctrico externo(a). Dipolos alineados (b). [18]

Lo interesante de este efecto es que las características de un dieléctrico son sensibles a variaciones de parámetros como la temperatura, por lo que se pueden detectar variaciones de capacitancia con respecto a la temperatura con la construcción del capacitor adecuado. Sin embargo, los sensores de temperatura no son parte del alcance de este proyecto. Se puede consultar mayor información sobre este fenómeno en [18].

### 4.3 Sensores capacitivos de desplazamiento

Los sensores capacitivos de desplazamiento poseen un amplio campo de aplicaciones donde los desplazamientos son ocasionados por fuerzas, presiones, temperaturas, aceleraciones, etc. Un sensor capacitivo puede ser mono polar (solo un capacitor implicado), diferencial (utilizando dos capacitores) o se puede utilizar un puente capacitivo (cuatro capacitores). Para los casos en que se utiliza más de un capacitor, uno o dos capacitores deben ser fijos o variables, cambiando con fases opuestas.

Si se considera el ejemplo de la Figura 4-6, se tienen dos capacitores de placas paralelas,  $C_1$  y  $C_2$ , cuyas placas externas (superior e inferior) se encuentran alimentadas con voltajes desfasados en  $180^\circ$ . Ambos capacitores son cercanamente iguales (algo difícil de lograr en la práctica), por lo que las cargas de estos se cancelan y la tensión de la placa central con respecto a la tierra es cero.

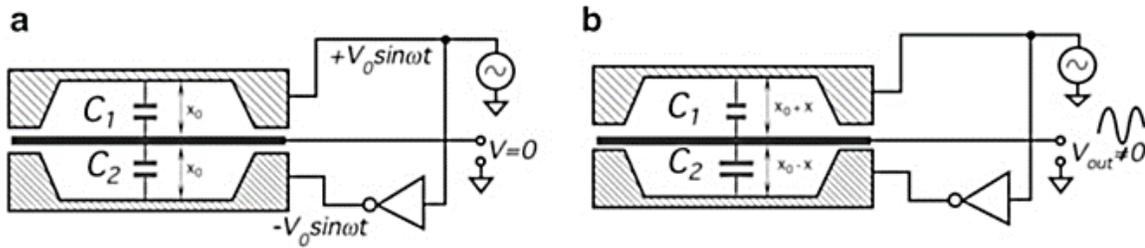


Figura 4-6 Principio de operación de un sensor capacitivo diferencial de placas planas. Balanceado (a) y desbalanceado (b). [18]

Si la placa central se mueve una distancia  $x_0$  hacia abajo, de acuerdo a la ecuación (4-15) el valor de las capacitancias varía según:

$$C_{1,2} = \epsilon \frac{A}{x_0 \pm x} \quad (4-17)$$

Y la señal de la placa central aumenta en magnitud, donde la fase de esta indicaría si el desplazamiento es hacia arriba o hacia abajo. La amplitud de esta señal es:

$$V_{out} = V_0 \left( \frac{x}{x_0 + x} + \frac{\Delta C_0}{C_0} \right) \quad (4-18)$$

A medida que  $x \ll x_0$  el voltaje de salida se debe considerar una función lineal del desplazamiento. El segundo sumando representa un desajuste de capacitancia y es la principal causa del offset de salida, que también puede ser causado por efectos de desbordamiento en las fronteras de las placas y por la llamada fuerza electrostática, causada por la atracción y repulsión de las cargas aplicadas a las placas del sensor, causando que se comporten como resortes. El valor instantáneo de la fuerza electrostática resultante de la variación en la diferencia de potencial en las placas  $\Delta V$  es:

$$F = -\frac{1}{2} \frac{C \Delta V^2}{x_0 + x} \quad (4-19)$$

Otro ejemplo de interés para sensores de desplazamiento se puede ver en el sensor de puente capacitivo de la Figura 4-7. Todas las placas son de dimensiones similares (ancho  $b$ ). La excitación del puente entrega un voltaje sinusoidal (5-50 kHz) y la diferencia de tensión entre el par de placas móviles es el voltaje de salida.

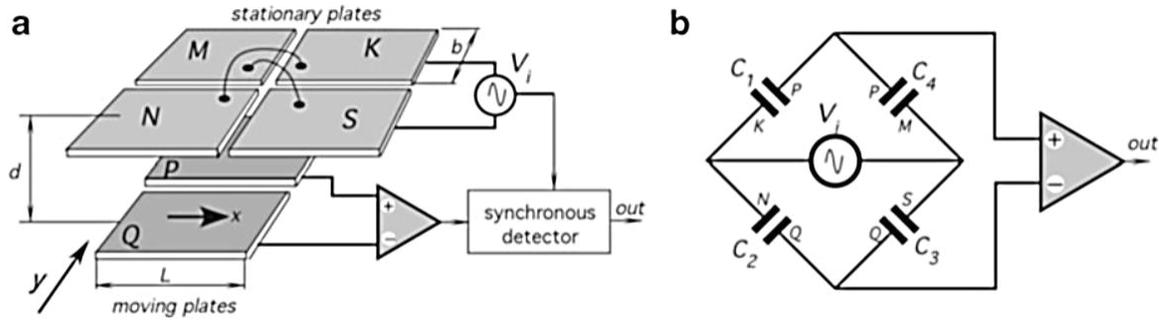


Figura 4-7 Sensor de puente capacitivo de placas paralelas. Arreglo (a) y circuito equivalente (b). [18]

El valor del capacitor  $C_1$  es:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 b}{d} \left( \frac{L}{2} + x \right) \quad (4-20)$$

Las otras capacitancias se derivan de ecuaciones idénticas. Los capacitores opuestos son aproximadamente iguales:  $C_1 = C_3$  y  $C_2 = C_4$ . Un movimiento mutuo de las placas con respecto a una posición completamente simétrica resulta en el desbalanceo del puente y la salida del amplificador diferencial sensible al desfase. Una ventaja del puente capacitivo es la misma de cualquier circuito puente (linealidad e inmunidad al ruido externo).

Un caso de aplicación y metodologías para medir los cambios de capacitancia en un circuito tipo puente capacitivo se puede encontrar en [19].

#### 4.4 Sensor capacitivo del FBA triaxial

El sensor desarrollado para el dispositivo construido utiliza el mismo principio que se explica en la sección 2.3. En la Figura 4-8 se ilustran las placas centrales y externas del sensor, en el siguiente capítulo se explica el montaje en el dispositivo final. Las placas externas son electrodos de 64x45 mm, los cuales, al igual que los de las placas centrales, son construidos sobre una placa de circuito impreso, en donde se secciona el material conductor para dejar activa la zona que se demarca con color cobre en la Figura 4-8. Las placas externas, como se verá más abajo, se encuentran perforadas en la zona inactiva (que no es cargada en la placa), con orificios de 8 mm para ser utilizadas en el sistema de nivelación de las placas, que se explica más abajo. Además, la zona activa del electrodo central posee orificios de 5 mm que sirven para disminuir la viscosidad del aire que se forma por el movimiento de las placas, debido a que el sistema construido no se

encuentra aislado al vacío. Por último, la separación entre los electrodos externos se logra con una pieza impresa en PLA de espesor 6 mm ubicada en la zona inactiva del electrodo, como se describe en el siguiente capítulo, que logra una separación de las placas en cada capacitor de 1,2 mm. Con esto, según la ecuación (4-12) se logra una capacitancia total de 16,25 pF. Este valor considera el área activa del electrodo central, y cabe destacar que se dejan alrededor de 2 mm de error en el ancho de los electrodos externos para efectos de montaje y alineación de estos.

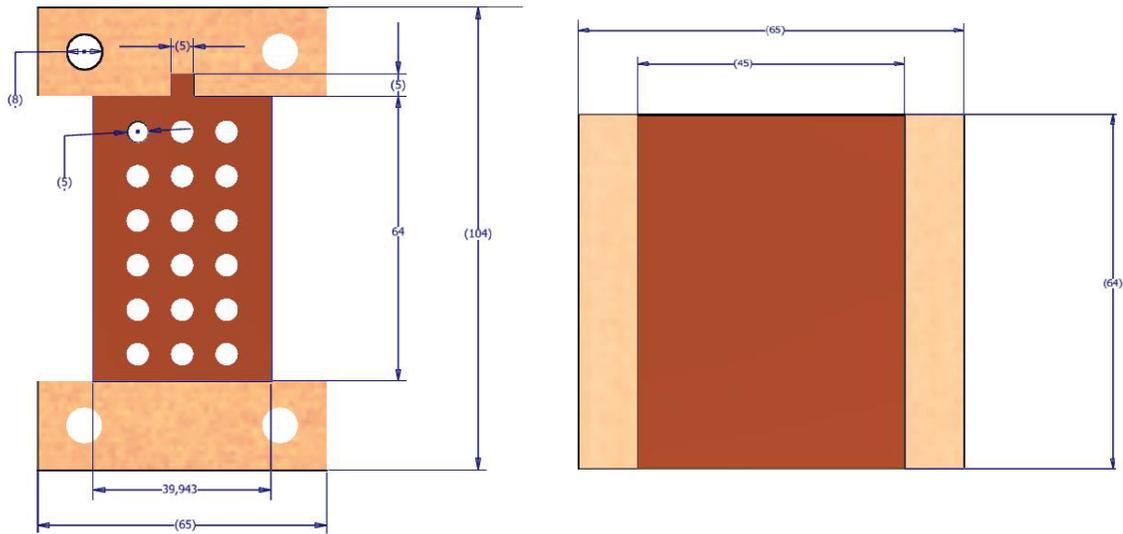


Figura 4-8 Placas interna y externa del sensor capacitivo (medidas en mm).

# 5 Descripción y diseño de actuadores electromecánicos

En este capítulo se exponen algunas características correspondientes a los principios físicos involucrados en un actuador electromecánico. Un actuador es un elemento capaz de transformar algún tipo de energía en otra con el fin de activar un elemento de control, como lo puede ser una válvula.

El principio del actuador de fuerza electromecánico es utilizado para generar una fuerza lineal al voltaje aplicado a una bobina controlada mediante un flujo de corriente. Esto permite al acelerómetro de fuerzas balanceadas, a través de su lazo de realimentación negativa, mantener el equilibrio de fuerzas.

## 5.1 Magnetismo y Electromagnetismo

La palabra magnetismo viene de la palabra “magnes”, imán en griego, que a su vez viene de Magnesia, región del Asia Menor en la que se encuentran yacimientos de la mineral magnetita (piedra imán), que tiene la propiedad de atraer objetos de hierro, así como conferir al hierro sus propiedades magnéticas. El fenómeno ya era conocido en la antigua Grecia, se observó que el efecto de atraer pequeños trocitos de hierro era más pronunciado en ciertas zonas del imán llamadas polos magnéticos. Desde aquí se han realizado numerosas investigaciones para llegar a la teoría del electromagnetismo, basada en las ecuaciones de Maxwell. [20]

Para el magnetismo, la ecuación de Maxwell más importante es la ley de Gauss para campos electromagnéticos.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad ; \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (5-1)$$

Esta ley indica que no existen mono polos magnéticos, debido a que la divergencia en un imán es igual a cero, es decir, las líneas de flujo magnético fluyen desde un polo denominado norte (N) a un polo denominado sur (S). Este principio se aprecia en la Figura 5-1.

### 5.1.1 Fuerza de Lorentz

La teoría detrás del actuador de fuerza electromecánico se basa en la ley de Lorentz, donde la fuerza  $F$  es el resultado de una corriente  $I$ , que fluye a través de un elemento diferencial  $dl$  de un conductor. La dirección y sentido de esta fuerza se determina por el producto cruz entre el vector que define el sentido de la corriente y la densidad de flujo electromagnético (ecuación (5-2)).

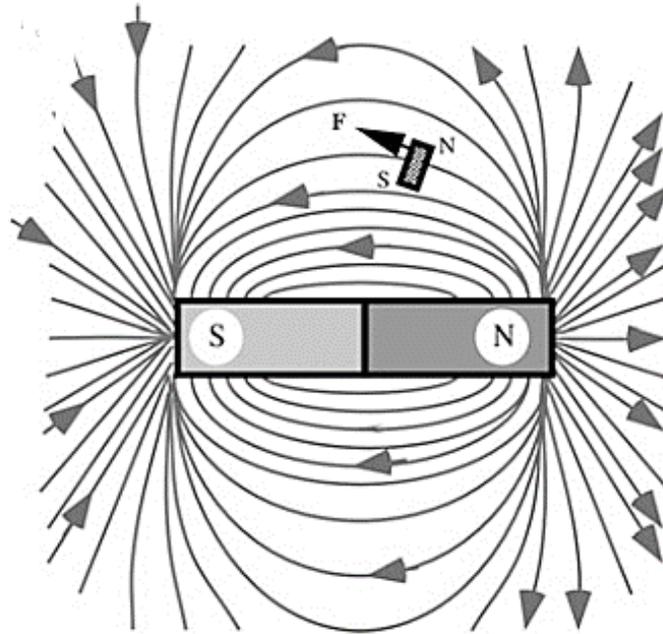


Figura 5-1 Campo magnético en un imán permanente. [18]

$$F = \int I(dl \times B) \quad (5-2)$$

La dirección de esta fuerza resulta ser perpendicular a los dos vectores involucrados, y es máxima cuando estos forman un ángulo recto. Esta característica es importante en el diseño de un actuador electromecánico, como se verá en las secciones siguientes.

## 5.2 Actuador electromecánico del FBA triaxial

El actuador confeccionado para este proyecto se basa en el utilizado en [4], con la ventaja de tener dimensiones reducidas, lo cual entrega mayor libertad en su posicionamiento dentro del dispositivo final. Las dimensiones y especificaciones de proveedor de los imanes utilizados se encuentran en la Tabla 5-1, de los cuales, en la Figura 5-12 se pueden observar los imanes cerámicos de anillo, mientras que dentro del actuador, en la pieza central, se encuentran insertados los imanes de neodimio.

Las piezas que recubren el actuador son confeccionadas con Acero 1020, y cumplen la función de confinar y conducir el campo magnético de manera radial en el entrehierro, con el fin de maximizar la fuerza de Lorentz, según la fórmula (5-2), que se genera gracias a la acción de una

bobina de alambre de cobre esmaltado, cuyas espiras hacen circular la corriente de forma perpendicular a las líneas de campo magnético. Las especificaciones del alambre de cobre utilizado se pueden observar en la Tabla 5-2.

Tabla 5-1 Especificaciones de imanes comprados

Imán	Tipo	Diámetro (mm)	Espesor	Cantidad	Potencia (GAUSS)
Central	N35	5	2	6	2660
Externo	Cerámico	25x50	6	2	1200



Figura 5-2 Actuador electromecánico construido.

Tabla 5-2 Especificaciones alambre esmaltado de la bobina

Tipo	Capacidad (A)	Número de vueltas	Resistencia ( $\Omega$ )
AWG 31	0,113	325	9.4

Los diseños y dimensiones especificadas para encajar los imanes en las piezas de acero se pueden apreciar en la

Figura 5-3, Figura 5-4, Figura 5-5, y Figura 5-6.

La pieza inferior es diseñada para que en el orificio central encajen los imanes de neodimio. Este orificio no es pasante, es decir, no atraviesa la pieza completamente, como se observa en la Figura 5-4 y tiene una profundidad de 12 mm, de tal manera que los seis imanes de espesor 2 mm quedan en la posición mostrada en la simulación de la Figura 5-13. Es aceptable un error en la profundidad de este orificio, lo cual se puede simular por elementos finitos y se muestra en la Figura 5-7.

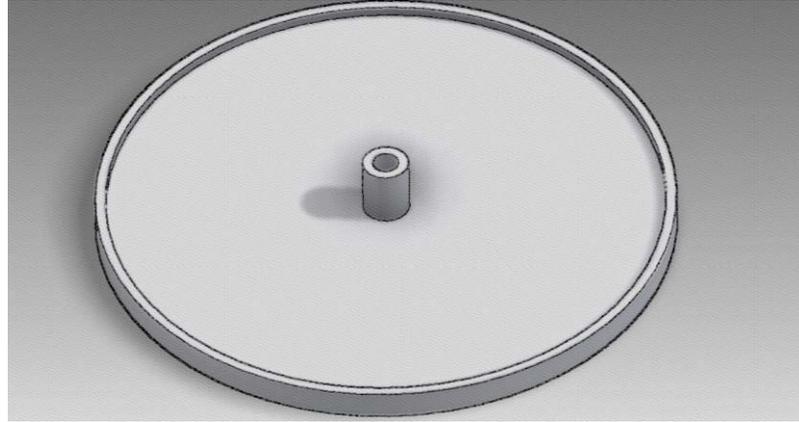


Figura 5-3 Pieza inferior de acero del actuador electromecánico.

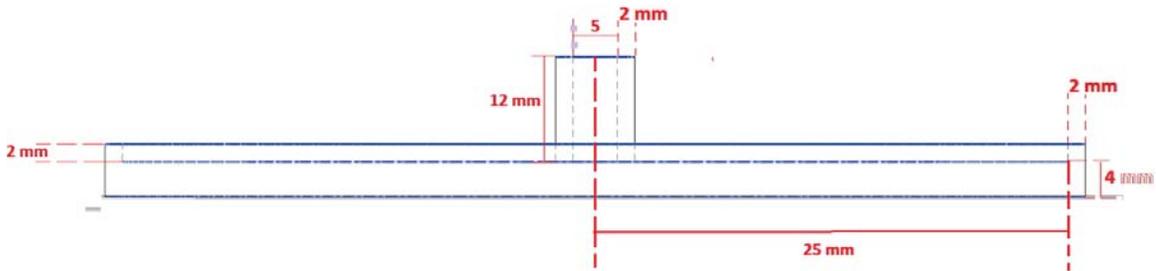


Figura 5-4 Dimensiones de la pieza inferior de acero del actuador electromecánico.

Adicional a esta pieza se fabrica una tapa, para cerrar el circuito magnético, esta tiene un diámetro de 9 mm, como se puede deducir de la Figura 5-4, y un espesor de 8 mm, quedando alineada con la pieza superior de la Figura 5-6.

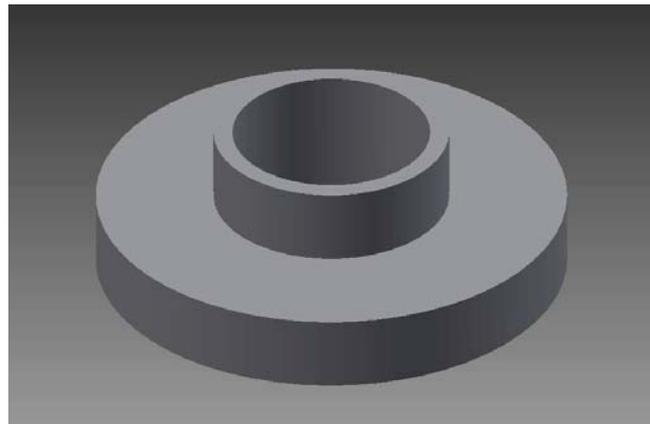


Figura 5-5 Pieza superior de acero del actuador electromecánico.

La pieza que va en la parte superior, como se puede observar en la Figura 5-6, posee un orificio central de 21 mm, que es pasante, y es el espacio de entrehierro en el que se mueve la bobina del actuador electromecánico.

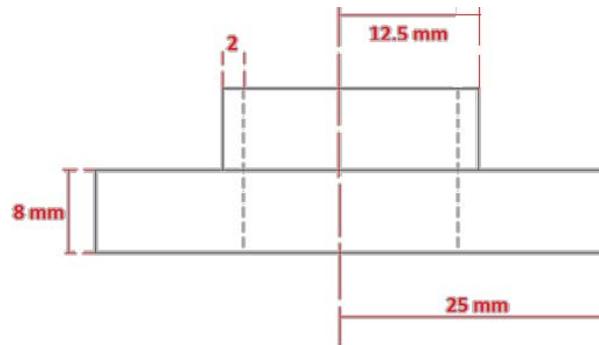


Figura 5-6 Dimensiones pieza superior de acero del actuador electromecánico.

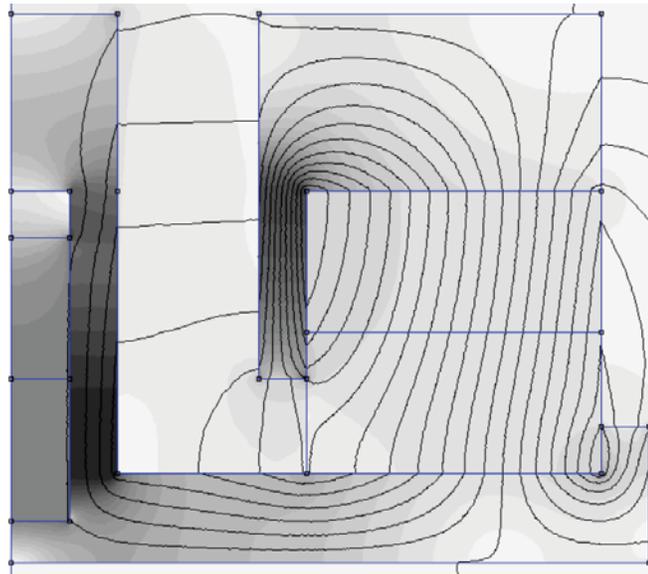


Figura 5-7 Simulación del actuador con espacio de aire, por posible imprecisión en la construcción de las piezas.

El embobinado se confecciona sobre un diseño impreso en PLA, el cual se observa en la Figura 5-8. Con las dimensiones de la bobina, que se pueden apreciar en la Figura 5-9, se logra un total de 325 vueltas, con lo que se proceden a realizar pruebas sobre una báscula, como se observa en la Figura 5-10. Estas pruebas se realizan de tal manera que, al aplicar corriente al actuador, se produzca una fuerza de repulsión, por lo que la báscula marcará una masa, lo cual se puede transformar a unidades de fuerza (newton). Con esto se puede obtener una constante de fuerza (en N/A), que sirve de referencia para estimar la fuerza que participará en el sistema inercial.

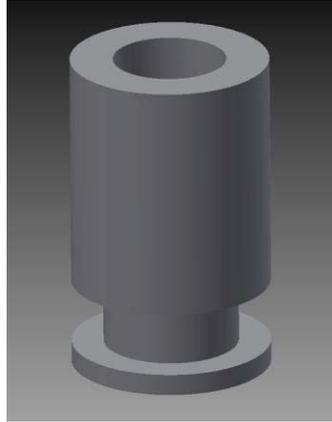


Figura 5-8 Diseño de pieza donde se realiza el embobinado.

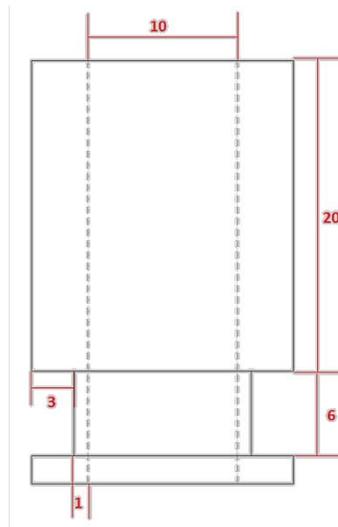


Figura 5-9 Dimensiones pieza diseñada para embobinar (medidas en mm).

El sentido del embobinado es el de las agujas de un reloj, visto desde la parte superior del actuador. Con esto, aplicando corriente en este sentido, se aplica una fuerza de repulsión del arreglo de imanes a la bobina, y en sentido contrario (aplicando tensión negativa), se produce un efecto de atracción. Cabe destacar que la polaridad de los imanes es contraria a la de la Figura 2-8, lo importante es que estas sean opuestas entre ambos imanes (central y externo).

Los resultados de las pruebas se pueden observar en el gráfico de la Figura 5-11. Se estima, en base a las mediciones, que la constante de fuerza es en promedio  $G = 1,3 \text{ N/A}$ . Este valor, al ser una referencia normalizada, es esperable que la curva tenga pendiente nula (totalmente horizontal) para asegurar una linealidad de la cantidad de fuerza aplicada con respecto a la corriente que circula por la bobina.

Tabla 5-3 Especificaciones alambre esmaltado de la bobina



Figura 5-10 Prueba realizada con el actuador electromecánico.

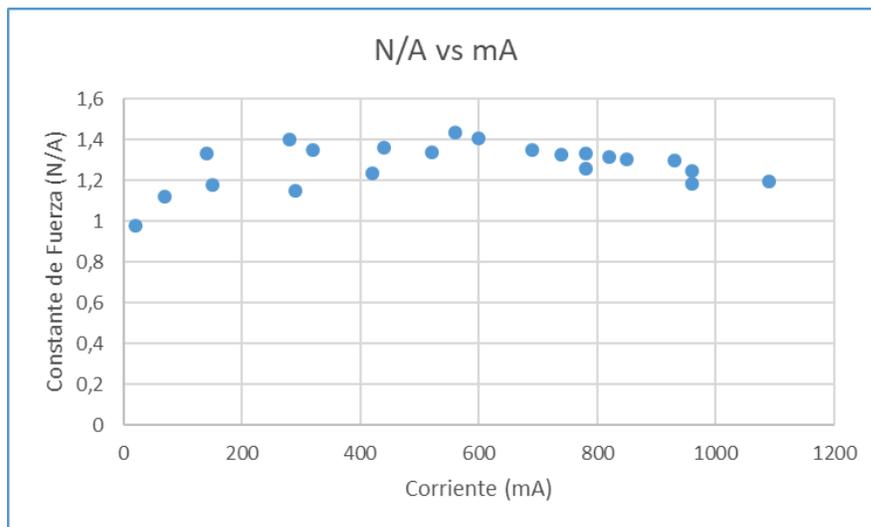


Figura 5-11 Mediciones de constante de fuerza

### 5.3 Simulaciones por medio de elementos finitos

En el trabajo de F. Vega [4], se realizó una simulación previa a la construcción del actuador electromecánico, que se puede observar en la Figura 2-8. Este modelo, que fue simulado en el por elementos finitos, demuestra que las líneas de densidad de campo se comportan de manera radial en el actuador. Se realiza una réplica de la simulación del actuador en el mismo software para comprobar las conclusiones obtenidas, lo cual se puede observar en la Figura 5-12.

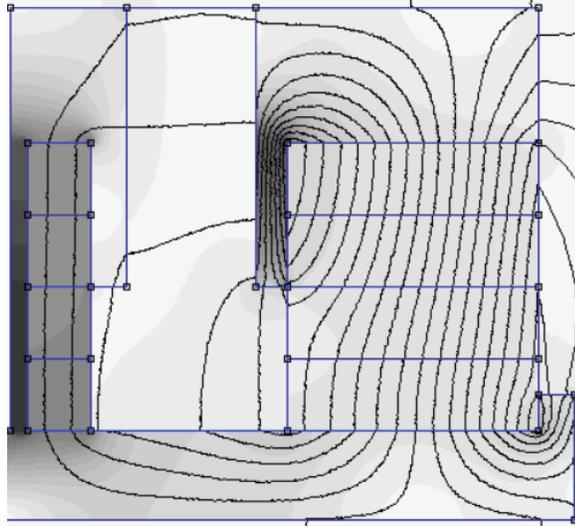


Figura 5-12 Simulación en modo "Axysymmetric" del actuador de F. Vega [4]

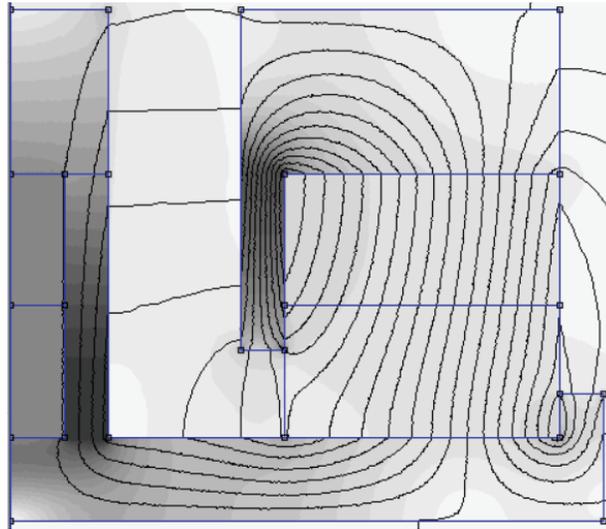


Figura 5-13 Simulación de actuador previo a compra de imanes

Se pueden observar notorias diferencias en la cantidad de líneas de densidad de campo que interactúan en el entrehierro generado entre las piezas metálicas. Esto se debe a que las simulaciones realizadas por F. Vega se realizaron erróneamente. Esto se debe al modo en que se simuló el sistema.

El software utilizado es FEMM, que simula fenómenos físicos (en este caso, circuitos magnéticos) en cuerpos sólidos por análisis de elementos finitos, es decir, calcula el comportamiento de una sección del elemento a simular y lo extrapola por ecuaciones diferenciales parciales. Es importante que el elemento simulado tenga simetría para realizar las simulaciones, de modo que se puede observar el análisis de sólo un perfil del elemento simulado, sabiendo que se comporta de la misma manera a lo largo de todo el cuerpo. Para esto, existen dos modos, de simetría por

revolución (Axysimmetric), o por geometría rectangular (Planar). El más adecuado a utilizar en este caso es el modo por sólido de revolución, debido a la geometría del actuador.

Finalmente, se puede concluir que la simulación de la Figura 2-8 fue erróneamente simulado en modo Planar. Sin embargo, en la Figura 5-13 se puede observar que el actuador posee el mismo comportamiento que el actuador de F. Vega simulado en el modo correcto, incluso con una mayor densidad de líneas de campo, lo cual es un resultado satisfactorio para el actuador.

# 6 Diseño de sistema mecánico para aplicación de arreglo Galperin

En este capítulo se presenta el diseño y construcción del sistema mecánico correspondiente a un eje del sismómetro triaxial simétrico. El diseño debe tener un brazo pivoteado con una dirección de sensibilidad elevada en un ángulo de  $35,26^\circ$  con respecto al plano horizontal. Se presenta el diseño mediante software, explicando el funcionamiento de cada una de sus partes, para posteriormente enseñar el montaje final del dispositivo.

## 6.1 Diseño general en 3D

En la Figura 6-1 se puede apreciar el diseño completo del sismómetro, el cual ilustra los distintos sistemas utilizados para el ajuste fino de parámetros como la tensión del resorte, el centro de masa, y la posición de los electrodos del capacitor, así como del soporte del actuador. Todos estos sistemas van orientados a tener distintas posibilidades de calibrar el sensor en su referencia, donde la separación de las placas en ambos capacitores es la misma.

Tabla 6-1 Distribución de los sistemas incorporados en el diseño del sismómetro.

Número	Sistema
1	Base del sismómetro
2	Pivote
3	Actuador electromecánico
4	Soporte de actuador
5	Sensor capacitivo
6	Ajuste de centro de masa
7	Ajuste de tensión del resorte

En la Tabla 6-1 se enumeran las partes del diseño que se pueden ver en la Figura 6-1, los cuales se explican en las siguientes secciones.

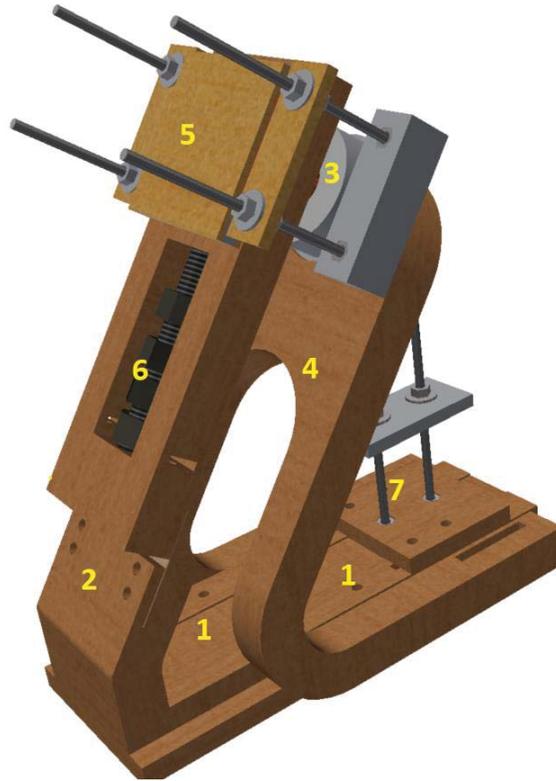


Figura 6-1 Diseño completo generado en software Inventor.

### 6.1.1 Sistema de pivoteo y ajuste de resorte “Leaf-Spring”

En la Figura 6-2 se puede apreciar la pieza central del sismómetro, la cual actúa como base mecánica del dispositivo. Esta posee un sistema para soportar el pivote, que se encuentra implementado con tres micas, las cuales en total tienen un espesor de 2,6 mm y se pueden apreciar en la Figura 6-3. Cada mica cuenta con cuatro perforaciones para encajar en la traba del pivote (punto 2 en Figura 6-1, también se puede apreciar de mejor manera en la Figura 6-4 ), dos perforaciones para encajar con el brazo móvil del sismómetro, y una ranura para introducir una lámina de acero al carbono, que funcionará como resorte (ver Figura 6-4Figura 6-3) y se le conoce como sistema “Leaf-Spring”. Esta combinación de resorte y mica generan un sistema de pivote estable y sin corrimiento.

El sistema de ajuste de tensión del resorte funciona gracias a la pieza que se puede apreciar en rojo en la Figura 6-3, y se encuentra posicionada con dos varillas roscadas y una base que va encajada en las ranuras de la base que se pueden observar en la Figura 6-2. Estos componentes logran que el resorte tenga un ajuste vertical y horizontal.

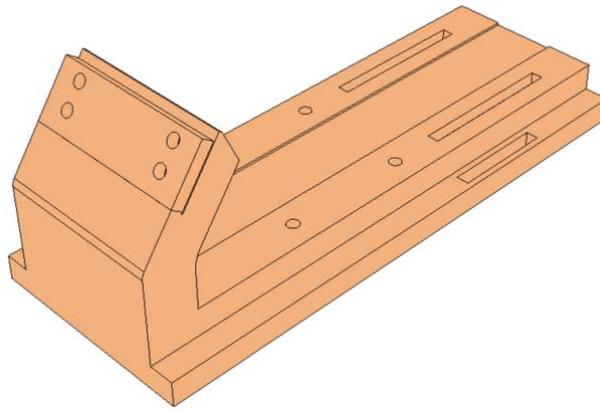


Figura 6-2 Base del sismómetro.

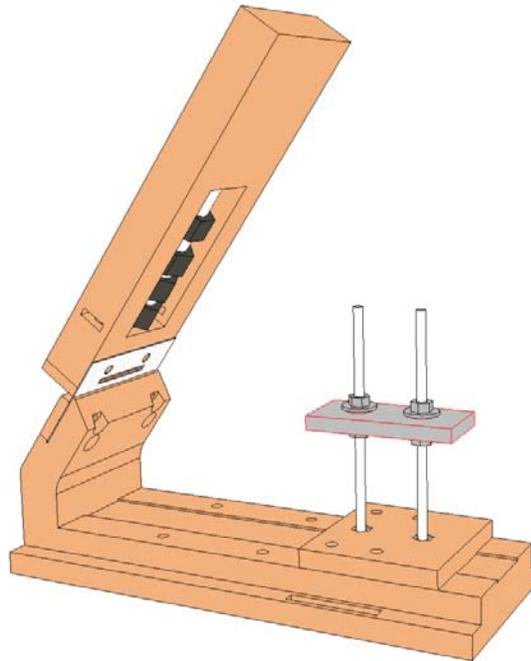


Figura 6-3 Sistema pivoteado por mica y resorte de lámina.

Por una parte, la base de la pieza se ajusta horizontalmente (alejándose y acercándose al pivote), que sirve para posicionar las micas de forma paralela al ángulo de sensibilidad del sismómetro (ver página 27); por otra parte, el ajuste vertical se realiza con dos pares de tuercas, de las cuales, la tuerca trasera sirve para ajustar la altura del extremo del resorte, mientras que la delantera sirve para ajustar la tensión del resorte. Esto generará que se pueda ajustar la posición angular del brazo completo. La lámina del resorte va enganchada en un extremo por debajo de la pieza que va en las varillas roscadas, mientras que por el otro extremo, va enganchada bajo presión en la pieza que se aprecia en la Figura 6-4. Esta lámina no se observa en las figuras, pues el software utilizado para el diseño no permite dibujar piezas flexibles en el ensamblaje, pero se podrá ver con más detalle más abajo.

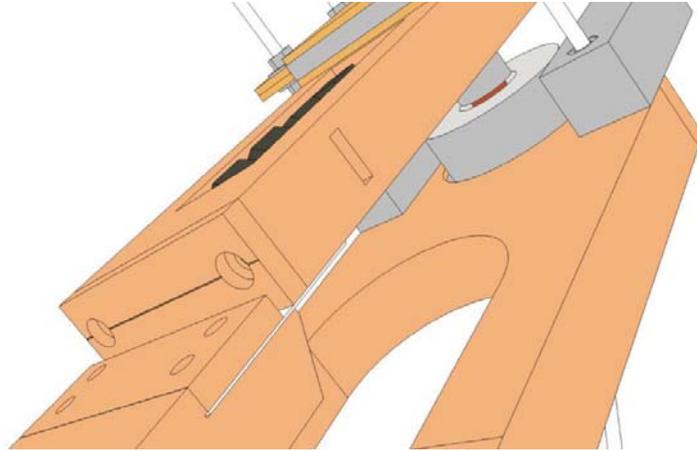


Figura 6-4 Sistema de pivoteo

### 6.1.2 Sistema de ajuste de centro de masa

El sistema para ajuste del centro de masa se puede apreciar en la Figura 6-5 y consta de una vara roscada de 11,8 mm, con cuatro tuercas que, al moverse por la vara, generan un efecto de corrimiento del centro masa, que para efectos del rango de movimiento visto por el sensor capacitivo (alrededor de 0,6 mm) el ajuste es suficiente para calibrar la posición de equilibrio y, por ende, la posición angular del brazo. Este sistema, junto con el sistema de ajuste del resorte, generan mayor libertad para calibrar el sensor.

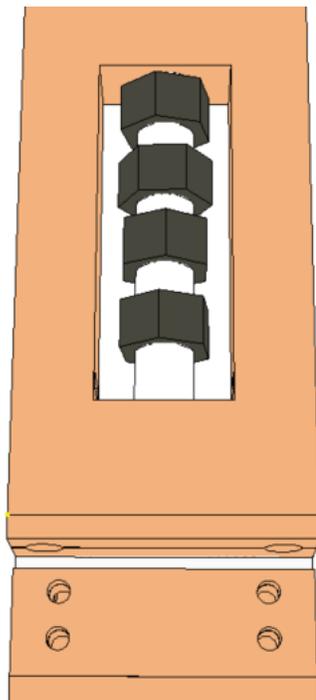


Figura 6-5 Sistema de ajuste del centro de masa.

### 6.1.3 Sistema de soporte de actuador electromecánico

El sistema de soporte del actuador electromecánico se puede apreciar en la Figura 6-6 y posee un encaje para posicionarlo. Posee además dos ranuras en la parte posterior, que se aprecian de mejor manera en la Figura 6-7, para ajustar la posición del soporte, con el fin de que sirva para ajustar de mejor manera las placas del sensor, debido a que, como se verá en la sección siguiente, los soportes del sensor capacitivo van anclados a esta pieza.

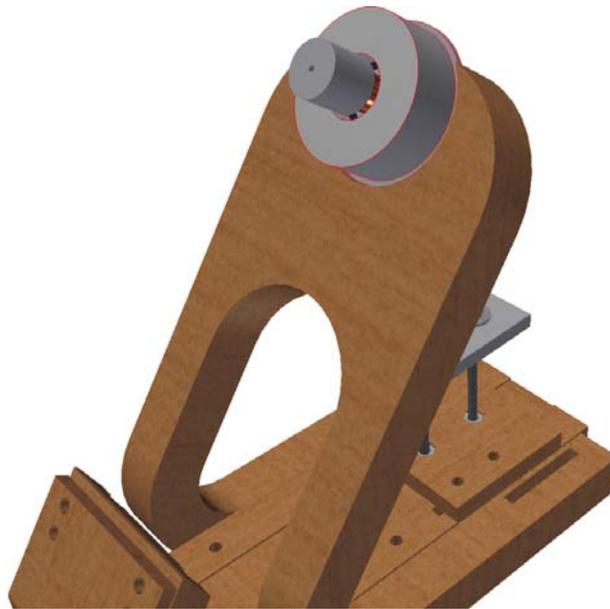


Figura 6-6 Soporte de actuador electromecánico.

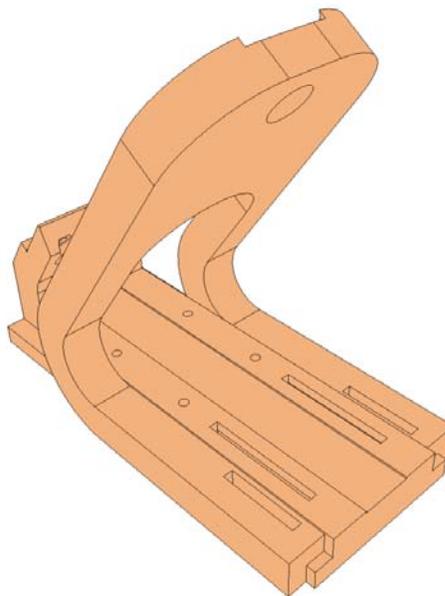


Figura 6-7 Ranuras soporte actuador.

#### 6.1.4 Sistema de soporte de sensor capacitivo.

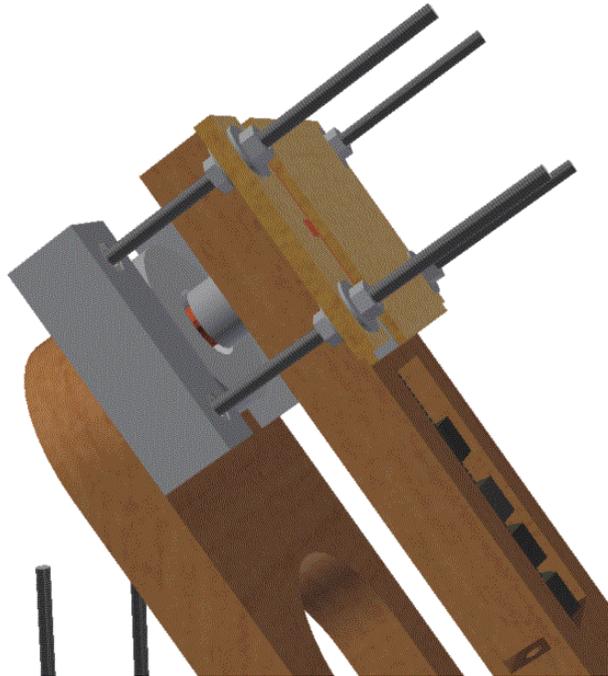


Figura 6-8 Varillas de soporte de la placa central del sensor.

Los electrodos del sensor capacitivo se encuentran unidos al sismómetro en dos partes, como se observa en la Figura 6-8 y la Figura 6-9. Por una parte, cuatro varillas roscadas de 4,8 mm sostienen los dos electrodos centrales, las cuales se encuentran ajustadas al soporte del actuador electromecánico, visto en la sección anterior, gracias a una pieza diseñada para soportar las tuercas de la varilla; Por otra parte, los electrodos externos se encuentran unidos al brazo móvil y se encuentran separadas gracias a una pieza diseñada para mantener esta separación, y se puede apreciar en la Figura 6-9.

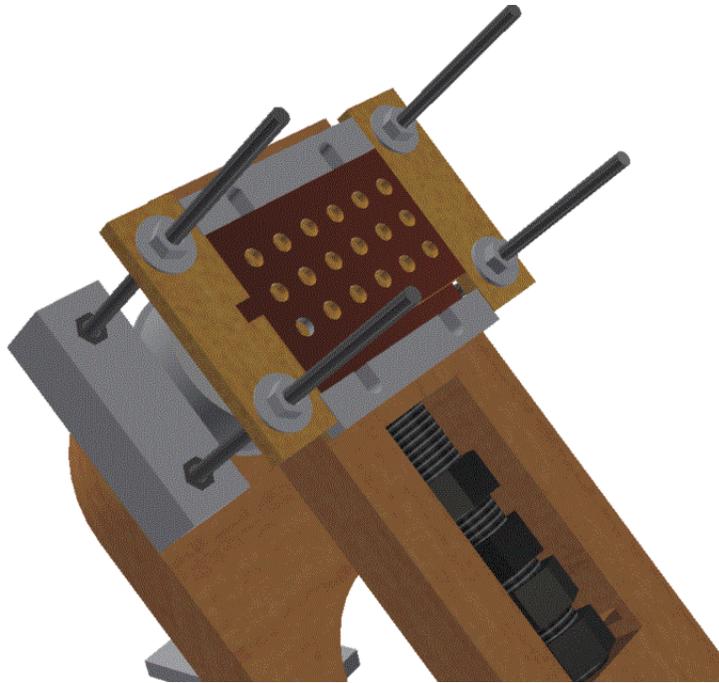


Figura 6-9 Vista de placa central y separación de placas externas.

## 6.2 Montaje del dispositivo.

El prototipo, como se puede observar en la Figura 6-10 se encuentra impreso en PLA y se encuentra montado junto con el circuito de acondicionamiento. Lo único necesario para poner en funcionamiento el sistema en lazo abierto es una alimentación de 12 V y -12 V, además de un generador de señales a la entrada del circuito de acondicionamiento del actuador electromecánico; y algún sistema de lectura y adquisición de datos a la salida del circuito de acondicionamiento del sensor capacitivo.

En la Figura 6-11 se puede observar además cómo se encuentra implementado el resorte de lámina explicado en la página 50, que es la base de todo el funcionamiento mecánico del dispositivo. En este caso, se utilizan dos láminas de acero al carbono de 0,3 mm de espesor, las cuales, al realizarse un movimiento, generan un deslizamiento entre sí, lo que se traduce en un efecto de amortiguamiento al sistema.

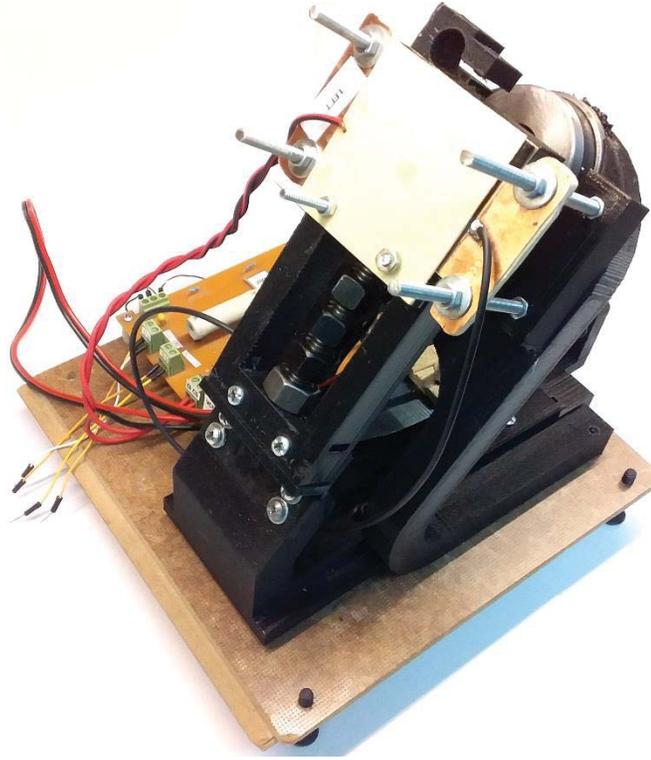


Figura 6-10 Montaje final el dispositivo

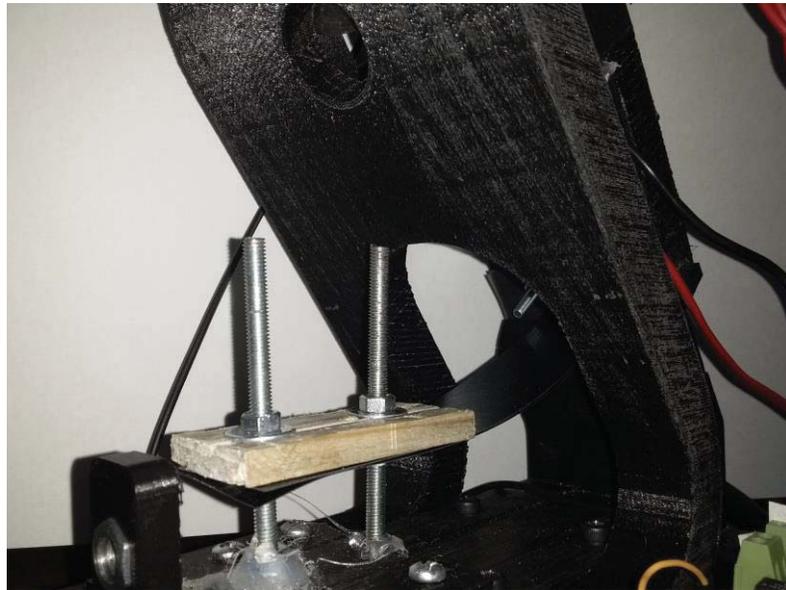


Figura 6-11 Vista del resorte "Leaf-Spring"

# 7 Pruebas de funcionamiento y análisis de resultados.

En este capítulo se presentan las pruebas de funcionamiento realizadas al sismómetro. Las pruebas consisten en verificar la respuesta en frecuencia tanto del sensor como de las distintas etapas del circuito de acondicionamiento.

## 7.1 Descripción de las pruebas realizadas

Las pruebas realizadas, se realizan en lazo abierto al sismómetro, y consisten en un método para caracterizar la respuesta en frecuencia de las etapas del circuito y del sistema en general, mediante la estimación de su densidad espectral de potencia (PSD). Para realizar esto, se inyecta una señal “Chirp” (Barrido de frecuencias o “Sweep”) en la entrada de la etapa estudiada para obtener una lectura en la salida del sistema. Posteriormente, se utiliza el método Welch [21] para estimar la PSD de la etapa. Este método divide una secuencia en segmentos, a los cuales se les aplica una ventana de tiempo (generalmente ventana Hamming) para luego calcular la FFT de cada segmento, estimando su PSD por traslapo de segmentos [21].

El barrido de frecuencias se realiza en dos tramos: entre 0.1 y 5 Hz; y entre 5 y 500 Hz. Esto se debe a que para bajas frecuencias la prueba debe tener una duración extensa, para que la menor frecuencia, que tiene el mayor periodo, logre entregar la información necesaria a la estimación de la PSD. Por lo tanto, se realiza una medición larga para bajas frecuencias y otra corta para frecuencias altas.

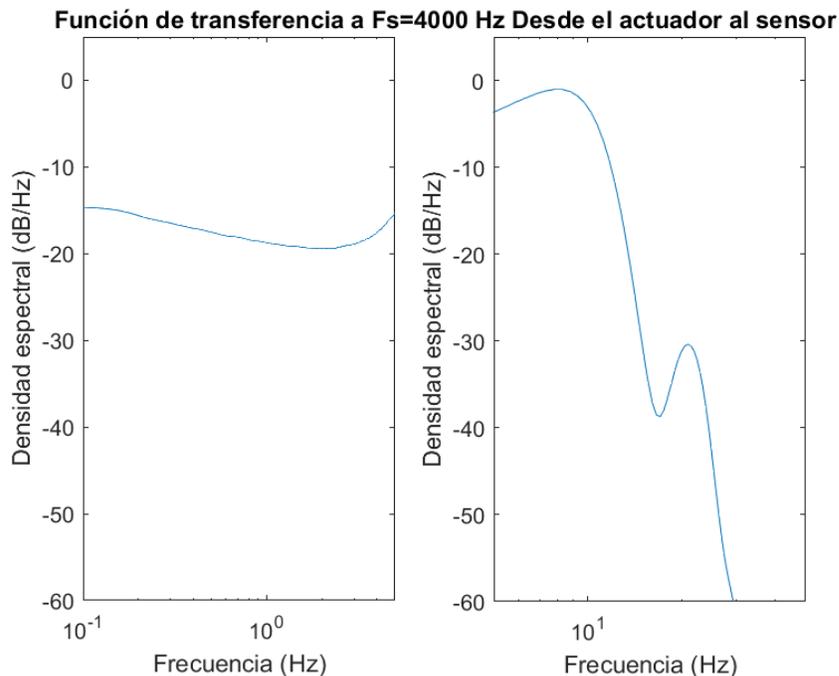
Otro aspecto importante para utilizar este método, es tener claro el largo del segmento que se utilizará para la estimación. Al igual que para seleccionar el tiempo de cada medición, se debe tener en cuenta la frecuencia de muestreo de la prueba realizada para incluir en cada segmento al menos un periodo de la menor frecuencia (0,1 Hz o 10 segundos en este caso para frecuencias bajas y 5 Hz o 0,2 segundos para frecuencias altas). El largo del segmento debe cubrir a lo menos uno de los períodos largos, siendo además óptimo que se utilicen potencias de dos como cantidad de muestras por segmento, para así optimizar el cálculo de la FFT en el método. En la Tabla 7-1 se pueden observar algunos ejemplos para considerar el largo del segmento utilizado en la aplicación de este método.

Tabla 7-1 Largo mínimo de segmentos necesarios para estimar la PSD por el método del traslapo [21], según la frecuencia de muestreo.

Frecuencia de muestreo (Hz)	Cantidad de muestras en 10	Largo del segmento	Cantidad de muestras en	Largo del segmento
10	100	$2^7$	-	-
100	1000	$2^{10}$	20	$2^5$
1000	10000	$2^{14}$	200	$2^8$
10000	100000	$2^{17}$	2000	$2^{11}$

## 7.2 Prueba de funcionamiento del sensor

En esta sección se realizan pruebas generales de funcionamiento para la transferencia desde el actuador electromecánico al sensor de desplazamiento. Según la prueba realizada, que se ilustra en la Figura 7-1, la función de transferencia presenta una respuesta que se condice en parte con la frecuencia de corte de 30 Hz de la etapa de amplificación de la señal correspondiente a la lectura de la separación de los electrodos del sensor. Se puede observar una respuesta mayor en la banda cercana a los 10 Hz, lo cual se puede deber a que el sistema entra en resonancia con su frecuencia natural de oscilación. Lo mismo se observa cuando se entra en resonancia con la frecuencia 50 Hz.

Figura 7-1 PSD a  $F_s=4000$  Hz

### 7.3 Prueba de funcionamiento al amplificador AD706.

En esta sección se comprueba la respuesta del amplificador operacional AD706 (ver Figura 2-7), el cual posee una frecuencia de corte alrededor de los 30 Hz y una ganancia de 25 veces. La prueba realizada, que se ilustra en la Figura 7-2, comprueba el correcto funcionamiento de la etapa amplificadora tanto en su frecuencia de corte como en su ganancia. Sin embargo, ocurre un fenómeno que podría considerarse indeseado al momento de realizar mediciones reales de un sismo, debido a que, al ser un filtro activo que no es de ganancia unitaria se amplifican las frecuencias que se encuentran por sobre la frecuencia de corte, por lo que el filtraje de la señal leída deja pasar una cantidad no despreciable de frecuencias que deberían filtrarse al momento de realizar las pruebas.

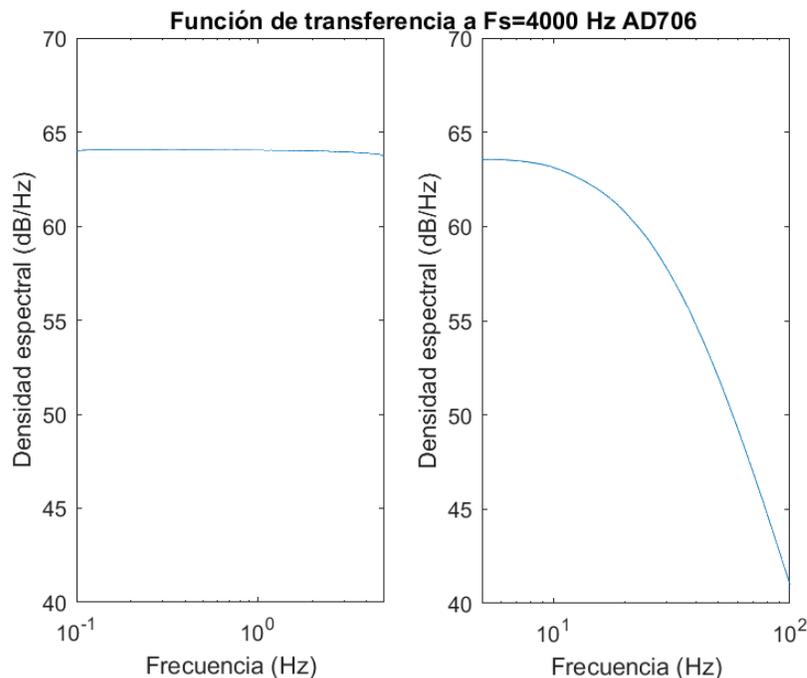


Figura 7-2 PSD AD706  $F_s=4000$  Hz

### 7.4 Prueba de funcionamiento a INAS LT1010 y LT1013

En esta sección se observa la respuesta de los amplificadores de instrumentación (INA) LT1010 y LT1013 (ver Figura 2-9). En esta prueba, se observa la señal que ingresa al actuador electromecánico al ingresar el barrido de frecuencias en la entrada del primer INA. La atenuación observada en la Figura 7-3 se debe principalmente al divisor resistivo formado entre la resistencia de  $80 \Omega$  y la resistencia propia del embobinado. Se observan además componentes que agregan energía en frecuencias altas.

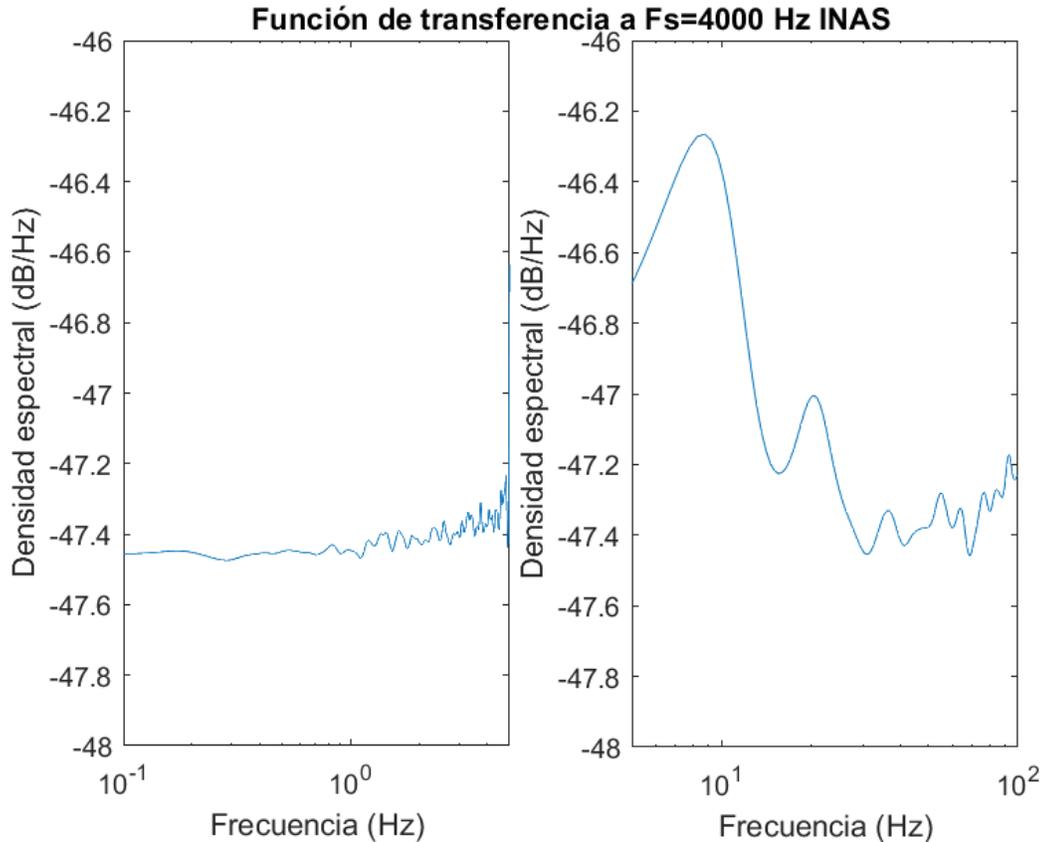


Figura 7-3 PSD transferencia de los INAS.

### 7.5 Prueba a frecuencia de muestreo alta.

En la página 18 se vio que existe una señal de comando para el circuito de capacitores conmutados de 62,5 kHz, la cual es una onda cuadrada entre -5 V y 5 V. Esto finalmente se traduce en una frecuencia de muestreo que entrega la señal proporcional a la diferencia entre los capacitores. Es por esto que se debe tener especial cuidado en la frecuencia de muestreo del sistema para tomar las muestras. En la Figura 7-4 se puede observar la PSD de la señal leída en el sensor, al ingresar un barrido de frecuencias al actuador. En esta, se observa contenido espurio correspondiente a ruido en altas frecuencias y probablemente al muestreo realizado por el pulso de comando del circuito de conmutación.

Los resultados de esta prueba confirman lo dicho más arriba sobre la implementación del AD706, donde, debido a que la ganancia del filtro activo no es unitaria, sino que, de 25 veces, el contenido en frecuencias mayores a la frecuencia de corte no se filtra completamente, sino que se encuentra menos amplificado que el contenido por debajo de la frecuencia de corte.

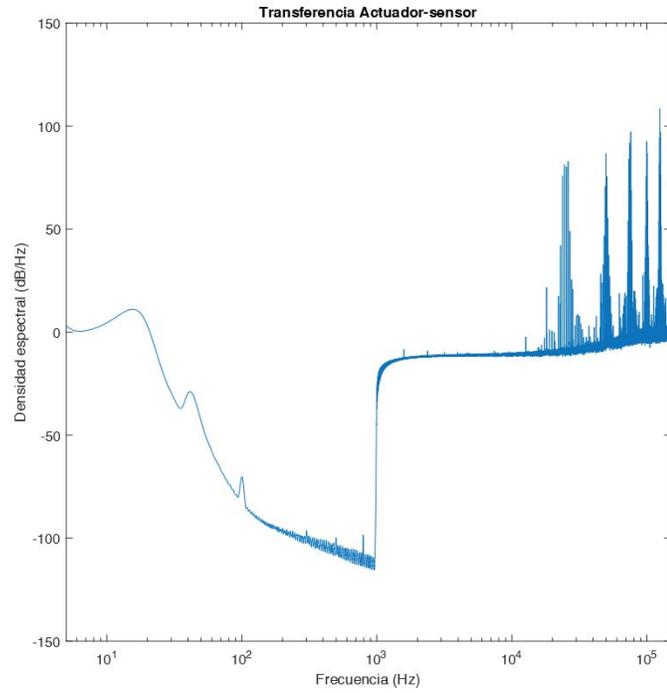


Figura 7-4 Prueba del sensor a  $F_s = 300$  kHz

## Discusión y conclusiones

Se desarrolló el prototipo de un eje de sensibilidad de un FBA triaxial simétrico. Se concluye que el diseño es factible y posee un desempeño similar al del sismómetro vertical construido por F. Vega. El sistema se encuentra impreso en PLA y debe ser migrado a una construcción con materiales de mejores propiedades mecánicas, para asegurar la rigidez de la base y soportes del sismómetro, con el fin de evitar que el sistema entre en resonancia con estructuras del sensor que puedan provocar vibraciones indeseadas. Cabe destacar que el proyecto contempla continuidad en el programa de magíster, por lo que el principal desarrollo se centró en el diseño del sismómetro, para posteriormente desarrollar el controlador del sistema, además de implementar técnicas de procesamiento digital al dispositivo.

Se rediseñó tanto el sensor capacitivo como el actuador electromecánico, los cuales presentan un funcionamiento idéntico al desarrollo de F. Vega. Se utilizó el mismo circuito de acondicionamiento para probar el funcionamiento del sismómetro en lazo abierto. El rol del actuador electromecánico es, junto con el sensor de desplazamiento, uno de los más importantes en este tipo de dispositivos, debido a que son los encargados de condicionar la realimentación del sistema de control, y de entregarle al sistema inercial masa-resorte-amortiguador la condición de balance de fuerzas. Se concluye con un funcionamiento coherente en cuanto al movimiento y medición de movimiento; así como con la acción realizada por el actuador.

Para las pruebas de lazo abierto, se analizaron respuestas en frecuencia del sensor y en sus dos etapas de acondicionamiento de señal: la pre-amplificación de la señal de diferencia en los capacitores; y la señal que ingresa al actuador electromecánico luego de pasar por los amplificadores de instrumentación LT1010 y LT1013. Para el análisis en el sensor, se concluye que, debido a las características mecánicas del dispositivo, se encuentran frecuencias de resonancia alrededor de los 10, 50 y 100 Hz. La respuesta del sensor además se condice con la etapa de filtraje que, sin embargo, se encuentra desarrollada en una misma etapa con la amplificación. Esto implica que no se atenúan completamente las frecuencias que no interesan en la lectura del sensor, como lo puede ser el ruido de alta frecuencia detectado en la Figura 7-4. Gracias a esto se concluye que se debe cambiar la etapa de pre-amplificación y filtrado por dos etapas: una de filtrado y otra de amplificación. A esto además se suma el hecho de que la señal cuadrada de comando del circuito de capacitores conmutados funciona como un muestreo a 62,5

kHz, lo cual condiciona la frecuencia de Nyquist a la que se debe muestrear la señal, peligrando la existencia de aliasing en las mediciones.

Por otra parte, se concluye que en el actuador se ingresa con un ruido en alta frecuencia, el cual no es filtrado completamente por la etapa pre-amplificadora del sensor. Por lo tanto, es recomendable rediseñar el circuito de acondicionamiento para evitar este problema, o bien, considerar el uso de filtros digitales en el procesamiento digital de las señales que se medirán a futuro.

Finalmente, como conclusión general, se puede decir que el sistema responde de la manera esperada desde el comienzo del proyecto, y se deja realizado el diseño del eje simétrico para su migración a un sensor tri-axial, el cual debe ser mejorado en cuanto a su construcción y etapas de acondicionamiento de señal, tanto en la parte análoga como digital.

# Bibliografía

- [1] M. Cisternas, B. Awater, F. Torrejón, Y. Sawai, G. Machuca, M. Lagos, A. Eipert, C. Youlton, I. Salgado, T. Kamataki, M. Shishikura, Rajendran, J. Malik, Y. Rizal y M. Husni, «Predecessors of the giant 1960 Chile Earthquake,» *NATURE*, vol. 437, pp. 404-407, 2005.
- [2] R. M. Allen, P. Gasparini, O. Kamigaichi y M. Böse, «The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview,» *Seismological Research Letters*, vol. 80, n° 5, pp. 682-693, 2009.
- [3] Infiltec, «How to Build an Inexpensive Seismometer,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.infiltec.com/seismo/>. [Último acceso: 2018].
- [4] F. J. Vega Contreras, «Prototipo de un sismómetro de fuerza balanceada,» Escuela de Ingeniería Eléctrica, PUCV, Valparaíso, 2015.
- [5] F. E. Cortés Carter, «Acelerómetro de fuerza balanceada e implementación de su algoritmo de control,» Escuela de Ingeniería Eléctrica PUCV, Valparaíso, 2016.
- [6] S. R. Vargas Farías, «Sismómetro de Fuerza Balanceada e implementación de su algoritmo de control,» Escuela de Ingeniería Eléctrica, PUCV, Valparaíso, 2017.
- [7] E. Wielandt, «Seismic Sensors and their Calibration,» [En línea]. Available: [http://www.software-for-seismometry.de/textfiles/MSOP/Seismic\\_Sensors\\_and\\_their\\_Calibration.pdf](http://www.software-for-seismometry.de/textfiles/MSOP/Seismic_Sensors_and_their_Calibration.pdf).
- [8] J. Walker, «How to build a simple seismograph to record earthquake waves at home,» *The Amateur Scientist*, 1979.
- [9] S. Gibbens, «National Geographic,» NAT GEO SITES, 2 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://news.nationalgeographic.com/2018/04/east-african-great-rift-valley-crack-spd/>. [Último acceso: 4 Abril 2018].

- 
- [10] «Sismicidad y terremotos en Chile,» Centro sismológico Nacional, Universidad de Chile.
- [11] «Ultimos Sismos,» Centro sismológico nacional Universidad de Chile, 2018. [En línea]. Available: <http://www.sismologia.cl/mobile/>.
- [12] «Fórmulas para estimar la magnitud de un sismo,» Centro sismológico nacional Universidad de Chile, 20 Abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.csn.uchile.cl/formulas-para-estimar-la-magnitud/>. [Último acceso: 2018].
- [13] B. M. Nordgren y D. F. Nelson, «Introducing the Napa Force-Balance Vertical Seismometer».
- [14] E. Wielandt, «Seismic Sensors and their Calibration,» de *New Manual of Seismological Observatory Practice - NMSOP*, IAPSEI, GFZZ German Research Centre for Geoscience, 2009, p. Chapter 5.
- [15] A. Weber, «Design, fabrication, and operation of two broadband force balance seismometers,» Louisiana State University, Louisiana, 2009.
- [16] B. Townsend, «Symmetric Triaxial Seismometers,» de *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Kanata, Ontario, Canada, Nanometrics Inc, 2014.
- [17] V. Grazier, «The Response to Complex Ground Motions of Seismometers with Galperin Sensor Configuration,» *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 99, nº 2B, pp. 1366-1377, 2009.
- [18] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors. Physics, Design, and Applications*, California: Springer, 2016.
- [19] Y. SAGY, D. JACOBSON y B. KAPLAN, «An Instrument for Continuously Measuring Capacitance,» *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, Vols. 27 de 27, nº 1, pp. 43-45, 1978.
- [20] A. Beléndez, «La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la síntesis electromagnética de Maxwell,» *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 30, nº 2, pp. 2601-1,2601-20, 2008.
- [21] J. Vignolo Barchiesi, «Introducción al Procesamiento Digital de Señales,» Ediciones Universitarias Valparaíso, Valparaíso.
- [22] E. T. J. van Weert and R. K. Munro, «Informatics and the Digital Society: Social, ethical and cognitive issues: IFIP TC3/WG3.1&3.2 Open Conference on Social,» de *Ethical and Cognitive Issues of Informatics and ICT*, Dortmund, Germany, 2003.