

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

**ACELERÓMETROS TRIAXIALES: ANÁLISIS DE
SEÑALES Y APLICACIONES FÍSICAS**

POR:
FRANCISCO MONTES FONSECA

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA
OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRO EN CIENCIAS BÁSICAS

**CHIHUAHUA, CHIH. MÉXICO
NOVIEMBRE 2019**

Acelerómetros Triaxiales: Análisis de Señales y aplicaciones Físicas. Tesis presentada por *Francisco Montes Fonseca* como requisito parcial para obtener el grado de *Maestro en Ciencias Básicas*, ha sido aprobada y aceptada por:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

M. I. Javier González Cantú

Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón

Secretario de Investigación y posgrado

M.S.I. Karina Rocío Requena Yáñez

Coordinador

Dr. Octavio Raúl Hinojosa de la Garza

Director de tesis

Noviembre 2019

Fecha

Comité:

Dr. Octavio Raúl Hinojosa de la Garza

Dra. Haydey Alvarez Allende

Dr. José Luis Herrera Aguilar

D.C. Cornelio Álvarez Herrera

©Derechos reservados

Francisco Montes Fonseca

Nuevo Campus Universitario II,31125

Chihuahua, Chih. México

Noviembre 2019

*Ohana means family.
Family means nobody gets left behind, or forgotten.*

— Lilo & Stitch

Dedicado a mis padres que sin su apoyo y ayuda no hubiera podido salir adelante a pesar de todas las dificultades que la vida me ha presentado.

También a mis hermanos, hermanas y familiares que han cuidado de mi los últimos años, dentro y fuera del hospital. A mis profesores y amigos que han estado apoyándome incondicionalmente sobre mi enfermedad, que se encuentran a mi lado en los momentos más difíciles.

Por último, lo dedico a todos los médicos y enfermeros que me salvaron la vida en el pasado evento del 2016 y 2018 donde fui operado 10 veces, en la cuales 2 de ellas fue un milagro a ver salido adelante.

- Dr. Fernando Leal*
- Dr. Hernandez Hernandez.*
- Dr. Levi*
- Dr. Granados*
- Enfermero Pedrito*
- Enfermera Cony Tryjullo*

y todas las personas del hospital que me dieron esperanzas, me curaron y me regresaron a la vida para seguir luchando y cumpliendo metas.

*We have seen that computer programming is an art,
because it applies accumulated knowledge to the world,
because it requires skill and ingenuity, and especially
because it produces objects of beauty.*

— Donald E. Knuth [6]

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Ivan Levi Templeton Olivares del Centro de Investigaciones de Materiales Avanzados (CIMAV) por su apoyo en la utilización de la cama de vibración para realizar las pruebas de validación.

De igual manera se agradece al Dr. Octavio Hinojosa de la Garza, investigador de la UACH, por la asesoría e información brindada para el desarrollo de este trabajo. Se agradece también al Ing. Hector Lozano, estudiante de posgrado en la UACH, por su ayuda durante análisis de señales en la validación de los sensores realizada en el CIMAV.

RESUMEN

Debido a la sismicidad reciente en el Estado de Chihuahua, surge la necesidad de replantear un análisis en las normas utilizadas para el diseño y construcción de edificaciones. Haciendo una revisión detallada de todas las infraestructuras de grandes dimensiones (como edificios, hospitales y presas) con el fin de implementar planes de contingencia de eventos sísmicos potencialmente peligrosos mediante prácticas de evacuación en escuelas para concientizar a la población.

Este trabajo muestra el desarrollo de un dispositivo diseñado y elaborado en la ciudad de Chihuahua, con el cual, es posible registrar movimientos sísmicos y prevenir a la población con el mayor tiempo de anticipación posible, así como dar la pauta en las investigaciones para entender los efectos de las aceleraciones en las edificaciones.

CONTENIDO

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | OBJETIVOS | 1 |
| 2 | HIPÓTESIS | 3 |
| 3 | TEORÍA | 5 |
| 3.1 | Introducción | 5 |
| 3.1.1 | Sismología | 5 |
| 3.1.1.1 | Historia de la Sismología | 5 |
| 3.1.1.2 | Conceptos Básicos de Sismología | 8 |
| 3.1.2 | Acelerómetros Piezoeléctricos MEMS | 11 |
| 3.1.3 | Lenguaje de Programación | 14 |
| 3.1.4 | Análisis de vibraciones | 15 |
| 3.2 | Sismología | 15 |
| 3.2.1 | Tensor de Esfuerzos | 18 |
| 3.2.1.1 | Relación Tensión-Esfuerzo | 22 |
| 3.2.2 | Ecuación de Onda Sísmica | 24 |
| 3.2.3 | Polarización de ondas P y S | 29 |
| 3.2.4 | Sismo gramas Sintéticos | 30 |
| 4 | MATERIALES Y MÉTODOS | 33 |
| 4.1 | Hardware | 34 |
| 4.1.1 | O'navi | 34 |
| 4.1.2 | Dispositivo SparkFun IMU Razor 9DoF | 36 |
| 4.1.3 | Microcontroladores y Microprocesadores | 39 |
| 4.2 | Software | 42 |
| 4.2.1 | Lenguaje C++ sobre IDE Arduino | 42 |
| 4.2.2 | Python | 44 |
| 4.2.3 | Almacenamiento de información | 47 |
| 4.3 | Prototipos | 47 |
| 4.4 | Trasformación de ejes a un mismo plano | 48 |
| 5 | ANÁLISIS Y RESULTADOS | 53 |
| 5.1 | Validación de sensores | 53 |
| 5.2 | Modelos 3D para dispositivos | 59 |
| 5.3 | Resultados preliminares del estudio en la ciudad de Chihuahua, Chih. | 61 |
| 6 | CONCLUSIÓN | 65 |
| | REFERENCIAS | 67 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|---------|--|----|
| Tabla 1 | Comparación de características y especificaciones entre los dispositivos O'navi y SparkFun IMU Razor 9DoF. | 35 |
|---------|--|----|

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Primer detector de ondas sísmicas con un sistema de péndulo que deja caer una pequeña pelota en la dirección del movimiento. | 6 |
| Figura 2 | Cambio de velocidad en las ondas P y S al atravesar las capas de la tierra. Modelo Preliminar de Referencia de la Tierra (PREM) de Dziewonski y Anderson (1981). | 8 |
| Figura 3 | Representación gráfica del manto y núcleo de la Tierra. | 9 |
| Figura 4 | Sismograma donde se registran la intensidad, duración y otras características de un movimiento sísmico. | 10 |
| Figura 5 | Mecanismos focales más comunes de un sismo. | 11 |
| Figura 6 | Diseño esquemático de un acelerómetro. . | 13 |
| Figura 7 | Las ondas de cuerpo, (a) y (b), son el movimiento de partículas en dirección longitudinal y transversal, Ondas P y S , dentro de la Tierra. Cuando éstas llegan a la superficie se generan las ondas Love y Rayleigh, (c) y (d). | 16 |
| Figura 8 | Distribución de placas tectónicas en la Tierra. | 17 |
| Figura 9 | Planos de referencia para el vector normal $\hat{\mathbf{n}}$. Donde la normal de \mathbf{t} al plano se llama <i>esfuerzo normal</i> (<i>normal stress</i>) y donde es paralelo se llama <i>esfuerzo de corte</i> (<i>shear stress</i>) | 18 |
| Figura 10 | Los vectores de tracción $\mathbf{t}(\hat{\mathbf{x}})$, $\mathbf{t}(\hat{\mathbf{y}})$ y $\mathbf{t}(\hat{\mathbf{z}})$ describen las fuerzas que actúan en un cubo infinitesimal de un plano cartesiano. | 18 |
| Figura 11 | Desplazamiento del punto de referencia $\mathbf{u}(\mathbf{x}_0)$ a una distancia $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ | 20 |
| Figura 12 | Los componentes fuera de la diagonal de \mathbf{e} causan una deformación de corte. | 21 |
| Figura 13 | Los componentes de Ω causan una rotación rígida. | 21 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 14 | La fuerza en la (x_2, x_3) cara de un cubo infinitesimal esta dado por $t(\hat{x}_1) dx_2 dx_3$ | 25 |
| Figura 15 | Desplazamiento de la Onda P en el material donde la propagación genera un cambio de volumen y forma. | 29 |
| Figura 16 | Desplazamiento de la Onda S polarizado en dirección vertical (onda SV) donde la propagación genera un cambio de forma solamente. | 30 |
| Figura 17 | Diagrama de materiales y métodos para el desarrollo final de los prototipos en los proyectos Volcano y Odín. | 33 |
| Figura 18 | Ruido en la señal de los acelerómetros MEMS en distintos dispositivos. | 37 |
| Figura 19 | Proyecto Odín para la sincronización a través de internet y almacenamiento en la nube. | 39 |
| Figura 20 | Proyecto Volcano para la sincronización mediante un RTC y almacenamiento en una memoria microSD. | 40 |
| Figura 21 | RaspberryPi 3 GPIO (Entrada/Salida de Propósito General). | 46 |
| Figura 22 | En la imagen se observa el proceso de modelado en 3D a través del CAD Fusion 360 y la impresión final con FDM. | 49 |
| Figura 23 | Colocación de sensores en dirección al Norte en el Eje Y del sensor SparkFun. | 50 |
| Figura 24 | Dirección y sentido en que se aplican los ángulos de rotación. | 51 |
| Figura 25 | Montaje de los dispositivos SparkFun en los ejes X, Y y Z sobre la plataforma de vibración, figuras (A), (B) y (C). | 53 |
| Figura 26 | Montaje de los dispositivos SparkFun en plataformas con distintas inclinaciones sobre la cama de vibración del CIMAV. | 54 |
| Figura 27 | Espectro generado por la cama de vibración con los parámetros introducidos en el equipo del CIMAV. | 55 |
| Figura 28 | Gráficas a diferentes frecuencias en el eje Z. | 56 |
| Figura 29 | Gráficas de los 3 sensores en el mismo eje Z a 40Hz. | 56 |
| Figura 30 | Gráficas en los ejes X, Y y Z a 40Hz. | 57 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 31 | Gráficas para un ángulo de 30° en el eje Y a 40Hz. | 58 |
| Figura 32 | Gráficas para un ángulo de 60° en el eje Y a 40Hz. | 58 |
| Figura 33 | Gráficas para un ángulo de 15° en el eje X con 30° en el eje Y a 40Hz. | 59 |
| Figura 34 | Carcasas para el dispositivo del proyecto <i>Odín</i> (A) y el proyecto <i>Volcano</i> (B). | 60 |
| Figura 35 | Ensamble de los componentes del proyecto <i>Odín</i> (A) y proyecto <i>Volcano</i> (B). El proyecto <i>Odín</i> , incluye el uso de un RaspberryPi 4 y el sensor SparkFun IMU Razor 9DoF conectados con un cable MicroUSB a USB. El proyecto <i>Volcano</i> , utiliza un RaspberryPi Zero, un RTC y el sensor SparkFun IMU Razor 9DoF. | 60 |
| Figura 36 | Localización de sensores en la ciudad de Chihuahua, Chih. | 61 |
| Figura 37 | Gráficas de los 3 ejes para un solo sensor antes y después de aplicar la rotación según su inclinación calculada. | 62 |
| Figura 38 | Registro de la señal en el eje Z después de la rotación en los 3 sensores colocados en la Chihuahua, Chih. (azul) comparado contra el registro de la estación del SSN en Casas Grandes, Chih. (gris) para el día 25 de abril de 2018. | 63 |

OBJETIVOS

Objetivo general

Generar un mapeo tridimensional de las intensidades en vibraciones sísmicas utilizando acelerómetros triaxiales MEMS.

Objetivos particulares

1. Ensamblar un dispositivo móvil equiparable a los sensores sísmicos del proyecto O'navi de la universidad de Stanford.
2. Validación de las curvas de calibración del equipo.
3. Utilizar la caracterización del fondo natural para encontrar valores atípicos.
4. Generar una base de datos espacial con los valores atípicos de interés.
5. Mapeo de la base de datos para su interpretación.

HIPÓTESIS

Si es posible utilizar los ángulos de Euler para obtener las intensidades vibracionales en los ejes principales al plano tangencial con dirección al norte, entonces es posible utilizar acelerómetros MEMS para modelar estas intensidades sobre los ejes principales utilizando los ángulos del dispositivo.

TEORÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

3.1.1 *Sismología*

La sismología es el estudio de la generación y propagación de ondas elásticas que se enfoca en el registro de señales sísmicas y localización de las fuerzas que las producen, ya sea en la Tierra u otros objetos celestes. La Tierra está compuesta principalmente por aleaciones de silicato y hierro, los cuales, bajo las condiciones terrestres de presión y temperatura se comportan de una manera cuasi-elástica con la aplicación de fuerzas de poca magnitud, pero de una manera viscosa con la aplicación de magnitudes fuertes. En este trabajo consideramos a la tierra como un cuerpo con comportamiento elástico. Un ejemplo sencillo a este comportamiento, es imaginar que la tierra "suena como una campana", donde un cualquier movimiento o "impacto" causa ondas vibracionales que viajan a través de ella y puede producir resonancia. [15]

La vibración mecánica, que es el movimiento de un cuerpo sólido alrededor de una posición de equilibrio, en un medio cuasi-elástico favorece la propagación de las mismas ondas elásticas en su interior. La amplitud de estas ondas pueden ser medidas con instrumentos de precisión como son los sismómetros. Los sismómetros toman registros del movimiento en la tierra (terremotos, erupciones volcánicas, etc.) y se han utilizado para comprender mejor la naturaleza del interior de la Tierra, debido a que los registros muestran cambios de velocidad en las ondas elásticas a diferentes profundidades infiere la existencia de distintas capas en la Tierra con características químicas y físicas propias.

3.1.1.1 *Historia de la Sismología*

Históricamente, los avances en la sismología han permitido investigar la estructura interna de la Tierra, pero ha sido difícil superar los inconvenientes en el análisis de señal debido a la complejidad de las fuentes. La sismología proporciona intrínse-

En 1969 se colocaron acelerómetros en el Apollo 11 con los cuales de caracterizó la estructura interna en la Luna.

camente información sobre los procesos actuales y activos en la Tierra, también se obtienen las características de las fallas sísmicas como su orientación, sentido de deslizamiento y desplazamiento acumulativo que juegan un papel importante para el estudio de la teoría tectónica de placas.

Los chinos tuvieron el primer detector de ondas sísmicas funcional alrededor del año 132 AC, construido por el inventor chino Zhang Heng[15], [Figura 1](#). Este dispositivo antiguo tenía forma de jarrón, con varias cabezas en bronce de dragones, cada una con una pelota de bronce en su boca; alrededor de la base tenía varios sapos de bronce con las bocas abiertas. Entonces, si la máquina detectaba un temblor de la tierra, automáticamente, una bola de bronce se soltaba y caía en la boca de uno de los sapos. La posición donde caía la bola, en cuestión, indicaba la dirección de la cual procedía el temblor.

Se dice que el primer detector de ondas sísmicas logro identificar la dirección de un sismo que sacudió a Kasu a 600 km de distancia. [1]

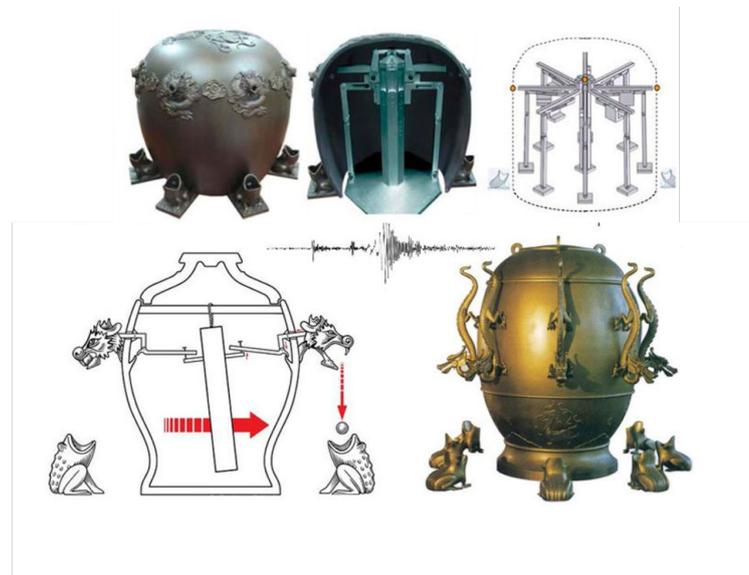


Figura 1: Primer detector de ondas sísmicas con un sistema de péndulo que deja caer una pequeña pelota en la dirección del movimiento.[1]

El sismógrafo fue inventado por el físico James David Forbes en 1842, pero es a John Milne al que se le acredita el diseño del sismógrafo de péndulo horizontal en 1880, diseño que permitía un registro de tiempo durante los sismos. Posteriormente, la primera observación de un terremoto lejano, o telesismo, fue hecha en Potsdam en 1889, 15 minutos después de que un terremoto ocurriera en Japón. Para 1892 John Milne desarrolló un nuevo diseño de un sismómetro compacto que fue colocado en

40 observatorios alrededor del mundo, así nació la primera red de registro con datos sismológicos globales.[12]

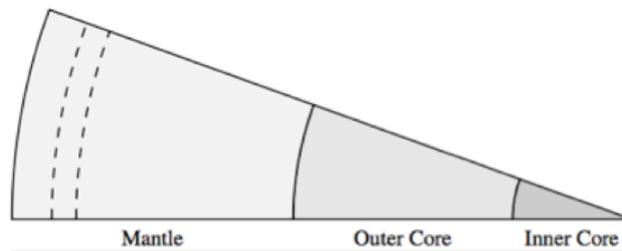
En 1898, E. Wiechert introdujo el primer sismómetro con amortiguamiento viscoso, capaz de producir registros útiles durante la completa duración de un terremoto. Para 1909 Mohorovicic descubrió un cambio abrupto de velocidades entre las capas de la Tierra que ahora conocemos como el "Moho" y se interpreta como la base de la corteza. En 1906 Richard Oldham descubrió el núcleo de la Tierra, en 1914 Beno Gutenberg determinó con precisión la profundidad hasta el núcleo líquido con aproximadamente 2900 Km (actualmente el valor aceptado es de 2889 Km) y en 1936 Inge Lehmann comprobó que el núcleo interno es sólido.[12][15]

Sir Harold Jeffreys revisó los tiempos de arribo en distintas estaciones sísmicas (al suceder un terremoto) y desarrolló la primera sección transversal detallada de la superficie al centro de la Tierra en 1939. Estas tablas de tiempo de arribo se conocen como las **tablas Jeffreys-Bullen (J-B)**, las cuales predicen los tiempos de llegada de las ondas *P* a cualquier punto en la superficie de la Tierra con una notable precisión del 99.8%. [15]

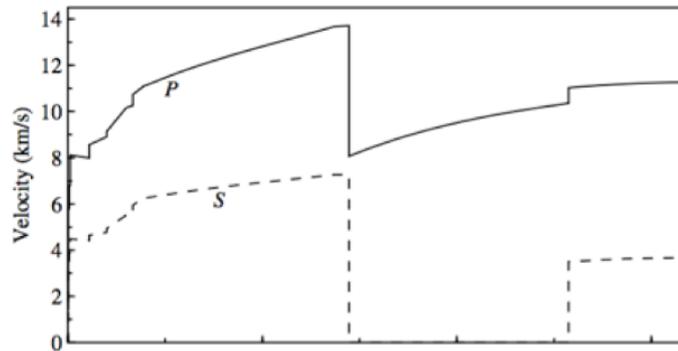
La corteza de la Tierra varía desde los 6 km de grosor, bajo los océanos, hasta 30-50 km debajo de los continentes. El interior de la Tierra se divide en tres capas principales: el manto, el núcleo externo y el núcleo interno, [Figura 2a](#). El manto es en su mayoría roca sólida, ocupa el 84% del volumen de nuestro planeta y 68% de la masa. Se caracteriza por un aumento de velocidad bastante rápido en el manto superior entre los 300 y 700 km de profundidad, región denominada zona de transición. Entre los 700 km y cerca del límite manto-núcleo (CMB), las velocidades aumentan gradualmente con la profundidad, que es lo esperado de acuerdo a los cambios en la presión y la temperatura de las rocas. Se cree que el núcleo de la Tierra está compuesto principalmente de hierro y el límite del núcleo interno (ICB) representa un cambio de fase en el hierro a una estructura cristalina diferente. Cuando las ondas *S* entran en el núcleo exterior cambian dramáticamente de 7 km/s a cero, esto se debe a la interfaz entre la roca sólida y el fluido del núcleo externo, vea [Figura 2b](#). [12]

En 1910, Reid enunció la **teoría del rebote elástico** de la falla del terremoto. A mediados de la década de los treinta, Richter desarrolló la primera medida cuantitativa del tamaño relativo de un terremoto, la escala de magnitud local (ML), conocida como la "*magnitud de Richter*", que es una escala log-

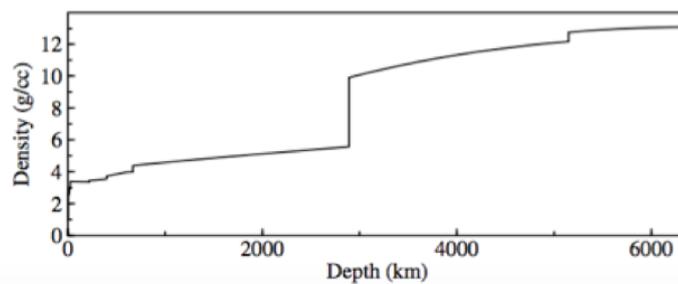
La teoría del rebote elástico se refiere las vibraciones producidas cuando las rocas deformadas vuelven a su forma original.



(a) Capas internas de la Tierra.



(b) Velocidad de las ondas P y S según la profundidad.



(c) Densidad de la Tierra según la profundidad.

Figura 2: Cambio de velocidad en las ondas P y S al atravesar las capas de la tierra. Modelo Preliminar de Referencia de la Tierra (PREM) de Dziewonski y Anderson (1981). [12]

arítmica donde terremotos pequeños que raramente se sienten en la superficie tienen magnitudes alrededor de 3. Para 1940, la distribución global de los terremotos se trazó con precisión, definiendo claramente los principales cinturones de actividad que ahora asociamos con los límites entre las placas superficiales de la litosfera. [15]

3.1.1.2 Conceptos Básicos de Sismología

La Tierra está compuesta por distintas capas con materiales y características propias, que varía de acuerdo a la zona y la pro-

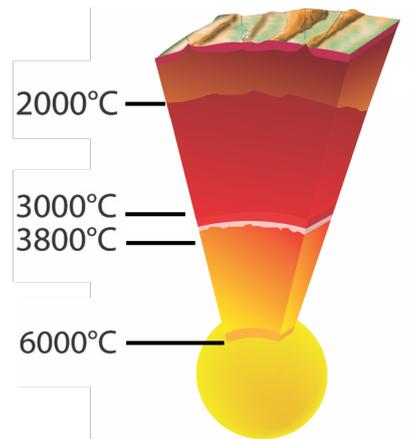


Figura 3: Representación gráfica del manto y núcleo de la Tierra. [9]

fundidad. Su clasificación se muestra en la [Figura 3](#), teniendo 3 capas principales: corteza, manto y núcleo.

- La **corteza** es la capa más externa y delgada de la Tierra, dentro de la corteza existen 2 clasificaciones: la corteza continental y la corteza oceánica. La corteza continental tiene un espesor hasta de 70 km y su superficie es heterogénea. La corteza oceánica es en su mayoría homogénea y tiene un espesor entre 5-10 km.
- El **manto** se detectó gracias a su naturaleza con mayor densidad que la corteza, lo que ocasiona un aumento en la velocidad de las ondas sísmicas al atravesarla, la interfaz entre la corteza y el manto se le conoce como Moho. El manto se comporta casi como un sólido debido a su alta viscosidad y su temperatura varía entre los 600°C hasta los 3500°C, entre los límites con la corteza y el núcleo. El manto se divide en 2 zonas: el manto superior y el manto inferior. El manto superior inicia en la discontinuidad del Moho y puede alcanzar profundidades superiores a 400 km, donde las ondas sísmicas viajan alrededor de una velocidad de 8 km/s después del Moho y se atenúan entre los 50 y 200 km de profundidad. El manto inferior se extiende hasta la *discontinuidad de Gutenberg* y su temperatura varía de 1000°C a 3000°C, en este caso ocurren solo pequeños cambios en la velocidad de ondas sísmicas.
- El **núcleo** tiene un radio aproximado entre 3200 y 3500 km, su temperatura puede superar los 6700°C y consta de un núcleo externo líquido y un núcleo interno sólido, separados por la *discontinuidad de Lehmann*. Se cree que

La discontinuidad de Gutenberg es la división entre manto y núcleo de la Tierra, situada a unos 2900 km de profundidad. Se caracteriza porque las ondas sísmicas S no pueden atravesarla.

el núcleo externo es líquido con temperaturas entre los 4000°C y 5000°C , una prueba de esto es que las ondas S no pueden viajar en su interior, y que la convección del núcleo externo, combinada con el movimiento ocasionado por la rotación de la Tierra (efecto Coriolis¹), causa el campo magnético terrestre. Se propone que el núcleo interno está compuesto principalmente por hierro sólido y su temperatura está entre 5000°C y 7000°C (mayor a la temperatura de la superficie del Sol).

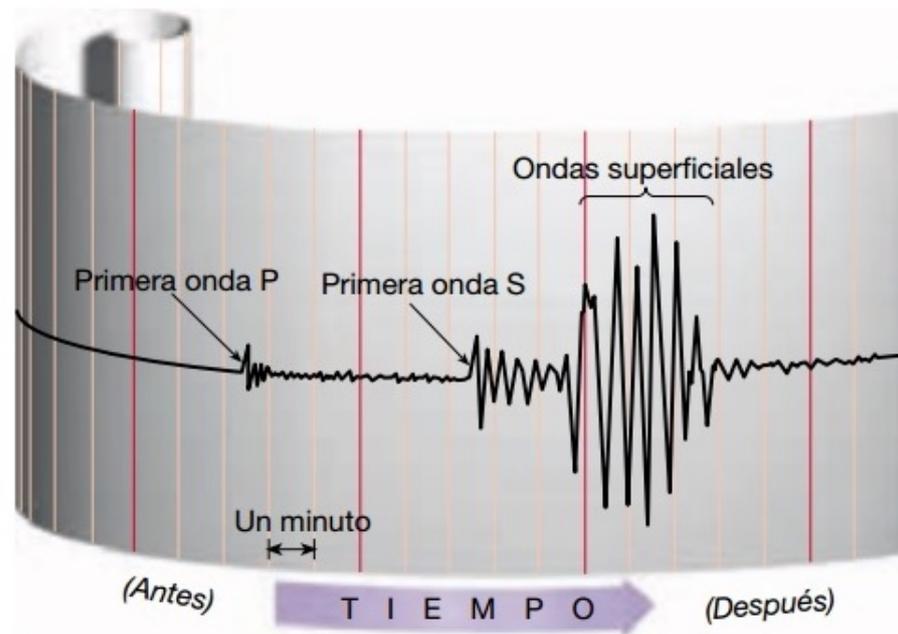


Figura 4: Sismograma donde se registran la intensidad, duración y otras características de un movimiento sísmico. [2]

La sismología proporciona la mejor resolución de la estructura interna de la Tierra, debido a que las ondas elásticas tienen la longitud de onda más corta que cualquier "onda geofísica". Esto permite registrar el movimiento terrestre en función del tiempo, lo que se conoce como sismometría y a las gráficas producidas con esta información se les llama sismogramas [15], Figura 4. Existe un rango muy grande de escalas consideradas en la sismología, que consideran el origen y tipo de onda que se propaga, para fines prácticos se utiliza el **momento sísmico** que es igual al producto entre la superficie de falla, la rigidez de la

¹ El efecto Coriolis se observa en un sistema de referencia en rotación cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia.

roca y el promedio del desplazamiento de la falla, los microterremotos tienen un momento sísmico en el orden de 10^5 Nm y para grandes terremotos de 10^{23} Nm. Las amplitudes de movimiento de las ondas sísmicas son proporcionales al momento sísmico y las frecuencias de interés en la sismología están entre los 200 y 10^7 Hz, aunque también existen frecuencias entre 3×10^{-4} y 2×10^{-5} Hz producidas por grandes terremotos y la marea terrestre, respectivamente.[15]

La sismología también estudia el **mecanismo focal** de los sismos, que describe la dirección de desplazamiento de la tierra durante el sismo. Se registra un terremoto en las distintas estaciones alrededor del epicentro y de acuerdo a la polaridad observada se define el tipo de movimiento que se llevó a cabo durante el sismo, se utilizan pelotas de playa para representar estas direcciones de desplazamiento, [Figura 5](#).

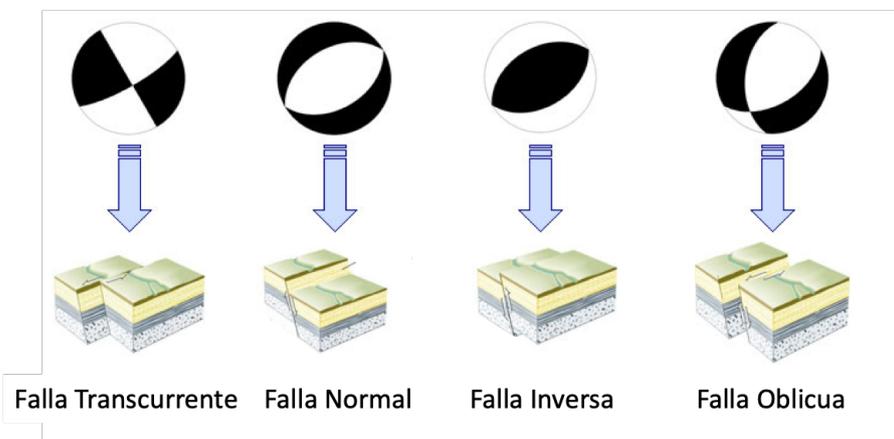


Figura 5: Mecanismos focales más comunes de un sismo.[3]

3.1.2 Acelerómetros Piezoeléctricos MEMS

Un acelerómetro es un dispositivo electromecánico que cuantifica las fuerzas de aceleración que recibe, tiene niveles de sensibilidad hasta décimas de micrones, la unidad principal en que se toman las mediciones son de gravedad (g 's). Siendo los acelerómetros MEMS (Micro Electro-Mechanical System) uno de los dispositivos electromecánicos más simples.

El primer acelerómetro, basado en una pila de carbono, fue desarrollado en 1923 por McCollum y Peters[14] [8]. Su peso era alrededor de una libra y sus dimensiones eran de $3/4 \times 1-7/8 \times 8-1/2$ pulgadas. Consistía en un marco en forma de E que contiene de 20 a 55 anillos de carbono en un medio puente de

Wheatstone, el cual es un circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. El puente de Wheatstone se encontraba entre la parte superior y la sección del bastidor, tenía una frecuencia de resonancia menor a 2,000 Hz y fue utilizado en puentes, dinamómetros y aeronaves.

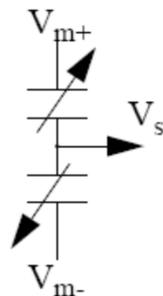
En 1936, Southwark anunció un nuevo modelo de acelerómetro con dos ejes y “amortiguación ajustable” en rangos de 100 g. Sin embargo, el dispositivo no se comercializó hasta que, de manera independiente, Arturo Ruge del MIT (en 1938) y Edward Simmons de Caltech (en 1936) desarrollaron el extensómetro; este dispositivo es un sensor que mide la deformación, presión, carga, posición, etc. El extensómetro se basa en el efecto piezorresistivo, que es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a ciertos esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos[13].

A finales de los años 40's y principios de los 50's se fundaron numerosas compañías fabricantes de acelerómetros piezoeléctricos, algunos de los más importantes fueron: Brüel & Kjær (B&K), Gluton Factory, la compañía de instrumentos Kistler, PCB Piezotronics, Endevco y Wilcoxon Research. A continuación de presentan las primeras empresas en fabricar acelerómetros [16]:

- **Brüel & Kjær (B&K)**, diseñó sus primeros acelerómetros piezoeléctricos en 1943 a partir de cristales de sal de Rochelle (solubles en agua) montados como placas plegables cuadradas con una esquina o un lado libre y a veces cargado con pesos fijos. Sus sensibilidades fueron de 35-50 mV/g y sus frecuencias de resonancia fueron de 2-3 kHz.
- **Gluton Factory**, junto con la colaboración del laboratorio del MIT patentaron en 1946 la formulación de titanio de bario en forma de lámina como primer reemplazo, hecho por el hombre, para cristales piezoeléctricos naturales.
- **La compañía de instrumentos Kistler**, alrededor de 1965, puso en venta el primer acelerómetro potable comercial con FET (transistor de efecto de campo) integrado de 2 hilos.

- **PCB Piezotronics**, en 1971 fue el primero en colocar la tecnología ICP (interruptor de control de potencia) en un acelerómetro de choque de 100,000 g.
- **Endevco**, sus principales áreas de tecnología en el acelerómetro han sido la microminiaturización, alto choque, alta temperatura y desarrollo de calibraciones.
- **Wilcoxon Research**, donde uno de los fundadores (Fred Schloss) inventó el cabezal de impedancia mecánica auto impulsado. Este cabezal fue desarrollado para soportar el estudio de las características de amortiguación del ruido en soportes de aislamiento de vibraciones para la maquinaria a bordo. El cabezal tenía un transductor de fuerza piezoeléctrico, un acelerómetro y un generador de vibración controlable.

El desarrollo de acelerómetros MEMS marcaron un cambio importante en el análisis de vibraciones sísmicas, este dispositivo consiste de un sistema en suspensión y una masa de prueba donde se mide la deflexión obtenido la aceleración, existe una amplia variedad de estos dispositivos con gamas que pueden medir hasta miles de g's, además de contener uno, dos o tres ejes de medición. Estos dispositivos se utilizan para medir cambios de velocidad respecto al tiempo (aceleraciones) y para el control de mecanismos de vibración. Algunas funciones de estos acelerómetros son la medición de vibraciones en los automóviles, máquinas, edificios, sistemas de control y las instalaciones de seguridad entre otros procesos. También, pueden ser utilizados en otras áreas para medir vibraciones sísmicas, inclinaciones, distancia dinámica y velocidad con o sin influencia de la gravedad (los acelerómetros que se utilizan para medir la gravedad se llaman gravímetros). [11]



La aceleración es medida por el desplazamiento de la masa sísmica (ver fig. 6).[11]

Figura 6: Diseño esquemático de un acelerómetro. [11]

En la actualidad, el uso de los acelerómetros ha mejorado de una manera sorprendente y son parte de nuestra vida cotidiana. Por ejemplo, la mayoría de los teléfonos inteligentes cuentan con este sensor el cual les permite conocer la dirección en la que se encuentran y rotar la pantalla o interactuar con algunas aplicaciones. Además, existen acelerómetros comerciales de bajo costo que pueden conectarse a una red de nivel mundial para colaborar en proyectos como el Quake Catcher Network (QCN), enfocado al aprendizaje escolar, el proyecto permite utilizar una red interactiva en línea y analizar los datos sísmicos.[16]

3.1.3 *Lenguaje de Programación*

De acuerdo a la Real Academia Española el lenguaje es la facultad del ser humano de expresarse y comunicarse con los demás a través del sonido articulado o de otros sistemas de signos. Sin embargo, dentro de la informática se entiende como el conjunto de signos y reglas que permite la comunicación con una computadora. [5]

Esto significa que el lenguaje de programación es la forma de comunicación entre las personas y las computadoras que permiten la solución de problemas empleando operaciones básicas o comandos (ordenes) que la computadora interpreta y realiza. Dentro de la ciencia es fundamental el uso de la programación científica para el análisis de datos que un humano tardaría miles de años en realizar, a la persona que realiza la programación se le conoce como programador. Los lenguajes utilizados por el programador pueden ser orientados a objetos, según las necesidades del usuario, algunos ejemplos son Python, C++ y Fortran entre otros. Sin embargo, la computadora no comprende directamente el lenguaje del programador, el código escrito debe traducirse al código binario o algún otro idioma capaz de comprender e interpretar por el hardware de la computadora.

Actualmente, el lenguaje más utilizado en la ciencia para la programación científica es Python, orientado a objetos, que es bastante robusto y amigable al mismo tiempo. Otro lenguaje común es C++ que es utilizado para la mayoría de los micro controladores tales como Arduino o sistemas embebidos. Ambos ejemplos cuentan con amplias librerías de funciones específicas pre-programadas que pueden ser utilizadas por el usuario, facilitando así el desarrollo de nuevos programas.

3.1.4 *Análisis de vibraciones*

Se llama vibración a la propagación de ondas elásticas que produce tensiones y deformaciones en un medio continuo como el aire, agua y algunos sólidos, entre otros. Cada medio de propagación se comporta de distinta manera y estudiando las vibraciones que pasan a través de ellos se pueden conocer características como la densidad, estructura o resonancia del material de una manera no destructiva, además de tener aplicaciones en la industria como la localización de fracturas, huecos, medición de espesores e identificación de materiales sin la necesidad de tener que realizar perforaciones.

El estudio de señales vibracionales ha sido utilizado para detectar frecuencias de resonancia en maquinarias o construcciones, mejorando los equipos y la estructura de las edificaciones, también se realizan estudios para evaluar daños en edificios por causas naturales o artificiales. En el área de la sismología, el análisis de vibraciones permite conocer las propiedades y características de las capas internas de la tierra, modos normales, localización de las placas tectónicas y fallas, además de poder desarrollar alarmas que puedan prevenir a la población en caso de algún sismo. Existen más aplicaciones desde la identificación de grandes explosiones con localización de su origen desde distancias remotas hasta estudios de objetos fuera de la Tierra como el sol, llamada helio sismología que consiste en el análisis de señales que provienen de la superficie del Sol.

3.2 SISMOLOGÍA

La sismología se basa en metodologías matemáticas para resolver sistemas de ecuaciones como la teoría geofísica inversa. Los problemas sísmicos inversos infieren las características de la fuente o del medio de propagación de la onda a partir de operaciones matemáticas derivadas de la teoría elastodinámica a los movimientos observados en la superficie de la Tierra.

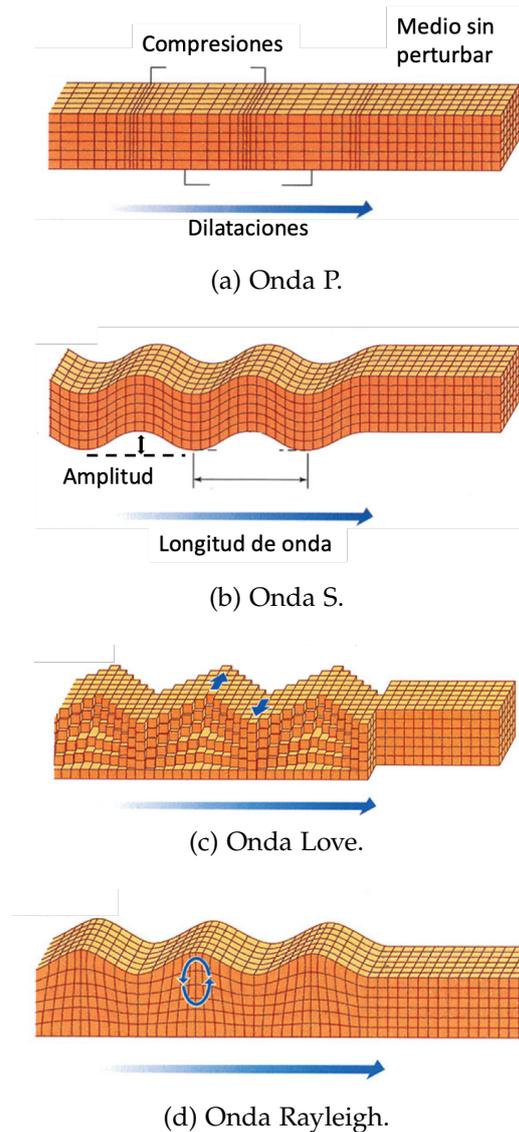


Figura 7: Las ondas de cuerpo, (a) y (b), son el movimiento de partículas en dirección longitudinal y transversal, Ondas P y S, dentro de la Tierra. Cuando éstas llegan a la superficie se generan las ondas Love y Rayleigh, (c) y (d). [4]

El estudio formal sobre la propagación de ondas elásticas comenzó a inicios de 1800s con científicos como Cauchy, Poisson, Stokes, Rayleigh, entre otros, que describieron los principales tipos de onda que se esperan en materiales sólidos.[12] En 1830, Poisson usó las ecuaciones de movimiento y leyes elásticas constitutivas para demostrar que solo existen 2 tipos de ondas fundamentales que pueden propagarse en el interior de sólidos homogéneos: ondas P (ondas de compresión que implican perturbaciones volumétricas) y ondas S (ondas de corte que sólo causan deformación pero sin cambio de volumen, no

se pueden propagar en fluidos). Estos 2 tipos de onda se le llaman ondas de cuerpo porque viajan a través del interior de la Tierra, ver [Figura 7a](#) y [Figura 7b](#). En 1887, Lord Rayleigh demostró la existencia de soluciones adicionales de las ecuaciones elásticas de movimiento para cuerpos con superficies libres, llamadas ondas Rayleigh. Posteriormente, en 1911 se caracterizó un segundo tipo de movimiento de onda en la superficie, llamado ondas Love. Las ondas Rayleigh y Love son ondas de superficie y son el resultado de la interacción entre las ondas P y S, [Figura 7c](#) y [Figura 7d](#). [15]

El aumento de estaciones sísmicas a principios de 1900s, permitió localizar rutinariamente grandes terremotos creando una red global de sismos, lo que condujo al descubrimiento de la distribución de los terremotos, que tienden a ocurrir a lo largo de cinturones bien definidos. Sin embargo, la importancia de estos cinturones no fue plenamente apreciada hasta la década de 1960s, como parte de la revolución tectónica de placas en las ciencias de la Tierra. En ese momento se reconoció que las características superficiales de la Tierra están en gran medida determinadas por los movimientos de un pequeño número de placas relativamente rígidas que se desplazan lentamente durante un tiempo geológico [Figura 8](#). [12]



Figura 8: Distribución de placas tectónicas en la Tierra. [7]

3.2.1 Tensor de Esfuerzos

Considerando un plano infinitesimal en un medio homogéneo elástico en equilibrio estático, las deformaciones en materiales tridimensionales se denominan *tensión* y las fuerzas internas entre las diferentes partes del medio se llaman *esfuerzo*. La fuerza por unidad de área ejercida en dirección al plano $\hat{\mathbf{n}}$ (Figura 9) se denomina *tracción* y está representado por el vector $\mathbf{t}(\hat{\mathbf{n}}) = (t_x, t_y, t_z)$. [12] (Ver Figura 10)

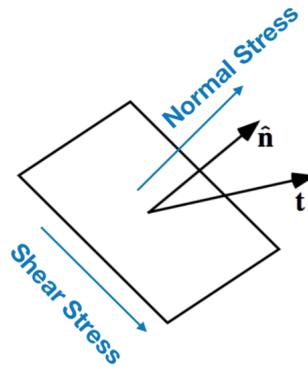


Figura 9: Planos de referencia para el vector normal $\hat{\mathbf{n}}$. Donde la normal de \mathbf{t} al plano se llama *esfuerzo normal* (*normal stress*) y donde es paralelo se llama *esfuerzo de corte* (*shear stress*) [12]

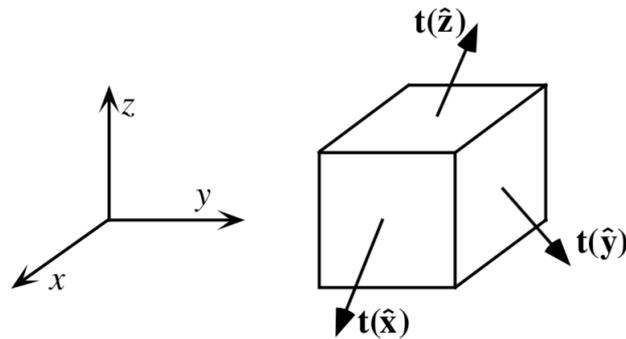


Figura 10: Los vectores de tracción $\mathbf{t}(\hat{\mathbf{x}})$, $\mathbf{t}(\hat{\mathbf{y}})$ y $\mathbf{t}(\hat{\mathbf{z}})$ describen las fuerzas que actúan en un cubo infinitesimal de un plano cartesiano. [12]

Donde el tensor de esfuerzos τ en un sistema de plano cartesiano que puede ser definido por las tracciones a través de los planos yz , xz y xy como:

Tensor de Esfuerzos

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} t_x(\hat{\mathbf{x}}) & t_x(\hat{\mathbf{y}}) & t_x(\hat{\mathbf{z}}) \\ t_y(\hat{\mathbf{x}}) & t_y(\hat{\mathbf{y}}) & t_y(\hat{\mathbf{z}}) \\ t_z(\hat{\mathbf{x}}) & t_z(\hat{\mathbf{y}}) & t_z(\hat{\mathbf{z}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Además, la tracción a través de cualquier plano arbitrario con orientación normal $\hat{\mathbf{n}}$ puede obtenerse multiplicando el tensor de esfuerzos por $\hat{\mathbf{n}}$:

Esfuerzo Normal

$$t(\hat{\mathbf{n}}) = \boldsymbol{\tau}\hat{\mathbf{n}} = \begin{bmatrix} t_x(\hat{\mathbf{n}}) \\ t_y(\hat{\mathbf{n}}) \\ t_z(\hat{\mathbf{n}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{n}}_x \\ \hat{\mathbf{n}}_y \\ \hat{\mathbf{n}}_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Otro punto importante es que el tensor de esfuerzos es que es independiente de cualquier sistema de coordenadas y en sismología la forma más común de usar el tensor de esfuerzos es con una matriz de 3x3 en una geometría cartesiana. Mientras que el esfuerzo solo mide las fuerzas a través del plano y tiene unidades de fuerza por unidad de área, existen otras fuerzas que pueden actuar en el cuerpo como la gravedad. A estas fuerzas se les llaman de cuerpo y tienen unidades de fuerza por unidad de volumen o masa.

Ahora, vamos a considerar un campo de desplazamiento $\mathbf{u}(\mathbf{r}_0, t) = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0$ donde \mathbf{r} es la posición en un tiempo t y \mathbf{r}_0 es el punto de referencia. La aproximación del seguimiento de las partículas en desplazamiento desde su punto de origen a un tiempo de referencia se le llama descripción Lagrangiana de movimiento y su formulación, casi siempre, es la más conveniente en sismología. El sismómetro es un instrumento que responde al movimiento de las partículas en la Tierra y registra el movimiento Lagrangiano.

El campo de desplazamiento \mathbf{u} es una medida absoluta del cambio de posición. Por otra parte, la tensión es una medida local del cambio relativo en el campo de desplazamiento, es decir, los gradientes espaciales en el campo de desplazamiento. Entonces, la tensión se relaciona más con la deformación de un material que el cambio de posición. Por ejemplo, la tensión extensional se define como el cambio de longitud respecto a una longitud dada, como un estiramiento.

Si consideramos el desplazamiento $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ a una distancia \mathbf{x} desde punto de referencia \mathbf{x}_0 :

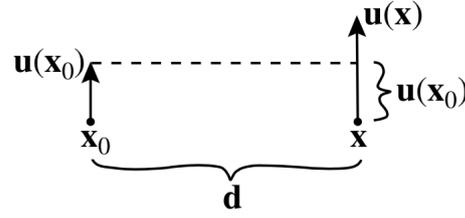


Figura 11: Desplazamiento del punto de referencia $\mathbf{u}(\mathbf{x}_0)$ a una distancia $\mathbf{u}(\mathbf{x})$. [12]

Podemos expandir \mathbf{u} en una aproximación de Taylor para obtener

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \mathbf{u}(\mathbf{x}_0) + \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} & \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} & \frac{\partial u_z}{\partial y} & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \mathbf{u}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{J}\mathbf{d} \quad (3)$$

donde $\mathbf{d} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$. Ignoramos los elementos de orden superior por la asunción de que las parciales $\partial u_x/\partial x$, $\partial u_y/\partial y$, $\partial u_z/\partial z$, etc., son suficientemente pequeñas y que sus productos pueden ser ignorados (base de la *teoría infinitesimal del esfuerzo*), en sismología esta aproximación es válida para la Tierra. También, podemos separar las rotaciones rígidas dividiendo \mathbf{J} en una parte simétrica y otra anti simétrica:

$$\mathbf{J} = \mathbf{u}(\mathbf{x}_0) + \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} & \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} & \frac{\partial u_z}{\partial y} & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \mathbf{e} + \Omega \quad (4)$$

donde el tensor de tensión \mathbf{e} , es simétrico ($e_{ij} = e_{ji}$) y está dado por

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

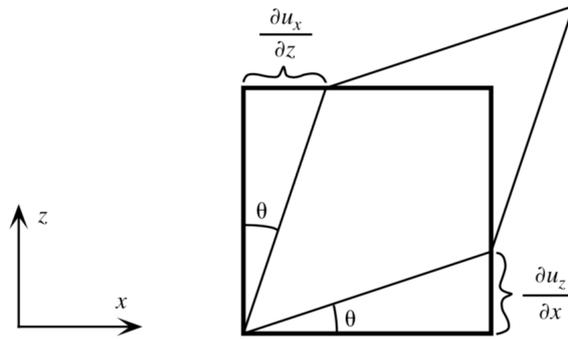


Figura 12: Los componentes fuera de la diagonal de \mathbf{e} causan una deformación de corte. [12]

Mientras que el tensor de rotación Ω , es anti simétrico ($\Omega_{ij} = -\Omega_{ji}$) y está dado por

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) & 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) & -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

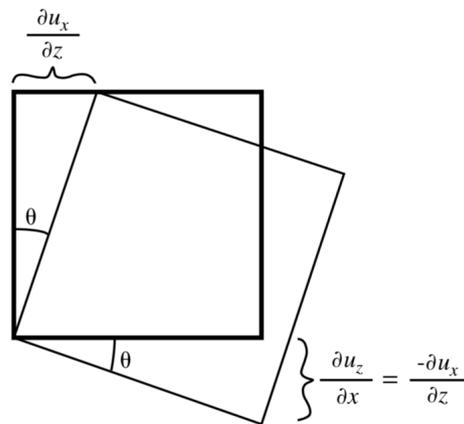


Figura 13: Los componentes de Ω causan una rotación rígida. [12]

Es importante notar que en ninguno de los dos casos existe un cambio de volumen en el material. El aumento relativo del

volumen, o dilatación, $\Delta = (V - V_0)/V_0$ está dado por la suma de las extensiones en las direcciones x , y y z :

Dilatación

$$\Delta = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \text{tr}[\mathbf{e}] = \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (7)$$

donde $\text{tr}[\mathbf{e}] = e_{11} + e_{22} + e_{33}$, es la traza de \mathbf{e} . Nota que la dilatación está dado por la divergencia del campo de desplazamiento.

Entonces, la definición del producto cruz al campo de desplazamiento es:

Rotacional

$$\nabla \times \mathbf{u} = \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \hat{\mathbf{x}} + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \hat{\mathbf{y}} + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \hat{\mathbf{z}} \quad (8)$$

Una comparación de esta ecuación con la ecuación (6), demuestra que $\nabla \times \mathbf{u}$ es distinto de cero solo si Ω es distinto de cero y el campo de desplazamiento contiene alguna rotación rígida.

3.2.1.1 Relación Tensión-Esfuerzo

La relación lineal más general entre la tensión y el tensor de esfuerzos se escribe con la *Ley generalizada de Hooke*:

$$\tau_{ij} = c_{ijkl} e_{kl} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 c_{ijkl} e_{kl} \quad (9)$$

La ecuación (9) asume una elasticidad perfecta donde no hay pérdida o atenuación de energía cuando el material se deforma en respuesta a la tensión aplicada, *elasticidad lineal*, y se aplica a las perturbaciones de tensión, denominado tensiones incrementales. Sin embargo, en la sismología se pueden observar comportamientos no lineales, como ejemplo la fractura de la roca cerca de terremotos o explosiones. El esfuerzo no es sensible al tensor de rotación Ω y los cambios en el esfuerzo son causados por cambios de volumen y forma en los sólidos, como se definió con el tensor de tensión, más que rotaciones rígidas.

El tensor de elasticidad c_{ijkl} , es un tensor de cuarto orden con 81 (3^4) componentes. De cualquier manera, debido a la simetría del tensor de esfuerzos y tensión junto con las consideraciones termodinámicas solo 21 de estos componentes son independientes, necesarios para especificar la relación tensión-esfuerzo en su forma más general de un sólido elástico. Si las propiedades del sólido varían con la dirección se le denomina *anisotrópico*, pero si no hay variación de denomina *isotrópico*. La isotropía nos da aproximaciones razonables de primer orden para la mayoría de los casos en el interior de la Tierra, pero se han encontrado regiones donde se encuentra anisotropía, lo cual es un área importante de investigación.

Si asumimos isotropía (donde c_{ijkl} no varía respecto a la rotación), el número de parámetros independientes se reduce a dos:

Tensor Elástico (Isotrópico)

$$c_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{il} \delta_{jk} + \delta_{ik} \delta_{jl}) \quad (10)$$

donde λ y μ son llamados los *parámetros de Lamé* del material y δ_{ij} es la *delta de Kronecker* (donde $\delta_{ij} = 1$ para $i = j$ y $\delta_{ij} = 0$ para $i \neq j$). Los parámetros de Lamé, junto con la densidad, determinarán eventualmente las velocidades sísmicas del material. Donde podemos escribir la ecuación (9) de tensión-esfuerzo para un sólido isotrópico como:

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} e_{kk} + 2\mu e_{ij} \quad (11)$$

donde μ , el primer parámetro de Lamé, se denomina *módulo de corte* y es una medida de la resistencia del material al cizallamiento. Este valor está dado por la mitad de la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la resultante de la tensión de corte ($\mu = \tau_{xy}/2e_{xy}$). El otro parámetro de Lamé λ no tiene una explicación física sencilla. Finalmente, podemos escribir los componentes del tensor de esfuerzos en términos de tensiones:

$$\tau = \begin{bmatrix} \lambda \text{tr}[\mathbf{e}] + 2\mu e_{xx} & 2\mu e_{xy} & 2\mu e_{xz} \\ 2\mu e_{yx} & \lambda \text{tr}[\mathbf{e}] + 2\mu e_{yy} & 2\mu e_{yz} \\ 2\mu e_{zx} & 2\mu e_{zy} & \lambda \text{tr}[\mathbf{e}] + 2\mu e_{zz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

En la sismología, nos interesa saber el valor de las velocidades de compresión (P) y de corte (S) las cuales se pueden calcular a partir de las constantes elásticas y la densidad ρ :

Velocidad P (α)

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (13)$$

Velocidad S (β)

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (14)$$

La relación de Poisson σ se usa como medida del tamaño relativo de las velocidades P y S :

$$\sigma = \frac{(\alpha/\beta)^2 - 2}{2(\alpha/\beta)^2 - 2} \quad (15)$$

Se puede notar que σ no tiene dimensiones y varía entre 0-0.5 con el límite superior representando un fluido ($\mu = 0$). Un *sólido de Poisson*, donde $\lambda = \mu$, $\sigma = 0.25$ y $\alpha/\beta = \sqrt{3}$, es una buena aproximación en sismología para la estimación de la velocidad S respecto la velocidad P y viceversa. El mínimo posible en la relación de P a S para un sólido isotrópico es $\sqrt{2}$ y ocurre cuando $\lambda = \sigma = 0$. La mayoría de las rocas de la corteza tienen una relación de Poisson entre 0.25 y 0.30.

Los parámetros de Lamé tienen las mismas unidades que el esfuerzo, las cuales son:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2} = 1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

3.2.2 Ecuación de Onda Sísmica

Usando al teoría de esfuerzo y tensión anterior, podemos construir y resolver la ecuación de onda sísmica para propagación de onda elástica en un medio uniforme. Vamos a demostrar 2 tipos de solución posible, correspondientes a la ondas de compresión (P) y de corte (S). Por simplicidad, asumiremos elasticidad perfecta sin pérdida de energía en la ondas sísmicas de cualquier atenuación intrínseca.

Para comenzar, tenemos la ecuación de onda en una dimensión

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (16)$$

y su solución general

$$u(x, t) = f(x \pm ct), \quad (17)$$

que representa las ondas de forma arbitraria propagándose a una velocidad c en direcciones positiva y negativa en x . La velocidad de la onda se determina por las propiedades físicas del material donde se propaga. La ecuación de onda es clasificada como una *ecuación hiperbólica*.

Las ondas sísmicas son un fenómeno dependientes del tiempo que involucra velocidades y aceleraciones, por lo cual debemos tomar en cuenta el efecto del *momento*. Para hacer esto aplicamos la *Ley de Newton* $F = ma$ a un medio continuo.

Como se observa en la [Figura 14](#), las fuerzas de cada superficie del cubo están dadas por el producto del vector de tracción y el área de superficie. Por ejemplo, la fuerza del plano normal en x_1 está dado por

$$\mathbf{F}(\hat{x}_1) = \mathbf{t}(\hat{x}_1) dx_2 dx_3 = \boldsymbol{\tau} \hat{x}_1 dx_2 dx_3 = \begin{bmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{21} \\ \tau_{31} \end{bmatrix} dx_2 dx_3 \quad (18)$$

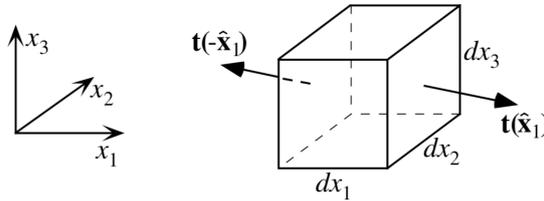


Figura 14: La fuerza en la (x_2, x_3) cara de un cubo infinitesimal está dado por $\mathbf{t}(\hat{x}_1) dx_2 dx_3$. [12]

donde \mathbf{F} es el vector de fuerza, \mathbf{t} es el vector de tracción y $\boldsymbol{\tau}$ es el tensor de esfuerzos. En el caso de un campo homogéneo de esfuerzo, no hay fuerza neta en el cubo debido a que las fuerzas en lados opuestos se cancelan $\mathbf{F}(-\hat{x}_1) = -\mathbf{F}(\hat{x}_1)$. La fuerza neta solo se ejercerá en el cubo si los gradientes espaciales son representados en el campo de esfuerzos. En este caso, la fuerza neta del plano normal a x_1 es:

$$\mathbf{F}(\hat{x}_1) = \mathbf{t} \hat{x}_1 dx_2 dx_3 \quad \mathbf{F}(\hat{x}_1) = \frac{\partial}{\partial x_1} \begin{bmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{21} \\ \tau_{31} \end{bmatrix} dx_1 dx_2 dx_3 \quad (19)$$

Usando notación de índice y el convenio de sumatoria podemos expresar la fuerza total del campo de esfuerzos en todas las caras del cubo como:

$$F_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} dx_1 dx_2 dx_3 = \partial_j \tau_{ij} dx_1 dx_2 dx_3 \quad (20)$$

El término $\partial \tau_{ij}$ es la divergencia del tensor de esfuerzos. Además, puede existir fuerzas de cuerpo en el cubo, que actúan en proporción al volumen del material:

$$F_i^{\text{body}} = f_i dx_1 dx_2 dx_3 \quad (21)$$

Mientras que la masa infinitesimal de un cubo esta dada por

$$m = \rho dx_1 dx_2 dx_3 \quad (22)$$

donde ρ es la densidad. La aceleración del cubo esta dado por la segunda derivada del desplazamiento \mathbf{u} . Sustituyendo las ecuaciones (20) y (22) en $F=ma$ y cancelando el factor común de $dx_1 dx_2 dx_3$, obtenemos la *ecuación de movimiento*:

$$\rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = \partial_j \tau_{ij} + f_i \quad (23)$$

El término de fuerza de cuerpo \mathbf{f} generalmente consiste en el termino \mathbf{f}_g y el término de la fuente \mathbf{f}_s . Aunque la gravedad es un factor importante a frecuencia muy bajas de el modo normal de sismología, se puede ignorar para los cálculos de ondas de cuerpo y superficie es las longitudes de ondas típicamente observadas. En la ausencia de fuerzas de cuerpo, nos queda la *ecuación homogénea de movimiento*:

$$\rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = \partial_j \tau_{ij} \quad (24)$$

Las soluciones generadas por las ecuaciones (23) o (24), para modelos realistas de la Tierra, son de suma importancia en la sismología. Estas soluciones predicen el movimiento en localizaciones específicas a cierta distancia de la fuente y se les denomina *sismo gramas sintéticos*.

Para poder resolver la ecuación (24) necesitamos utilizar la relación tensión-esfuerzo para determinar τ en términos de desplazamiento \mathbf{u} . Recordando la ecuación (11) ($\tau_{ij} = \lambda\delta_{ij}e_{kk} + 2\mu e_{ij}$), relación isotrópica de tensión-esfuerzo, donde los parámetros de Lamé λ y μ , junto con el tensor de esfuerzos se define como:

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_i u_j + \partial_j u_i) \quad (25)$$

Sustituyendo e_{ij} en la ecuación (11), obtenemos:

$$\tau_{ij} = \lambda\delta_{ij}\partial_k u_k + \mu(\partial_i u_j + \partial_j u_i) \quad (26)$$

Algunas veces, las ecuaciones (24) y (26) se usan directamente para modelar la propagación de ondas con cálculo computacional aplicando técnicas de diferencias finitas. La gran ventaja de este método es la sencillez para manejar modelos de la tierra con una complejidad arbitraria. Sin embargo, requiere mucho costo computacional y no necesariamente provee pistas físicas sobre el comportamiento de los diferentes tipos de ondas.

Si sustituimos la ecuación (24) en la (26) y aplicando cálculo vectorial, obtenemos una forma de la *ecuación de onda sísmica*:

$$\rho\ddot{\mathbf{u}} = \nabla\lambda(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla\mu \cdot \left[\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T \right] + (\lambda + 2\mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} - \mu\nabla \times \nabla \times \mathbf{u} \quad (27)$$

Los primeros dos términos del lado derecho, con gradientes en los parámetros de Lamé, son diferentes de cero cuando el material no es homogéneo, es decir, contiene gradientes de velocidad. La mayoría de los modelos de la Tierra contienen estos gradientes lo que hace muy complicado y difícil poder resolver las ecuaciones, es por eso que muchos métodos para sismo gramas sintéticos ignoran estos términos usando una de las siguientes dos aproximaciones:

Primero, si la velocidad solo esta en función de la profundidad, el material puede ser modelado como una serie de capas homogéneas donde, en cada capa, no existen gradientes en los parámetros de Lamé y como consecuencia estos términos son iguales a cero. El efecto de un gradiente con velocidad continua puede ser simulado si consideramos un modelos de "escaleras" con muchas capas delgadas. Esta aproximación es la base de

algunas técnicas para computar la predicción de movimientos sísmicos en modelos de la Tierra en una dimensión (*método de capas homogéneas*). Sin embargo, hay que tomar en cuenta que esta aproximación es útil para ondas de superficie y ondas de cuerpo de bajas a medianas frecuencias, en altas frecuencias la aproximación se vuelve ineficiente porque necesita un gran número de capas para mejorar la precisión de los resultados.

En segundo, se puede demostrar que los términos gradientes varía inversamente a la frecuencia $1/\omega$, donde ω es la frecuencia, y para altas frecuencias este término sería igual cero. Esta aproximación se utiliza para la mayoría de los métodos teóricos de rayos donde se asume que las frecuencias son suficientemente altas para determinar que el término $1/\omega$ no importa.

De esta manera, aplicando alguna de las dos aproximaciones anteriores, ignoramos los dos primeros términos del lado derecho en la ecuación (27) obteniendo la *ecuación homogénea de movimiento*:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} \quad (28)$$

Esta ecuación es una expresión aproximada válida solo si ignoramos el efecto de la gravedad, los términos gradientes de velocidad y asumimos linealidad, usando un modelo isotrópico de la Tierra.

Para este momento, ya podemos separar la ecuación en soluciones para las ondas P y S , tomando la divergencia y el producto cruz, respectivamente. Si aplicamos la divergencia a la ecuación (28) obtenemos la velocidad de onda P (α):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (29)$$

Tomando el producto cruz obtenemos la velocidad S (β):

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (30)$$

Finalmente, podemos re escribir la ecuación de onda elástica (27) directamente en términos de velocidades P y S :

$$\ddot{\mathbf{u}} = \alpha^2 \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \beta^2 \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} \quad (31)$$

3.2.3 Polarización de ondas P y S

El desplazamiento \mathbf{u} se puede expresar en términos de onda P como potencial escalar ϕ y onda S como vector potencial $\vec{\Psi}$, usando el teorema de descomposición de Helmholtz:

$$\mathbf{u} = \nabla\phi + \nabla \times \vec{\Psi} \quad \nabla \cdot \vec{\Psi} = 0 \quad (32)$$

Una solución general para la propagación de onda plana P en dirección x es

$$\phi = \phi_0(t \pm x/\alpha) \quad (33)$$

donde el signo negativo corresponde a la propagación en dirección $+x$ y el signo positivo a la propagación en dirección $-x$. Porque $\mathbf{u} = \nabla\phi$, tenemos

$$\begin{aligned} u_x &= \partial_x \phi \\ u_y &= 0 \\ u_z &= 0 \end{aligned} \quad (34)$$

donde la propagación solo corre a lo largo del eje de las x de manera longitudinal. Analizando $\nabla \times \nabla\phi = 0$, se puede notar que el movimiento es irrotacional. Las ondas P involucran cambios de volumen del material ($\nabla \cdot \neq 0$), a estas ondas también se les llaman "compresional" o de "dilatación".

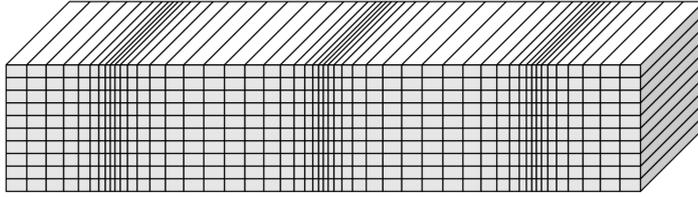


Figura 15: Desplazamiento de la Onda P en el material donde la propagación genera un cambio de volumen y forma. [12]

Ahora si consideramos la propagación de la onda S en dirección $+x$ el desplazamiento es:

$$\begin{aligned} u_x &= (\nabla \times \vec{\Psi})_x = \partial_y \vec{\Psi}_z - \partial_z \vec{\Psi}_y = 0 \\ u_y &= (\nabla \times \vec{\Psi})_y = \partial_z \vec{\Psi}_x - \partial_x \vec{\Psi}_z = -\partial_x \vec{\Psi}_z \\ u_z &= (\nabla \times \vec{\Psi})_z = \partial_x \vec{\Psi}_y - \partial_y \vec{\Psi}_x = \partial_x \vec{\Psi}_y \end{aligned} \quad (35)$$

El movimiento, descrito en las ecuaciones anteriores, se presenta en las direcciones de y y z , perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La onda S se divide generalmente en dos componentes: uno vertical al plano sobre el vector de propagación (onda SV) y el movimiento horizontal en dirección perpendicular al plano (onda SH). Además la onda S solo genera movimiento de corte y no genera ningún cambio de volumen debido a que $\nabla \cdot \mathbf{u} = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{\Psi}) = 0$.

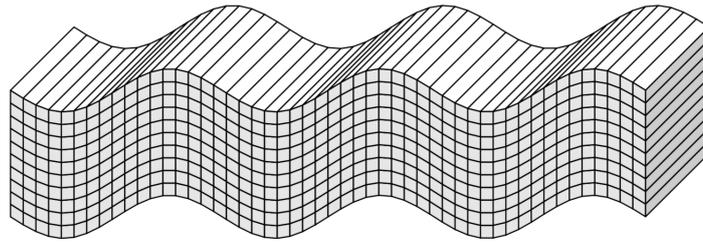


Figura 16: Desplazamiento de la Onda S polarizado en dirección vertical (onda SV) donde la propagación genera un cambio de forma solamente. [12]

3.2.4 Sismo gramas Sintéticos

La simología trabaja con la implementación de técnicas computacionales para producir sismo gramas sintéticos en modelos realistas de la Tierra donde la meta es calcular el registro de un sismo grama a una distancia específica de una fuente sísmica utilizando un modelo de propagación de ondas sísmicas. Sin embargo, es común tener errores en los simogramas sintéticos durante la aplicación práctica debido a los siguientes puntos:

- Inexactitud por uso de aproximaciones. Ocurre comúnmente en aplicaciones de la teoría de rayos.
- Errores causados por utilizar modelos simples de la Tierra (modelos isotrópicos y homogéneos.)
- Usar modelos simples de la fuente sísmica (modelos de 1-D).

Pero para los errores en la aplicación de los sismogramas sintéticos existen soluciones computacionales como:

- Diferencia finita y elementos finitos.

- Método teórico de rayos, tienen una mejor precisión a altas frecuencias.
- Método de capas homogéneas, son funcionales en Modelos de la Tierra de 1-D.
- Métodos de suma de modos normales, tienen un alto requerimiento computacional a altas frecuencias y una alta complejidad en sus algoritmos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y métodos utilizados en este trabajo se muestran en el diagrama de la [Figura 17](#), donde el principal objetivo fue integrar el software y hardware de un acelerómetro con otros elementos para poder automatizar la lectura de información e independizarlo de algún otro dispositivo externo.

En este trabajo se explica el proceso de selección y el motivo de cada elemento que compone el prototipo final para el proyecto *Volcano* y el proyecto *Odín*.

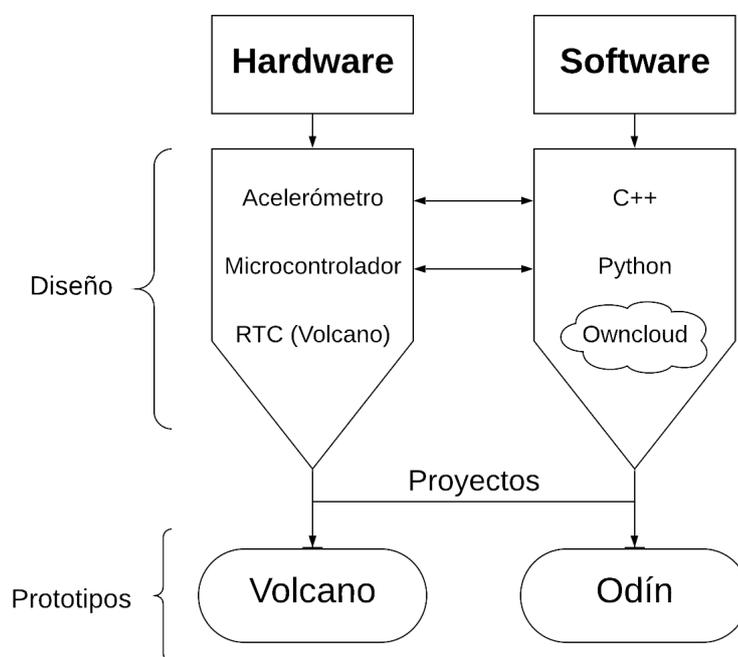


Figura 17: Diagrama de materiales y métodos para el desarrollo final de los prototipos en los proyectos Volcano y Odín.

4.1 HARDWARE

El hardware que se utilizó fue elegido buscando la integración y complemento de funciones básicas para obtener como resultado un sensor sísmico de bajo costo e independiente de un ordenador de escritorio o portátil. Se diseñaron 2 dispositivos diferentes con la misma finalidad, pero con una diferencia importante que es la "nube". Los dos dispositivos funcionan básicamente con un acelerómetro como sensor principal para registrar las ondas sísmicas y un microprocesador para cronometrar y almacenar la información. La diferencia se encuentra en la disponibilidad de internet en el lugar de instalación del dispositivo, ya que si existe señal de internet (cableada o inalámbrica) es posible almacenar la información directamente en el dispositivo y transferirla en "tiempo real" a una nube personal, en nuestro caso ownCloud. Pero si no se cuenta con internet el microprocesador solo cumplirá la función de mantener sincronizado el registro de mediciones sísmicas a través de un reloj RTC de alta precisión.

Ambos dispositivos son completamente funcionales y no superan el costo de cualquier computadora convencional actual. En [Tabla 1](#) presentamos una comparativa entre el sensor O'navi de la Universidad de Stanford y el SparkFun IMU Razor 9DoF utilizado en este proyecto (9)(10), donde se puede apreciar el sensor utilizado para este trabajo, el sensor SparkFun IMU Razor 9DoF, es bastante similar al sensor O'navi con la diferencia importante de que es posible tomar registros de vibraciones sísmicas sin ningún otro dispositivo externo, ya que este cuenta con su propio almacenamiento en una memoria micro SD.

4.1.1 O'navi

El dispositivo O'navi fue desarrollado por la universidad de Stanford en su iniciativa Quake-Catcher Network (QCN), el cual es un proyecto para desarrollar la red sísmica de más grande y de bajo costo en el mundo mediante la utilización de los sensores en las computadoras, celulares y videojuegos entre otros dispositivos conectados a internet. Utilizando el acelerómetro MEMS embebido en estos dispositivos, la red Quake-Catcher puede almacenar una gran cantidad de información desde distintas partes del mundo para finalmente tener una mejor comprensión de los terremotos, especialmente en áreas donde no cuentan con grandes redes sísmicas. Los sensores

| Dispositivo | O'navi | SparkFun IMU Razor 9 DoF |
|----------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Proyecto | Quake-Catcher Network | Volcano/Odín |
| Desarrollador | Universidad de Stanford | Universidad Autónoma de Chihuahua |
| Tecnología | MEMS | MEMS |
| Resolución | 8bits | 16bits |
| Sensibilidad | +2g | +2g |
| Frecuencia | 50Hz | 40Hz |
| Conexión | USB | USB/Serial |
| Dependencia | Computadora | RaspberryPi (opcional) |
| Almacenamiento | - | Micro SD |
| Costo | Bajo | Bajo |
| Tamaño | Compacto | Compacto |

Tabla 1: Comparación de características y especificaciones entre los dispositivos O'navi y SparkFun IMU Razor 9DoF.

QCN miden aceleraciones entre $-2g$ y $2g$ (donde g es el valor de la gravedad de la tierra igual a $9.81m/s^2$) en los tres ejes y su frecuencia es de $50Hz$. La red de QCN también proporciona su propio sensor, que se conecta mediante USB a algún ordenador de comput, y software educativo diseñado para ayudar a enseñar sobre los terremotos y sus peligros.

El O'navi, como ya lo mencionamos, es parte de los dispositivos ofrecidos por la red de QCN que permite tener un registro de las aceleraciones recibidas por el sensor directamente en nuestro ordenador, este dispositivos cuenta con varias ventajas sobre los celulares, computadoras y todos los aparatos con un acelerómetro interno debido a que se puede montar en lugares fijos y libres de movimientos provocados por la interacción humana. A continuación se listan una serie de ventajas:

- Montaje en base solida.
- Menor ruido en señal.
- Registro directo desde el suelo.
- Alineación del eje en dirección al Norte.

- Bajo costo.

Estas ventajas permiten que los datos recibidos por los O'navi sean utilizables por investigadores y de interés para el estudio de sismicidad a nivel mundial. Sin embargo, es importante considerar que los sensores sísmicos basados en acelerómetros MEMS tiene limitantes importantes en comparación seismómetros profesionales, por ejemplo, tienen mayor ruido y una pobre resolución analógico-digital limitado por los bits de resolución y la calidad del filtro aplicado a la señal. La resolución digital está dada por el rango del sensor dividido por el número total de números digitales, por ejemplo de $-2g$ a $2g$ donde $1g$ es la gravedad de la Tierra igual a $9m/s^2$. Para 8 bits digitalizados, hay $2^8 = 256$ valores.

El ruido de cada sensor, como mínimo es igual a una unidad pero puede tener hasta 30 unidades. Los sensores dentro de las casas y edificios tienden a captar señales intermitentes generadas por las personas, estos niveles de ruido pueden llegar a más de $0.1g$. Es por eso que no se puede registrar terremotos de Magnitud 2 o menores y difícilmente se pueden sismos de Magnitud 3 en la escala de Richter, a menos que este colocado en un lugar lejano a la interacción humana.

A pesar de que la Universidad de Stanford desarrolló un proyecto único hasta el momento, sus dispositivos O'navi tienen el inconveniente de que es necesario contar con una computadora encendida con el Software de QCN para leer y mandar la información a los servidores. A continuación, se presenta una alternativa desarrollada durante el trabajo de esta tesis donde resolvemos este inconveniente utilizando microprocesadores para leer y mandar la información, sin necesidad de una computadora como intermediario.

4.1.2 *Dispositivo SparkFun IMU Razor 9DoF*

El dispositivo SparkFun IMU Razor 9DoF combina el sensor MPU-9250 9DoF (con 9 grados de libertad), el microcontrolador SAMD21 y una ranura Micro SD permitiendo al dispositivo registrar y procesar la información. La programación se puede realizar a través del IDE de Arduino, SparkFun proporciona el firmware de fábrica y las librerías para su uso. El firmware de fábrica facilita la configuración del dispositivo a través de un monitor serial, además de guardar la información de manera automática en una memoria Micro SD. Las librerías incluidas

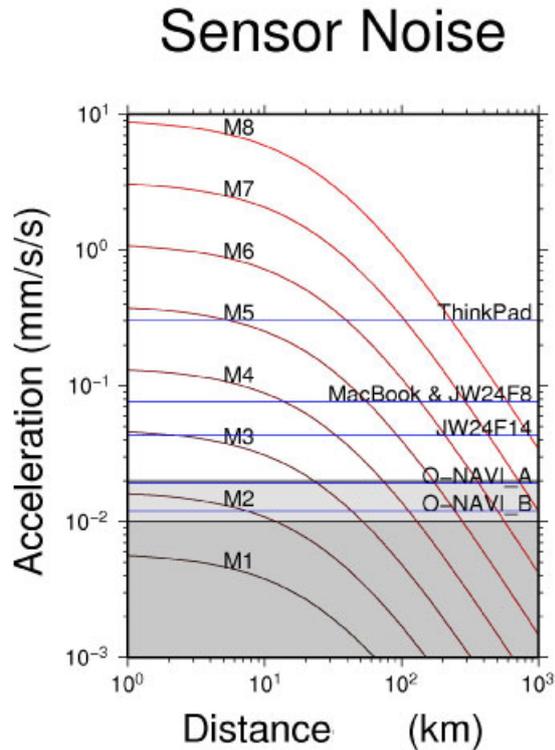


Figura 18: Ruido en la señal de los acelerómetros MEMS en distintos dispositivos.[10]

permiten seleccionar los sensores y la sensibilidad del dispositivo a utilizar (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro), así como realizar un procesamiento posterior con la información registrada haciendo conversiones y filtros de frecuencia entre otras cosas. Esto convierte al dispositivo SparkFun IMU 9DoF en un dispositivo con múltiples aplicaciones como monitor de movimiento, contador de pasos, sensor sísmico, etc.

Nuestro interés con este sensor es que tenga la capacidad de detectar y caracterizar sismos de magnitud 3 en la escala de Richter en adelante, razón por la cual se configuró una frecuencia de 40 Hz y una sensibilidad en acelerómetro de $\pm 2g$. Esta configuración fue la que mostró mejor respuesta y menor ruido al momento de la detección, en la sección de resultados se muestran las pruebas para la selección de la frecuencia de muestreo en el sensor. Además se utilizó una metodología sencilla para conocer el ángulo de inclinación del sensor basándose en que el eje Z debe encontrarse paralelo al vector de la fuerza gravitacional.

El microcontrolador SAMD21 también se encuentra en el arduino cero.

Tanto el giroscopio como el magnetómetro no fueron utilizados durante este trabajo ya que nos enfocamos en sismos de baja escala, sin embargo su utilidad para caracterizar un sismo fuerte pueden ser de vital importancia ya que cerca del epicentro del sismo pueden existir variaciones en el campo magnético y un cambio de inclinación, según el tipo de sismo.

En comparativa, entre el SparkFun IMU Razor 9DoF y el O'navi de la universidad de Stanford, el SparkFun mostró una respuesta similar y además tiene las siguientes ventajas sobre el O'navi:

- Almacenamiento en memoria MicroSD.
- Interfaz USB y pines RX-TX para su comunicación con otros dispositivos.
- Giroscopio y magnetómetro incorporado.
- Fuente de alimentación por Bateria LiPo.
- Reloj interno con 16 bits de resolución.
- Registro con 16 bits de resolución.
- Código abierto.

Sin embargo, a pesar de contar con un reloj interno este se inicializa cada vez que el sensor se enciende, haciendo imposible la sincronización de múltiples sensores sin la utilización de un dispositivo externo como un RTC o un microprocesador. Otro problema es que un RTC no puede ser utilizado directamente en el sensor SparkFun debido a la incompatibilidad del sensor con dispositivos en comunicación I²C con dirección 0x68 y 0x0C utilizada por los RTCs, es por eso que es necesario un dispositivo de interfaz entre el RTC y el sensor. Se proponen en este trabajo 2 soluciones a la sincronización del dispositivo, el *proyecto Odín* y el *proyecto Volcano*.

El proyecto Odín depende de una conexión de internet a un microprocesador para la sincronización del reloj, el sensor manda la información por el puerto USB al microprocesador que la almacena y la sube a una nube personal, [Figura 19](#). El proyecto Volcano utiliza un RTC previamente sincronizado para actualizar el reloj en el microprocesador que manda el tiempo actual al sensor y finalmente el sensor guarda la información en la memoria microSD, [Figura 20](#). En la siguiente sección se explica a detalle el uso de los microprocesadores en ambos proyectos.

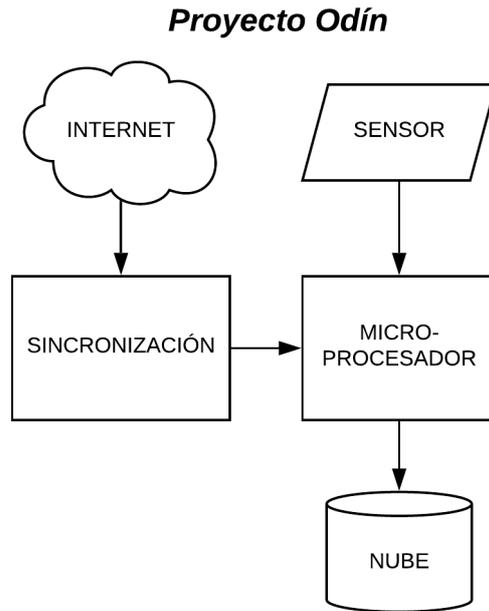


Figura 19: Proyecto Odín para la sincronización a través de internet y almacenamiento en la nube.

4.1.3 *Microcontroladores y Microprocesadores*

Un microcontrolador, como el SAMD21 mencionado anteriormente, es un circuito integrado dedicado a seguir las ordenes guardadas su memoria las cuales son programables generalmente en C# o C++, además cuenta con periféricos de entrada y salida, sus frecuencias de procesamiento suelen ser bajas en el rango de los MHz. Por otro lado, tenemos los microprocesadores que son muy parecidos a lo microcontroladores pero más comunes en la vida cotidiana ya que cada una de nuestras computadoras y teléfonos inteligentes cuentan con ellos, es el chip que procesa toda la información lógica del dispositivo (es el cerebro de nuestros dispositivos) y su frecuencia de procesamiento suelen ser mayores a 1GHz aun en los procesadores más sencillos. Sin embargo, un microprocesador cuenta con un sistema operativo el cual está realizando múltiples procesos de diferentes programas cargados, esto permite una mayor versatilidad de programación y facilidad de uso para el usuario pero tiene poca utilidad para un dispositivo cuyo propósito solo es realizar pocas tareas, ejemplo una estación meteorológica. En estos casos, es mejor el uso de microcontroladores con la finalidad de realizar una menor cantidad de procesamientos pero con mayor rendimiento y estabilidad ya que los microcontro-

Proyecto Volcano

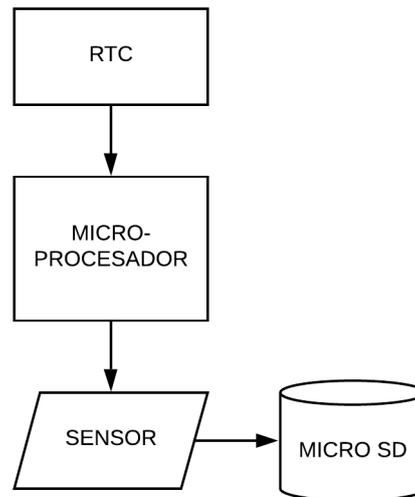


Figura 20: Proyecto Volcano para la sincronización mediante un RTC y almacenamiento en una memoria microSD.

ladores difícilmente fallan en su funcionamiento mientras que los microprocesadores pueden fallar debido a la sobre carga o errores en el sistema operativo. Por esta razón, es necesario conocer bien las tareas que se quieren realizar para saber que tipo de chip utilizar o, como en nuestro caso, hacer una correcta implementación de ambos.

La mayoría de los microprocesadores son de menor tamaño, usualmente con periféricos inalámbricos integrados como Wifi y/o Bluetooth además de una memoria de almacenamiento. En cambio, con un microcontrolador es necesario integrar módulos para cada funcionalidad extra que lo hace más grande y caro que un microprocesador. El costo donde un microprocesador sencillo que va entre los 5 a 50 dolares, mientras que los microcontroladores van desde los 20 a 100 dolares en promedio. Pero, a pesar de ser más caro cuando se busca tener mediciones precisas y constantes el microcontrolador es la mejor opción ya que, generalmente, cuenta con entradas analógicas lo que permite tomar mediciones de sensores externos sin un intermediario que convierta la señal analógica a digital. En nuestro caso, el sensor SparkFun cuenta con el microcontrolador SAMD21 que registra y guarda la información recolectada del sensor MPU-9250 en una memoria microSD y tiene un costo de 36 dolares.

Los microposeedores para desarrollo más utilizados son los Raspberry Pi, desde el Raspberry Pi Zero para tareas de bajo rendimiento hasta el Raspberry Pi 3 para "trabajo pesado". Entre los dispositivos más comunes que utilizan microcontrolador están los Arduino, donde existen desde Arduino nano hasta Arduino Galileo según la potencia de procesamiento requerida. Ambas marcas mencionadas cuentan con GPIO de entradas y salidas lógicas, además de puertos RX-TX y SDA-SCL para la comunicación. En este proyecto se seleccionaron Raspberry Pi y SparkFun como dispositivos con microprocesador y microcontrolador, respectivamente.

Recordando los 2 proyectos mencionados en la sección anterior, *proyecto Odín* y *proyecto Volcano*, vamos profundizar en los criterios de selección para los dispositivos usados:

Proyecto Odín

Para este proyecto contamos con las características iniciales de una conexión a internet (Wifi o RJ45) y una fuente de luz eléctrica. A partir de esto comenzamos el desarrollo del dispositivo para que pudiera ser sincronizado a través de internet con el protocolo NTP y almacenar la información en "tiempo real" dentro un servidor web propio. Después de varias pruebas en rendimiento se selecciono utilizar el Raspberry Pi 3, que tiene la capacidad de almacenar la información recibida por el sensor SparkFun y sincronizarlo con nuestra nube personal OwnCloud, el software se describe en la siguiente sección.

En este proyecto el flujo de la información va del sensor al microprocesador (ver [Figura 19](#)), comunicados por el puerto USB. Esto significa que el sensor se encuentra imprimiendo constantemente los valores registrados a través del puerto serial y el microprocesador recibe, procesa, sincroniza y guarda esta información en su memoria interna para, posteriormente, enviar esta información al servidor a través de internet.

Como se puede apreciar, este proyecto tiene enormes ventajas al poder tener acceso a la información sin necesidad de recolectarla directamente al sitio donde se encuentra el dispositivo y colocarlo de manera estacionaria en zonas de difícil acceso. Esto permite la implementación de alarmas para terremotos o eventos sísmicos. Sin embargo, ¿qué pasaría si no se cuenta con una conexión de luz o internet? El próximo proyecto resuelve este problema presentando una implementación independiente y de bajo consumo.

Proyecto Volcano

El proyecto Volcano se basa en el principio de independencia e integridad de información a corto plazo, en comparación con el proyecto anterior, no cuenta con conexión a internet y tampoco es necesaria una fuente de luz eléctrica. El dispositivo para este proyecto utiliza un Raspberry Pi Zero, un RTC y el sensor SparkFun que, en conjunto, pueden ser alimentados con una batería externa o con cualquier cargador de celular. Su autonomía es aproximadamente de 10-15 días utilizando batería con 2000 mA y una memoria de 16 Gb estas pueden ser mejoradas para lograr una autonomía mayor a 30 días.

Como se muestra en la [Figura 20](#), se utiliza un Real Time Clock (RTC) de alta precisión previamente sincronizado el cual está conectado a un RaspberryPi Zero por medio del puerto SDA-SCL, el RaspberryPi Zero se encuentra programado para inicializarse con el tiempo del RTC y actualizar nuevamente cada 24 horas para mantener la precisión en el reloj interno del microprocesador. Posteriormente, el microprocesador imprime a través del puerto serial RX-TX el valor del tiempo con una precisión de una diezmilésima de segundo a una frecuencia de 40Hz. Finalmente, el SparkFun, al recibir la información, almacena el tiempo junto con los valores del sensor en la memoria microSD.

La autonomía es importante cuando el sitio de estudio no cuenta con las instalaciones necesarias (Luz e internet) o cuando el sensor se desea colocar en sitios sin construcciones, como ejemplo en la falda de un volcan, es por eso que le llamamos a este proyecto Volcano.

4.2 SOFTWARE

Ahora que hemos aprendido el funcionamiento del hardware en ambos proyectos, vamos a profundizar en el software utilizado y su programación. Realizamos la implementación de los lenguajes de programación, tales como C++ y Python, además de realizar la configuración propia de un servidor con Ubuntu 16.04 como nube a través de la aplicación de OwnCloud.

4.2.1 Lenguaje C++ sobre IDE Arduino

El lenguaje C++ es un lenguaje de programación orientada a objetos con la capacidad de diseñar extensas tareas a bajo costo computacional. Es accesible para usuarios y universal, tra-

baja perfectamente con microcontroladores de desarrollo como los Arduino o PIC haciendo posible replicar proyectos fácilmente. Para su interpretación es necesario un compilador que codifique el lenguaje C++ a código Hex donde se almacenan las instrucciones que puede entender y realizar el microcontrolador.

Un ejemplo de la implementación del código C++ en microcontroladores es el IDE de Arduino que es un compilador compatible con los microcontroladores de la línea Arduino y variaciones, actualmente el IDE de Arduino es uno de los compiladores más utilizado en el ambiente de desarrollo. El sensor SparkFun es compatible con el IDE de Arduino haciendo su programación sencilla a través de las librerías que se ofrecen para este entorno que incluye ejemplos para su uso. Además, SparkFun ofrece el firmware original donde podemos hacer modificaciones a nuestro gusto sobre el sensor. Para nuestro trabajo utilizamos ambos casos, ejemplos de las librerías y modificaciones en el firmware para los proyectos *Odín* y *Volcano*, respectivamente. A continuación se explica el uso del IDE de Arduino para ambos proyectos:

- El **proyecto Odín** utiliza el sketch de ejemplo *MPU 9250 Basic* que cuenta con las instrucciones básicas para realizar la lectura en los 3 ejes del acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, así como el cambio de la frecuencia y sensibilidad en las mediciones. Para el proyecto configuramos el sketch tomando solamente lectura del acelerómetro a una frecuencia de 40Hz, una sensibilidad de $\pm 2g$ y mandando, finalmente, la información a través del puerto microUSB al RaspberryPi 3.
- El **proyecto Volcano** utiliza el firmware original preconfigurado para activar y guardar solamente la información del acelerómetro con su registro de tiempo a una sensibilidad de $\pm 2g$. En este proyecto no se configura la frecuencia de registro directamente en el sensor ya que esta es controlada por el RaspberryPi Zero que manda la sincronización de tiempo a través de un String al sensor (por del puerto serial RX-TX), el cual, al ser recibida, registra y guarda la información en la memoria microSD.

En la siguiente sección se explica la programación en Python utilizada por el RaspberryPi 3 y Zero para la lectura y almacenamiento de información en la nube o la sincronización e

impresión del tiempo por el puerto RX-TX a una frecuencia de 40Hz, según el proyecto.

4.2.2 *Python*

Python es un lenguaje de programación diseñado para la comunicación entre el usuario y el ordenador de manera sencilla y eficiente, permite realizar casi cualquier tipo de tarea en distintas plataformas (hardware) y sistemas operativos. Su amplia compatibilidad con la lectura y análisis de archivos, así como la facilidad del manejo y procesamiento de grandes cantidades de información convierte a este lenguaje en el más idóneo para utilizar en la investigación científica cuando se trata de meta datos. Además, por ser tan popular, existe una infinidad de proyectos almacenados en repositorios con acceso público de los cuales se pueden implementar las funciones creadas en nuevos trabajos. También, existen software de libre acceso creados completamente con Python que realizan desde tareas sencillas como lectura de información hasta CAD para el modelado de piezas 3D.

Las librerías de Python se encuentran en constante desarrollo y actualización, son útiles ya que permiten analizar y gratificar datos para su interpretación como se mostrará más adelante en este trabajo.

Por estas y otras razones, se decidió utilizar Python para el análisis de la información recolectada durante este trabajo. Se utilizaron principalmente las librerías *math*, *matplotlib*, *os*, *requests*, *numpy*, *pandas* y *Obspy* para la extracción, sincronización y análisis posterior de señales. A continuación se explican brevemente cada una de las librerías mencionadas anteriormente:

- **Math**, incluye funciones básicas de operación para los números ordinarios y decimales, algunos ejemplos de operación son potencias, logaritmos, trigonométricas, etc.
- **Mathplotlib**, permite visualizar la información a través de gráficos, es una herramienta imprescindible para la interpretación, investigación y divulgación científica. Esta librería incluye formas de visualización en puntos, barras, circular, histogramas y múltiples funciones que permiten la interacción o animación de los gráficos.

- **Os**, es una forma sencilla de interactuar con el sistema, puede escribir líneas de comando (en la terminal) y realizar operaciones del sistema con carpetas y archivos. Esta función se utilizó en este proyecto para seccionar en carpetas y separar la información recolectada.
- **Requests**, establece comunicación a internet basado en HTTP, esto hace posible mandar y recibir información a servidores o utilizar APIs para peticiones específicas en plataformas como Facebook o Google. Nosotros implementamos este método para transferir los archivos a un servidor personal con Owncloud instalado.
- **Numpy**, es una poderosa herramienta científica que trabaja con matrices y realiza operaciones de una manera eficiente y efectiva, se utiliza para la álgebra lineal, transformaciones de Fourier o funciones requeridas por el usuario.
- **Pandas**, es una librería que provee un alto rendimiento para el procesamiento de información y análisis de meta datos ya que organiza grandes cantidades información en tablas. Realizar operaciones rápidamente manteniendo la estructura y sencillez de una hoja de cálculo. Además, se complementa con matplotlib para la visualización de la información.
- **Obspy**, es un proyecto desarrollado para el procesamiento de datos sismológicos con la capacidad de leer los formatos sac y mseed, entre otros. También, permite solicitar datos globales a servidores registrados en plataformas como IRIS, procesa información en tiempo real y permite el análisis de señales, así como generar gráficas, triggers, espectros, etc. Su funcionalidad depende de las librerías mencionadas anteriormente y algunas más que se solicitan en la instalación de Obspy.

Python es un lenguaje que se programa y utiliza dentro de Sistemas Operativos, su implementación en microprocesadores de desarrollo como el RaspberryPi es popular ya que permite la comunicación y control de dispositivos externos, sensores o actuadores a través de los GPIO, [Figura 21](#). En los proyectos *Odín* y *Volcano* se implemento este lenguaje para la sincronización de manera eficiente. A continuación se explica la implementación en cada proyecto:

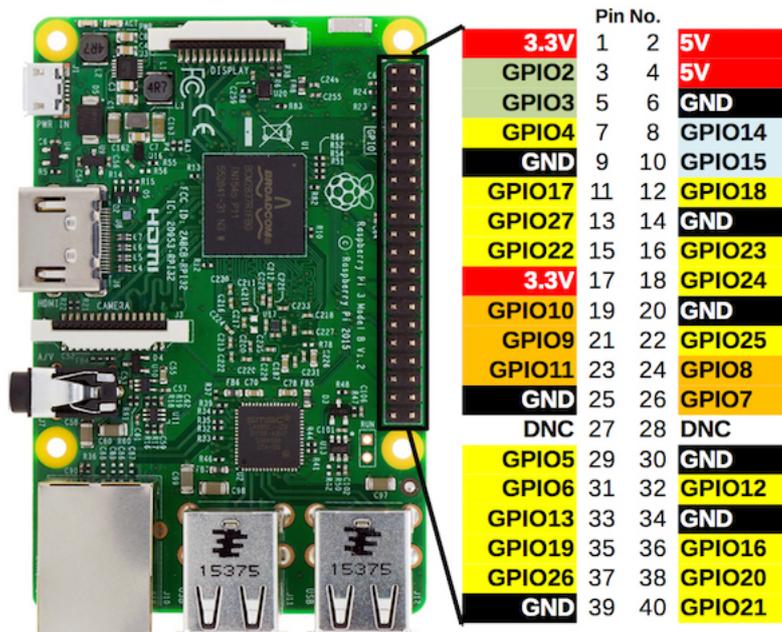


Figura 21: RaspberryPi 3 GPIO (Entrada/Salida de Propósito General).

- Anteriormente mencionamos que en el **proyecto Odín** se implementó un sensor SparkFun para tomar lectura de aceleraciones en los 3 ejes X, Y y Z con una sensibilidad de $\pm 2g$ a 40Hz. El RaspberryPi 3 recibe esta información a través del puerto USB y la sincroniza con su reloj interno previamente actualizado por medio de internet con el protocolo NTP. El programa escrito en Python se encarga de almacenar esta información en archivos cada 5 minutos dentro de un árbol de carpetas categorizadas de acuerdo a la localización, dispositivo y fecha. Después, transmite el archivo al servidor central con Owncloud por medio del protocolo HTTP. Esto permite tener una tasa de actualización cada 5 minutos aunque puede ser mejorada según el requerimiento del trabajo.
- El **proyecto Volcano**, a diferencia del proyecto Odín, no depende de internet, su actualización de horario lo hace a través del reloj RTC de alta precisión previamente sincronizado con el protocolo NTP. Este proyecto cuenta con un RaspberryPi Zero con un programa escrito Python que se encarga de mandar por el puerto Serial RX-TX la información del horario al Sparkfun a una frecuencia de 40Hz y, finalmente, se guarda la información directamente en la Micro SD del sensor SparkFun.

Posteriormente a la obtención de datos se realizaron múltiples análisis aplicando filtros de señal, corrección de ejes, transformadas de Fourier y múltiples funciones para la validación e interpretación de la información obtenida, ver sección de resultados.

4.2.3 Almacenamiento de información

Las plataformas de almacenamiento o nubes más utilizadas en la actualidad, como Dropbox o GoogleDrive, tienen límites de capacidad y la contratación del servicio para mejorar el almacenamiento incrementa el costo del proyecto de este trabajo considerablemente. Eso llevó a la búsqueda y instalación de **Owncloud**, plataforma que permite tener una nube personal, montada en un servidor propio, para almacenar grandes cantidades de información y a tiempo real. Teniendo la posibilidad de aumentar la capacidad de almacenamiento agregando más discos duros al servidor sin menor dificultad.

Owncloud es un programa desarrollado para funcionar en un ambiente UNIX con LAMP instalado, en nuestro trabajo utilizamos Apache y Ubuntu server 16.04 para alojar la nube, se estableció la seguridad fundamental para proteger la información y la comunicación de los dispositivos con el servidor. Los dispositivos externos pueden interactuar con el servidor a través de las aplicaciones que Owncloud ofrece compatibles con Android, iOS, MAC OS y Windows. Además, tiene disponibles APIs para poder implementar la comunicación con cualquier lenguaje de programación compatible con el protocolo HTTP o HTTPS. También, existen librerías en python que facilitan la comunicación con Owncloud como pyOwncloud y pycli.

Owncloud es una solución integral para proyectos con la necesidad de guardar grandes cantidades de información y compartirla de manera fácil y eficiente con distintos usuarios que se encuentran trabajando en colaboración, motivo por el cual fue la plataforma seleccionada en este trabajo.

4.3 PROTOTIPOS

Gran parte de este trabajo se dedicó a la explicación y desarrollo de Software y Hardware para utilizar los sensores SparkFun como sensores sísmicos, pero una vez concluida esa parte, el siguiente paso fue diseñar y ensamblar el prototipo final para realizar pruebas.

El prototipado es un área importante en la industria e investigación, porque todo desarrollo necesita un producto final que pueda ser utilizado y cumpla con su cometido. En el caso de desarrollo en hardware, es común pensar en que se necesita un gabinete o carcasa para presentar el producto final, sin embargo, el costo de producción del gabinete puede ser excesivo debido a que, generalmente, se requiere una producción mínima de 100 o 1000 unidades y un tiempo de espera prolongado. Entonces, nos encontramos con el problema en que si deseamos tener un producto final con gabinete de plástico necesitamos una alternativa más económica y accesible.

La solución a este problema es la impresión 3D donde existen distintos tipos como la Estereolitografía (SLA), Sinterización Selectiva por Láser (SLS) y Impresión por deposición de material fundido (FDM). Estas son alternativas donde el desarrollador puede imprimir desde solo 1 molde para realizar pruebas con su prototipo y, así, mejorar su diseño de manera rápida y económica. Para nuestro caso, en este proyecto se imprimió el gabinete del dispositivo utilizando FDM.

Pero para poder imprimir el gabinete del prototipo necesitamos un modelo 3D previo, el cual se puede realizar con distintos software CAD que permiten modelar perfectamente cualquier tipo de figura o forma en 3D, los CAD más utilizados son SolidWorks, Fusion360, Blender, AutoCAD, entre otros. Estos programas tienen la capacidad de exportar el archivo para su impresión 3D final, sin embargo, para este trabajo decidimos utilizar Fusion360, debido a que su plataforma ofrece licencias gratuitas a estudiantes por 3 años. Posterior al modelado en 3D, solo se necesita utilizar un Slicer para generar el código Gcode que la impresora va a leer para poder imprimir el modelo, [Figura 22](#).

A continuación se presenta un tema importante para explicar como se transforma la señal recibida del sensor para estandarizar en un mismo plano.

4.4 TRASFORMACIÓN DE EJES A UN MISMO PLANO

Con ambos dispositivos del proyecto *Odín* y *Volcano*, sincronizados y recolectando información, ahora, es necesario disminuir el error humano durante la instalación de los dispositivos, a pesar de que cuentan con una brújula para orientarlos correctamente al Norte, no podemos asegurar el nivel del suelo o la superficie donde estos se colocan, es por eso que aplicaremos

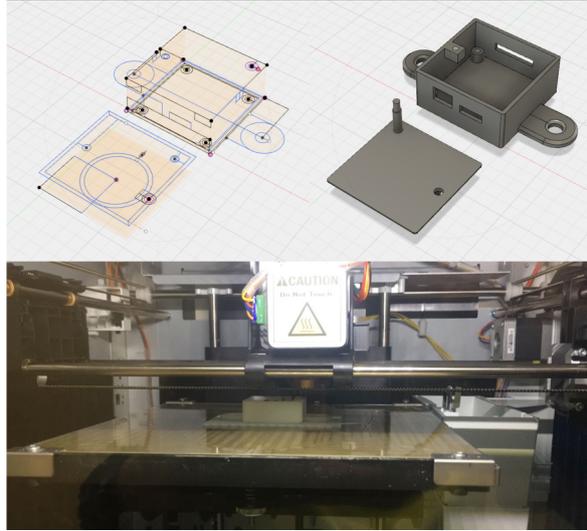


Figura 22: En la imagen se observa el proceso de modelado en 3D a través del CAD Fusion 360 y la impresión final con FDM.

una corrección los ejes según su ángulo de inclinación. Este proyecto se enfoca en tener un plano de referencia universal entre los dispositivos colocados a una distancia menor a 200 km para validar la hipótesis inicial. Entonces, para lograr esto comenzamos con la suposición de que el dispositivo fue colocado correctamente apuntando hacia el Norte en el Eje Y.

Después, calculamos la inclinación en el eje X y Y basándonos en que la atracción gravitacional debe ser paralela a la aceleración recibida en el eje Z del dispositivo, y como consecuencia debe ser cero o nula en los ejes X y Y. De esta manera se utiliza el promedio de la aceleración en los ejes X y Y durante un tiempo de 5 minutos (suponiendo que no hubo ningún acontecimiento extraordinario en ese lapso de tiempo) para calcular la inclinación en los ejes mencionados utilizando siguientes ecuaciones:

$$\theta_x = \text{atan} \left(\frac{a_x}{g_z} \right) \quad (36)$$

$$\theta_y = \text{atan} \left(\frac{a_y}{g_z} \right) \quad (37)$$

Donde, $g_z = 1$ es la aceleración gravitacional ya normalizada en el dispositivo, a_x y a_y , son las aceleraciones registradas por el sensor en los ejes X y Y, respectivamente, θ_x y θ_y son los ángulos de inclinación respecto al plano horizontal XY para ambos



Figura 23: Colocación de sensores en dirección al Norte en el Eje Y del sensor SparkFun.

ejes. A continuación, presentamos las matrices de transformación X y Y , suponiendo que el eje Y ya se encuentra orientado correctamente.

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\text{sen}\varphi \\ 0 & \text{sen}\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \text{sen}\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (39)$$

Donde R_x y R_y son las matrices de transformación que se utilizan para computar el producto punto con la aceleración en los ejes X , Y y Z utilizando el ángulo $\varphi = \theta_x$ para la rotación en X y $\varphi = \theta_y$ para la rotación en Y , [Figura 37](#). No hace falta calcular el ángulo de rotación en el eje Z ni la matriz de transformación ya que, en este trabajo, se consideran los sensores orientados correctamente hacia el norte como se muestra en la [Figura 23](#).

Finalmente, después de aplicar las constantes de rotación para ambos ejes, obtenemos una base de datos en un mismo plano de referencia utilizando distintos dispositivos y en diferentes puntos del sitio de estudio. Esto beneficia en sentido que

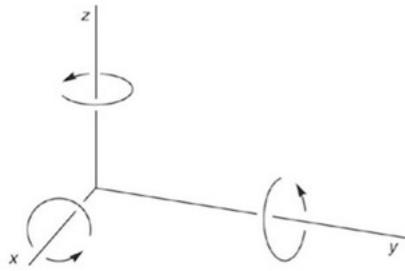


Figura 24: Dirección y sentido en que se aplican los ángulos de rotación.

ahora podemos detectar y localizar la dirección de movimiento sísmico de la Tierra con mayor precisión, observando la dirección de la primer onda de arribo al sensor (onda P).

Ahora continuaremos con la sección de análisis y resultados, donde presentaremos las pruebas que fueron realizadas con los sensores para determinar la frecuencia de lectura y una prueba de campo realizada con los dispositivos del proyecto *Odín*.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 VALIDACIÓN DE SENSORES

La validación de los dispositivos SparkFun IMU Razor 9DoF como sensores sísmicos fue importante para continuar con el desarrollo de este trabajo, por lo cual, primero fue necesario realizar pruebas donde se modelaron e imprimieron en 3D plataformas especiales que pudieran ser compatibles con la cama de vibración en el CIMAV, la cual solo vibra en una dirección (eje Z). Estas plataformas tuvieron paredes de 3mm de espesor que permitieron colocar el sensor firmemente en los distintos ejes X, Y y Z, como se muestra en la [Figura 25](#).

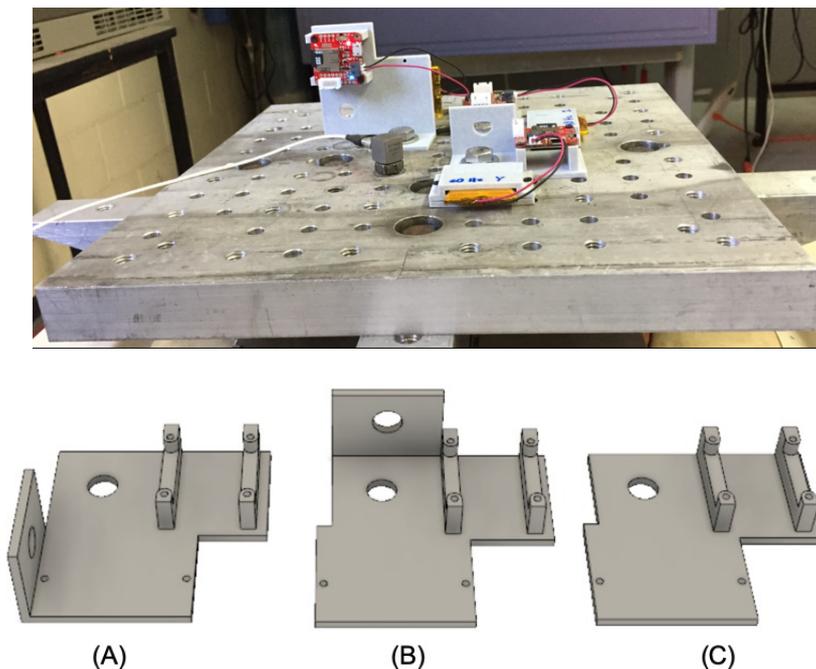


Figura 25: Montaje de los dispositivos SparkFun en los ejes X, Y y Z sobre la plataforma de vibración, figuras (A), (B) y (C).

También se modelaron plataformas para colocar el sensor en los ángulos de 60° en el eje Y, 30° en el eje Y y 15° en el eje X con 30° en el eje Y, como se muestra en la [Figura 26](#) (A), (B) y (C).

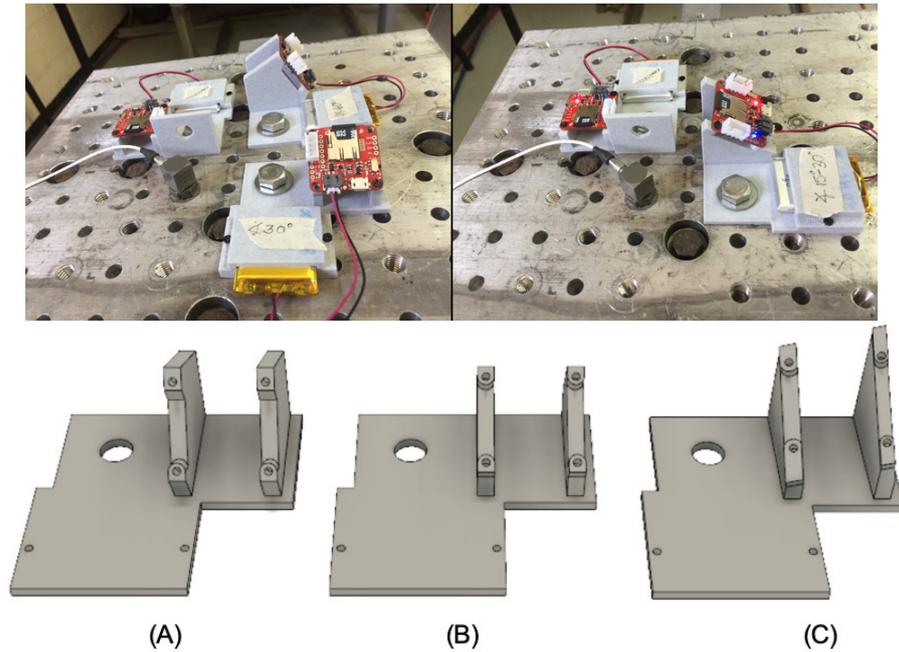


Figura 26: Montaje de los dispositivos SparkFun en plataformas con distintas inclinaciones sobre la cama de vibración del CIMAV.

La información recolectada en estas pruebas fue procesada mediante el uso de Python, donde se graficaron los datos originales, se obtuvieron los espectrogramas y se aplicó la transformación de Fourier para analizar los espectros de frecuencias, además los resultados se compararon con el espectro introducido en la computadora de la cama de vibración, [Figura 27](#).

En la gráfica anterior se muestra un ejemplo de como se calculó el espectro introducido en el equipo del CIMAV, también se observa que la densidad de frecuencia mas alta corresponde entre los 3 y 5Hz, resultado que deberá ser observado a lo largo de todas las siguientes pruebas. Como nota, este espectro es el mismo para todas las pruebas por lo que se omite la repetición de esta gráfica. También, es importante mencionar que todas las pruebas se realizaron con el sensor SparkFun conectado a una batería LiPo, debidamente sujetado a la cama de vibración. La información se recolectó en memorias micro SD y se procesaron en Python, donde se graficaron los datos originales obtenidos con el título de "Señal", se aplicó la transformación de Fourier, se generaron archivos en formatosac (formato universal de datos sísmicos) y se procesaron con Obspy para obtener las gráficas del espectro de frecuencias (espectrograma).

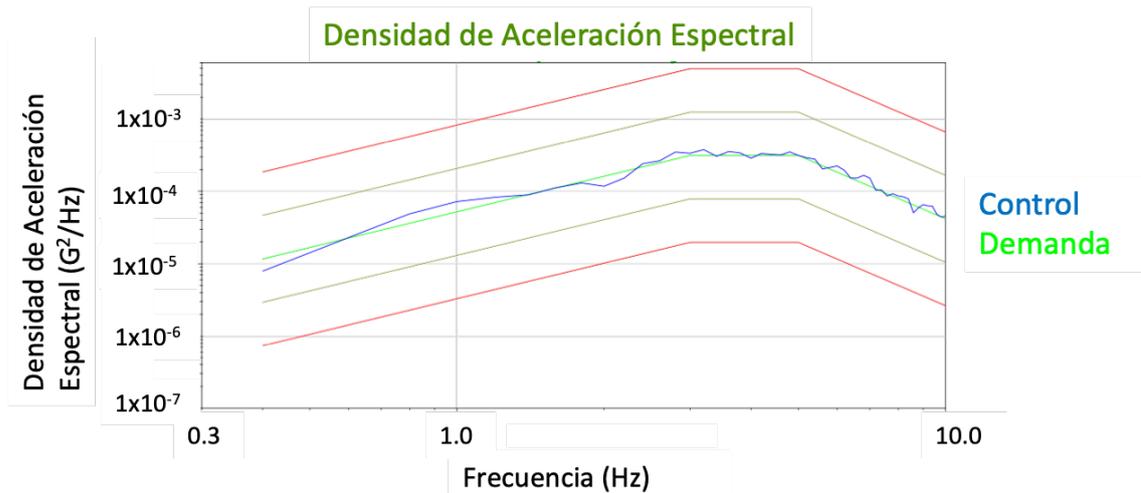


Figura 27: Espectro generado por la cama de vibración con los parámetros introducidos en el equipo del CIMAV.

Posteriormente, las señales recolectadas con los ángulos de inclinación mencionados anteriormente se aplicó una rotación para observar si es posible obtener una señal limpia en Z aunque el sensor este inclinado (la inclinación se puede calcular al comparar los ejes X, Y y Z respecto a la aceleración gravitacional), esta prueba fue de vital importancia ya que corrige el error humano, por ejemplo, por una mala nivelación del suelo donde se coloca el sensor. A continuación se presentan las pruebas de calibración:

- **Primero**, se colocaron los 3 sensores configurados a tres frecuencias diferentes: 40, 60 y 80Hz. Seleccionando la frecuencia de 40Hz ya que generaba menos ruido de fondo. En las gráficas de la [Figura 28](#) se observa claramente que a mayor frecuencia el ruido, en el rango entre los 10 a 20Hz, aumenta considerablemente siendo la frecuencia óptima a 40Hz. Se propone que este ruido de fondo es causado por la electrónica de los dispositivos MEMS.
- **Segundo**, se realizó una prueba de control colocando los 3 sensores en un mismo eje Z a la misma frecuencia de 40Hz, frecuencia con la que se realizaron todas las pruebas y análisis posteriores a este momento. En las gráficas de la [Figura 29](#) se observa las transformaciones de Fourier, así como los espectrogramas donde vemos un aumento de señal en la frecuencia entre 3-8 Hz, que corresponde a las rampas introducidas en el equipo del CIMAV como se mostró en la [Figura 27](#).

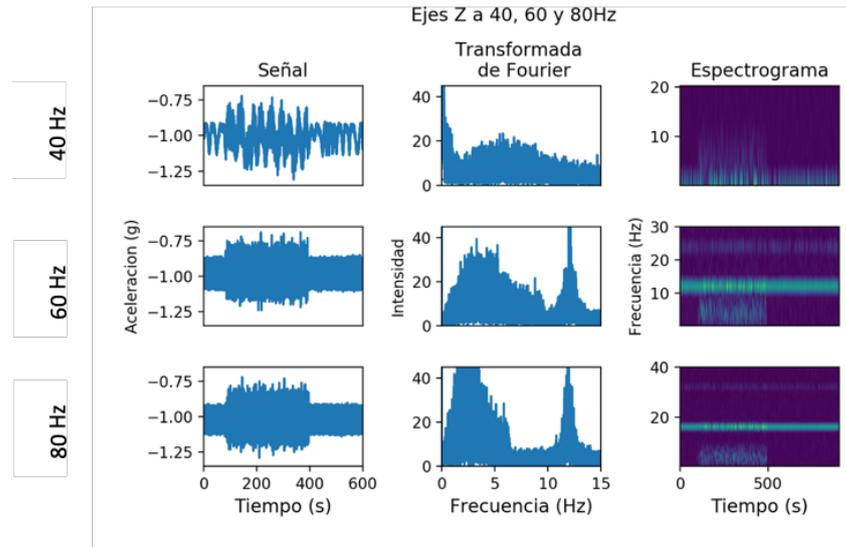


Figura 28: Gráficas a diferentes frecuencias en el eje Z.

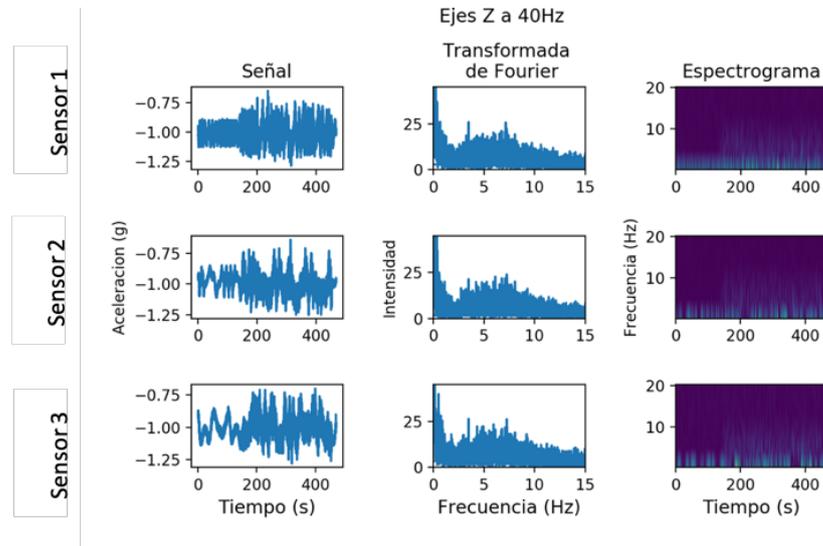


Figura 29: Gráficas de los 3 sensores en el mismo eje Z a 40Hz.

- **Tercero**, se montaron los tres sensores en diferente eje: X, Y y Z. Comprobando que los sensores tuvieron una sensibilidad igual o parecida, debido a que el resultado en la transformación de Fourier y el espectrograma muestra claramente que se conserva la señal de frecuencias en los 3 sensores sin importar el eje, [Figura 30](#).

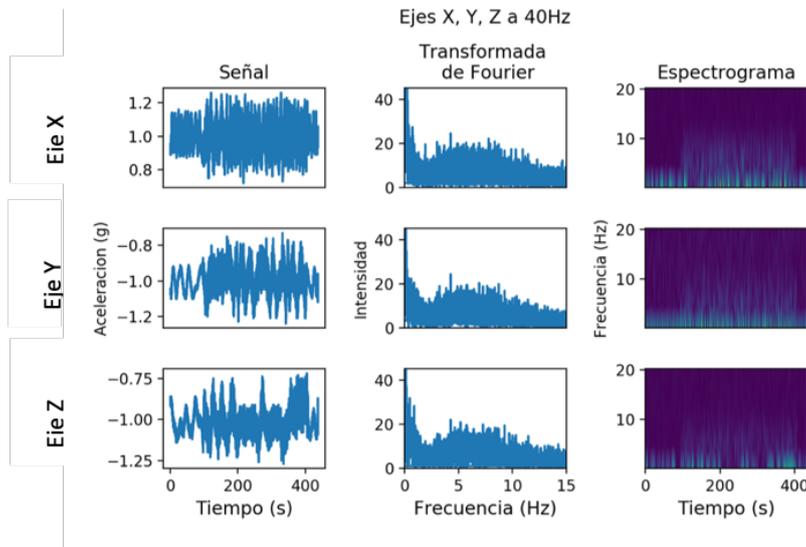
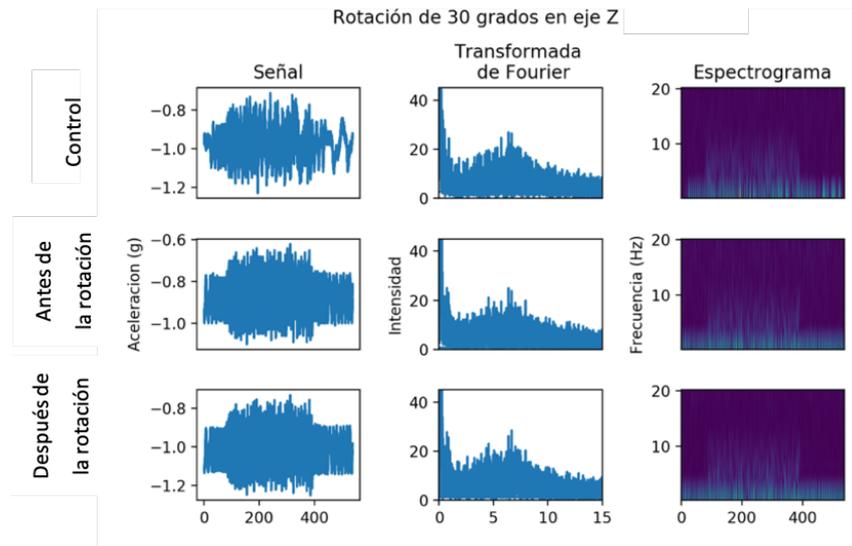
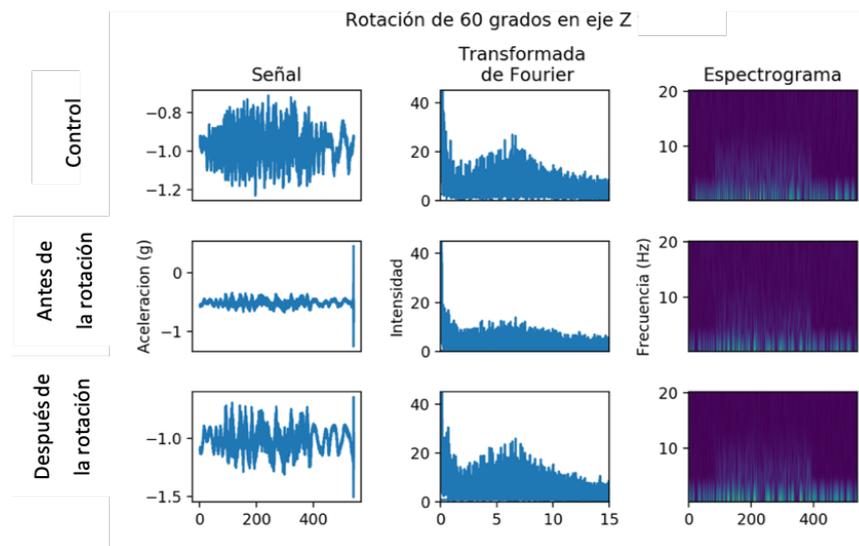


Figura 30: Gráficas en los ejes X, Y y Z a 40Hz.

- **Cuarto**, se colocaron las bases con los ángulos de 60° en el eje Y, 30° en el eje Y y una combinación de 15° en el eje X con 30° en el eje Y, ver [Figura 31](#), [Figura 32](#) y [Figura 33](#) respectivamente. Después, se aplicó la rotación a los ejes correspondientes y se compararon los resultados con un sensor de control donde se demostró que es posible rescatar la señal del sensor con inclinación y establecer un plano de referencia universal aplicando la rotación a los ejes según su ángulo de inclinación tomando como referencia el vector de aceleración gravitacional paralela al eje Z. En las gráficas correspondientes a cada inclinación y su rotación, se aprecia el aumento de intensidad de señal, así como el valor promedio cercano a $-1g$ después de la rotación en la prueba de control, demostrando que la rotación se realizó con éxito, este resultado se repite para todas las pruebas con inclinación.

Figura 31: Gráficas para un ángulo de 30° en el eje Y a 40Hz.Figura 32: Gráficas para un ángulo de 60° en el eje Y a 40Hz.

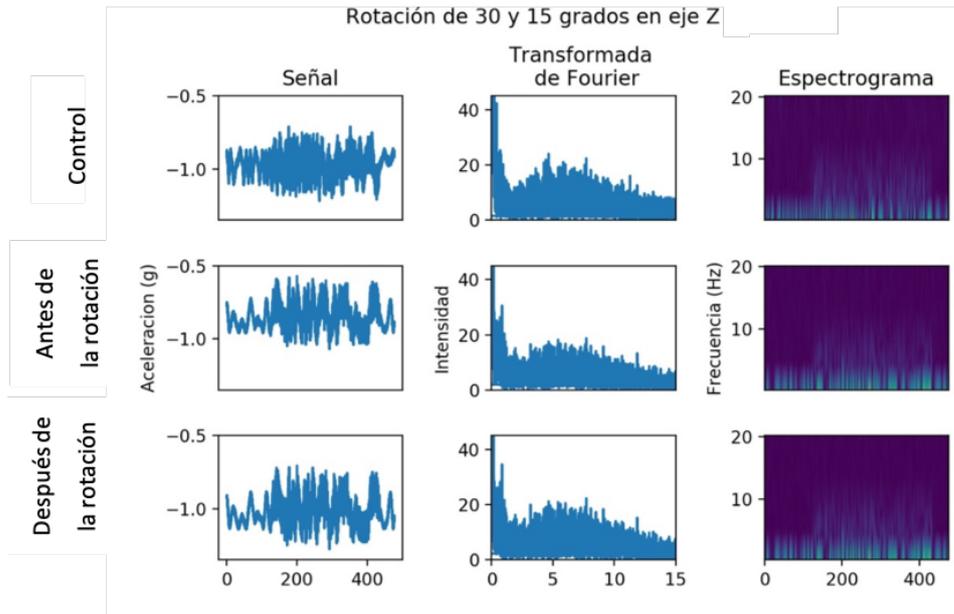


Figura 33: Gráficas para un ángulo de 15° en el eje X con 30° en el eje Y a 40Hz.

Concluimos con las pruebas donde validamos que se cuenta con la sensibilidad suficiente en los sensores para detectar frecuencias desde 3-8 Hz, además de es posible la corrección del error de inclinación por una mala instalación del sensor, aplicando la rotación correspondiente. Así, procedemos con la explicación y ensamble de los proyectos Volcano y Odín donde este sensor fue la pieza central para el registro de actividad sísmica.

5.2 MODELOS 3D PARA DISPOSITIVOS

Ahora, como recordaremos nuestro modelo se basa en el proyecto QCN de la universidad de Standford, donde se usa una brújula para su orientación al norte en un dispositivo compacto, así, modelamos la carcasa del proyecto *Odín* y el proyecto *Volcano*. La carcasa del **proyecto Odín** es un encapsulado del sensor SparkFun con una brújula sobre la tapa. Por otro lado, la carcasa del **proyecto Volcano** es un poco más elaborada ya que incorpora un RTC y el sensor SparFun en la parte inferior y un RaspberryPi zero en la parte superior con una brújula en la tapa para su orientación, [Figura 34](#).

El ensamble para estos dispositivos, involucró preparar el hardware y dejarlo listo para que al conectar a una fuente de luz sea funcional, en otras palabras, nos referimos al proceso de soldar las conexiones pertinentes para su funcionamiento

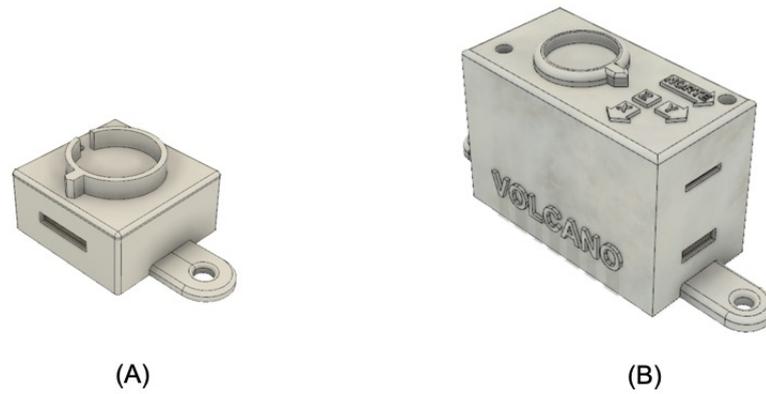


Figura 34: Carcasas para el dispositivo del proyecto *Odín* (A) y el proyecto *Volcano* (B).

y atornillar los componentes dentro de sus carcasas. A continuación se presenta un esquema donde se muestran los componentes en ambos proyectos:

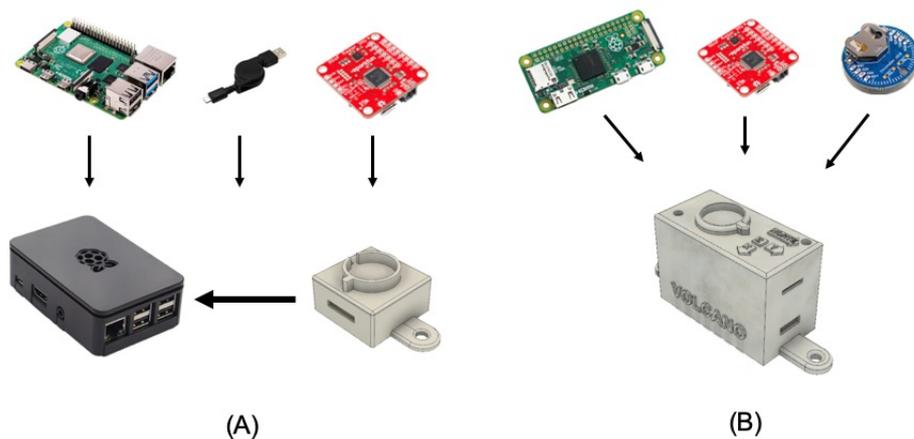


Figura 35: Ensamble de los componentes del proyecto *Odín* (A) y proyecto *Volcano* (B). El proyecto *Odín*, incluye el uso de un RaspberryPi 4 y el sensor SparkFun IMU Razor 9DoF conectados con un cable MicroUSB a USB. El proyecto *Volcano*, utiliza un RaspberryPi Zero, un RTC y el sensor SparkFun IMU Razor 9DoF.

Aunque ambos proyectos ya se encuentran funcionales, este trabajo solamente muestra como caso de estudio la ciudad de Chihuahua con el proyecto *Odín*, donde se obtuvieron resultados aceptables, es importante notar que este proyecto se realizó a una frecuencia de 60Hz lo que aumenta considerablemente el ruido de fondo como se comprobó en las pruebas de calibración. Los resultados se muestran a continuación.

5.3 RESULTADOS PRELIMINARES DEL ESTUDIO EN LA CIUDAD DE CHIHUAHUA, CHIH.

Este estudio se realizó utilizando el proyecto Odín dado que está diseñado para poder utilizar los sensores de manera remota y sin la interacción humana durante meses, gracias a su conectividad con internet y comunicación con el servidor central. Los requerimientos de este proyecto son: una conexión a internet por cable o inalámbrico y conexión de luz.

Durante este estudio, se instalaron los sensores en 3 puntos de la ciudad separados entre 5 y 8 kilómetros de distancia, ver [Figura 36](#). Se colocaron en el suelo firme, lejos de cualquier fuente magnética que pudiera afectar la dirección de la brújula (mínimo a 1 metro alejado de cualquier aparato electrónico) y lejos de fuentes de ruido como son las puertas. Una vez instalados los sensores, configurados con su nombre y debidamente orientados al norte, permanecieron 10 días activos para esta etapa del trabajo recolectando información para su análisis posterior. Aunque este trabajo solo muestra 10 días de información, se mantuvo un monitoreo constante los meses consecuentes.



Figura 36: Localización de sensores en la ciudad de Chihuahua, Chih.

Las mediciones con los sensores fueron realizadas del 21 de abril al 1 de mayo de 2018, con un total de 10 días. Previo al análisis de información se realizó una limpieza de los datos dañados que pudieran afectar los resultados, posteriormente se crearon los archivos sac para poder analizar con Obspy u otros programas de uso en la investigación de movimientos sísmicos. Además, se hizo la corrección de las aceleraciones según su án-

gulo de inclinación, el cual se calculó con los promedios de las aceleraciones registradas en los ejes X y Y, los cuales deberían ser cero, y en el eje Z el cual debería ser igual a la aceleración gravitacional, ver [Figura 37](#).

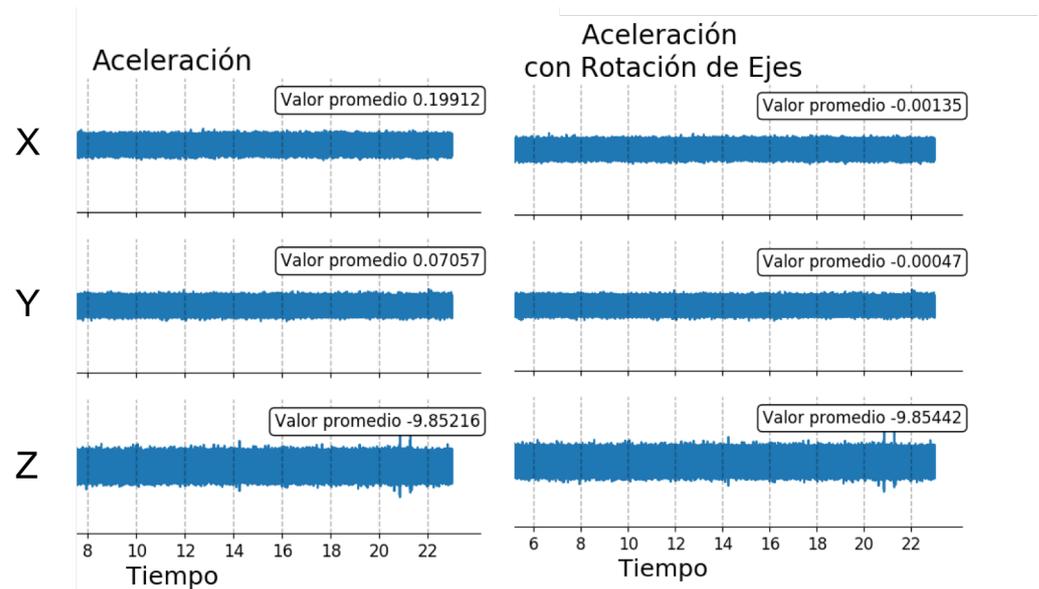


Figura 37: Gráficas de los 3 ejes para un solo sensor antes y después de aplicar la rotación según su inclinación calculada.

En la [Figura 37](#), se puede notar la diferencia en el promedio de los valores antes y después de aplicar la rotación, donde el valor se acerca más al cero en los ejes X y Y después aplicar la rotación.

Finalmente, como se muestra en la [Figura 38](#), se hizo una comparación entre el eje Z de los 3 sensores colocados en la ciudad de Chihuahua el 25 de abril de 2018 con los datos proporcionados por el Servicio Sismológico Nacional de la estación en Casas Grandes, Chihuahua. Confirmando que los sensores colocados en la ciudad de Chihuahua registraron de manera exitosa sismos registrados por la estación del SSN provenientes de las zonas de Oaxaca y Puebla, entre otros epicentros.

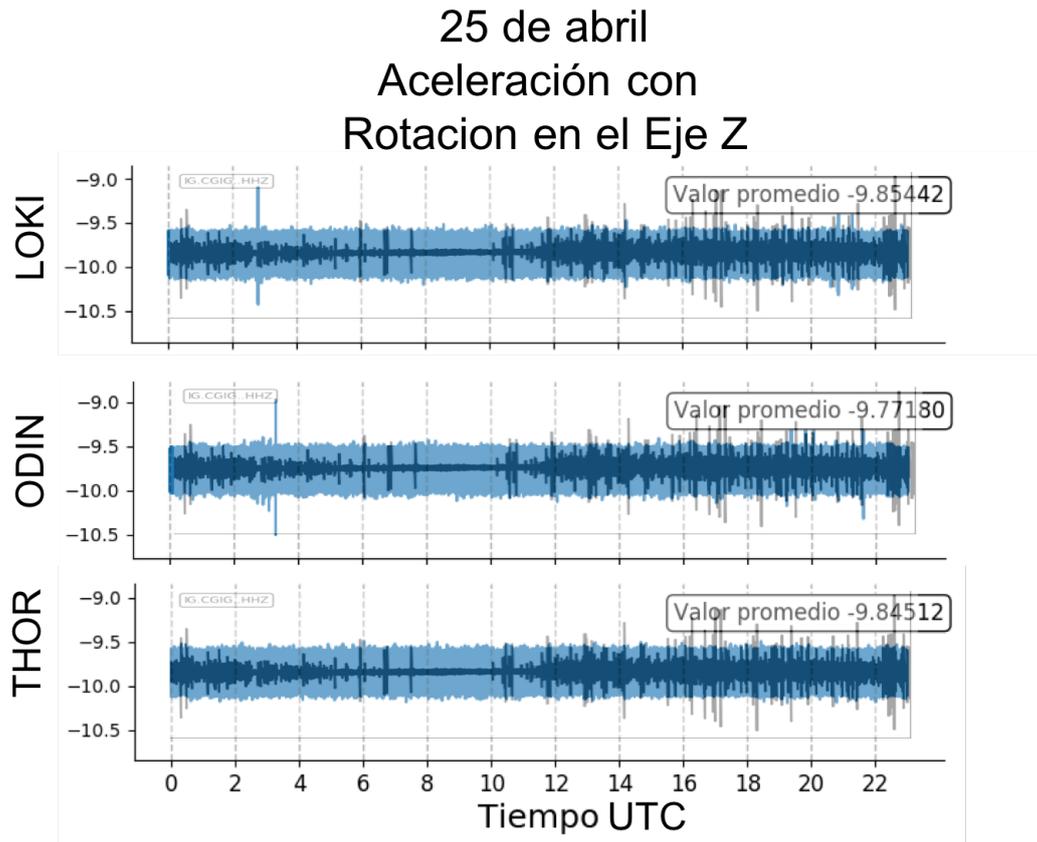


Figura 38: Registro de la señal en el eje Z después de la rotación en los 3 sensores colocados en la Chihuahua, Chih. (azul) comparado contra el registro de la estación del SSN en Casas Grandes, Chih. (gris) para el día 25 de abril de 2018.

CONCLUSIÓN

El estudio de sismicidad en el país es importante para explicar las catástrofes naturales y desastres causados por los grandes terremotos que acontecen con regularidad. Recolectar la información sísmica y el análisis posterior beneficia a la comunidad científica, mientras que, la creación de alarmas de prevención de movimientos sísmicos evita muertes humanas. Actualmente, el Servicio Sismológico Nacional esta involucrado en estos aspectos de investigación y prevención, pero cuentan con el problema del alto costo en implementación de cada una de las estaciones sísmicas. Así, el dispositivo desarrollado, explicado y probado en este documento, es una solución a este problema. Como se realizo con éxito en Estados Unidos con el proyecto O'navi de la Universidad de Stanford, ahora, nosotros también podemos hacerlo con el proyecto Odín para una red atrapa sismos o el proyecto Volcano para el estudio en múltiples zonas con actividad sísmica y de difícil acceso.

Se registro correctamente, en las pruebas realizadas con el sensor SparkFun, la señal producida por la cama de vibración en el CIMAV y se **confirma la hipótesis inicial** al transformar, según su ángulo, los ejes principales a un mismo plano de referencia (sensor de control) obteniendo los mismos resultados en los espectros de frecuencia. Así, se pueden obtener las intensidades vibracionales para los ejes principales a un plano tangencial *universal*, perpendicular al vector de aceleración gravitacional y con dirección al norte.

Con una sensibilidad óptima de $\pm 2g$ y a una resolución de 40Hz, hemos comprobado que podemos captar perfectamente sismos desde magnitud 3 en la escala de Richter a cortas distancias. Esta es una completa innovación tecnológica, que incluso supera al proyecto O'navi de Stanford al mejorar su independencia de una computadora, desarrollada e implementada en la ciudad de Chihuahua. Donde, hemos corroborado que existe actividad sísmica de interés y que es captable por nuestros sensores.

REFERENCIAS

- [1] Anónimo. *El increíble detector de terremotos inventado hace casi dos milenios atrás*. 2016. URL: <https://mysteryplanet.com.ar/site/el-increible-detector-de-terremotos-inventado-hace-casi-dos-milenios-atras/>.
- [2] Anónimo. *¿Cuál es la diferencia entre magnitud momento y magnitud Richter?* 2019. URL: <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/2326-cual-es-la-diferencia-entre-magnitud-momento-y-magnitud-richter>.
- [3] María Carmen Gil Arroyo. *Inversión de la fuente de los sismos volcanotectónicos*. 2018. URL: <https://docplayer.es/92335411-Inversion-de-la-fuente-de-los-sismos-volcanotectonicos-subdireccion-de-riesgos-volcanicos-direccion-de-investigacion.html>.
- [4] Construction and Design. *Earthquake: Body Waves & Surface Waves*. 2017. URL: <http://constructionanddesign.blogspot.com/2016/02/earthquake-body-waves-surface-waves.html>.
- [5] Real Académica Española. *lenguaje*. URL: <https://dle.rae.es/?id=N7BnIF0>.
- [6] Donald E. Knuth. "Computer Programming as an Art." In: *Communications of the ACM* 17.12 (1974), pp. 667–673.
- [7] Mayacm. *Nacimiento tectónicas de placas*. URL: <https://www.timetoast.com/timelines/nacimiento-tectonicas-de-placas>.
- [8] Burton McCullom and Orville S. Peters. "A New Electric Telemeter." In: *National Bureau of Standards* 17.247 (1924).
- [9] Germán Portillo. *Capas de la Tierra*. 2017. URL: <https://www.meteorologiaenred.com/capas-tierra.html>.
- [10] QCN. *Sensors, MEMS Accelerometers*. 2016. URL: <http://quakecatcher.net/about/sensors/>.
- [11] J. Mireles R. I Rincon-Jara R. Ambrosio. "Análisis y caracterización de un acelerómetro capacitivo fabricado con tecnología polymump's." In: *Superficies y Vacío* 23 (2010). Ed. by Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales, pp. 26–31.

- [12] Peter M. Shearer. *Introduction to Seismology*. 1st. San Diego,CA, USA: Cambridge university Press, 2009.
- [13] Perry C. C. Starr J. E. Dorsey J. "50 Years of the Bonded Resistance Strain Gage An American Perspective." In: *IMEKO XI World Congress (1988)*, pp. 259–279.
- [14] P. K. Stein. "The Early Strain Gage Accelerometers: The Inventors and Their Times." In: *The Shock and Vibration Bulletin Part II (2007)*.
- [15] Terry C. Wallace Thorne Lay. *Modern Global Seismology*. Volume 58 in the International Geophysics Series. San Diego,CA, USA: Academic Press, 1995.
- [16] Patrick L. Walter. "The History of the Accelerometer." In: *Sound and Vibration (2007)*, pp. 84–92.

CURRICULUM VITAE

Francisco Montes Fonseca con nacionalidad Mexicana , nacido el 04 de noviembre de 1993. Cuenta con el grado académico en Ingeniería Física por Universidad Autónoma de Chihuahua, titulado con la tesis titulada "Metodología para la caracterización de las propiedades eléctricas en el sensado de gases por materiales semiconductores". Además, tiene 2 especialidades en Python impartidos por la University of Michigan, experiencia en la bolsa de valores Mexicana siendo 3er lugar en el 6th Certainen Intrauniversitario Accigame de Banamex.

Sus publicaciones más recientes fueron en el 2017 con el artículo científico *Role of oxygen vacancies and In-doping on the sensing performance of ZnO particles* en la revista *physica status solidi c*, 2 artículos de divulgación con los títulos *Telescopio San Pedro Mártir (TSPM)* en revista FING UACH y *¿Alguien quiere saber que es la materia oscura?* en la revista TIBÚAME de la Auditoría Superior de Chihuahua. También, en el 2017 tuvo participación en Noche de la Estrellas Chihuahua con la conferencia *El lado Oscuro del Universo*.

Tiene experiencia en múltiples sistemas operativos, programando en la mayoría de ellos. Desarrolla principalmente códigos en Python para resolver, acelerar o automatizar trabajos y tareas. También, ha desarrollado la implementación de acelerómetros como sensores sísmicos en la ciudad de Chihuahua (configuración, impresiones 3D, almacenamiento en servidores y procesamiento de metaDatos).

Dirección de correo electrónico:
pacomontes93@gmail.com

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por Francisco Montes Fonseca.