



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

SEDE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MESA SÍSMICA UNIDIRECCIONAL
CON UNA ESTRUCTURA A PEQUEÑA ESCALA PARA ANÁLISIS DE
ACELERACIÓN DE UN SISMO**

Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Carlos Escobar Zepeda

Alumno: Marco Antonio Bastidas Medina

Concepción, Enero 2019

© Marco Antonio Bastidas Medina

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA.

En Concepción, el _____, los abajo firmantes dejan constancia que el alumno Marco Antonio Bastidas Medina de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para Optar al título de Ingeniero Civil con una nota de _____.

Profesor Carlos Escobar Zepeda

Profesor MSc Patricio Ananías Uarac Pinto

RESUMEN

Los sismos pueden causar grandes daños en una estructura. Por ello se ha visto en la necesidad de investigar cómo mitigar estos efectos. Para lograrlo, se han creado diversos sistemas de monitorio que buscan estudios más acabados al respecto. La presente memoria indaga en resolver la problemática anteriormente mencionada mediante una mesa sísmica que es una herramienta muy utilizada en diversas universidades de Chile y el mundo.

La mesa sísmica en cuestión busca interpretar mediante un gráfico la “aceleración vs tiempo” de un sismo real en una estructura y en un eje de coordenadas, para obtenerlo se debió escoger los materiales a utilizar y lograr una correcta calibración de ellos. Utiliza el *software* Arduino con una librería PID que ayuda a eliminar datos de inestabilidad del sistema. También controlado por Arduino está el servomotor de giro continuo que es encargado de generar el movimiento de la mesa sísmica y dos sensores modelo MPU6050 que miden las aceleraciones (en la planta y techo de la estructura).

Se obtiene como resultados gráficos de “Aceleración vs Tiempo” que se generan durante el proceso de simulación del sismo real. Estos gráficos no logran ser similares a los reales, ya que el proceso provoca algunos cambios en los datos de entrada.

La comparación de aceleraciones entre la base y azotea logra acercarse a la realidad, obteniendo valores lógicos de un movimiento sísmico.

ABSTRACT

For civil engineers is very important seismic engineering due to damage caused by earthquakes in structures. For this reason, it has been necessary to investigate how to mitigate these effects. To achieve this, various monitoring systems have been created that seek more finished studies in this regard. The present report investigates in solving the aforementioned problems through a seismic table that is a tool widely used in various universities in Chile and the world.

The seismic table in question seeks to interpret by means of a graph the "acceleration vs time" of a real earthquake in a structure and in a coordinate axis, in order to obtain it, it was necessary to choose the materials to be used and achieve a correct calibration of them. It uses the Arduino software with a PID library that helps eliminate data from system instability. Also controlled by Arduino is the continuous-motion servomotor that is responsible for generating the movement of the seismic table and two MPU6050 sensors that measure the accelerations (in the plant and roof of the structure).

It is obtained as graphical results of "Acceleration vs Time" generated during the simulation process of the real earthquake. These graphics do not manage to be similar to the real ones, because the process causes some changes in the input data.

The comparison of accelerations between the base and the roof makes it possible to approach reality, obtaining logical values of a seismic movement.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quiero agradecer a Dios por darme la sabiduría y fortaleza necesaria para lograr llegar a estas instancias. Agradecer a mis papás Roberto Bastidas y Teresa Medina por acompañarme en esta ardua y dura tarea, por darme las herramientas necesarias para poder estudiar y apoyarme en todas mis decisiones, sin ustedes nada de esto sería posible, Simplemente Los Amo mis viejitos lindos. Quiero también mencionar a Luciana Riquelme, una personita que llevo hace un año y que ha sido mi gran compañera de vida, apañadora y a trasnochado junto conmigo para terminar luego la tesis, Te Amo mi preciosa. También mencionar a mis hermanos, sobrinos, tíos, primos y abuelos que siempre están atentos a como estoy y han sido de gran apoyo en mi vida. Mis amigos de la vida que, aunque no nos vemos siempre están presentes en esta linda etapa. Otras personas no menos importantes, son mis amigos de la U que siempre estaban ayudando cuando se presentaban dificultades, pasando cuadernos, haciendo trabajos juntos, o tan solo compartiendo un rato, los quiero cabros. Quiero también agradecer al profesor Luis Angulo por darme su apoyo en todo momento, retarme si era necesario para sacar esto adelante, por abrirme las puertas del MakeitLab donde pase la gran parte del semestre, era como mi segunda casa. Agradecer al profesor patricio Uarac por ir todos los días a ver cómo iba con la tesis, darme tips importantes y en ocasiones sentarse por largo rato y ayudarme a resolver las tantas dudas que tenía, tiene una paciencia única y es sin dudas el mejor profesor de ingeniería civil de la U. También quiero dar las gracias a Francisco por ayudarme en la programación y estar dispuesto a todas las dudas que se me presentaban. Y por último agradecer a mi profesor guía Carlos Escobar por darme la oportunidad de trabajar junto a él y su equipo, es una gran persona que deja huellas en los alumnos que se topan con él, no cambie nunca su forma de ser profe, gracias por todo.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CAPITULO 1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN | 2 |
| 1.3 OBJETIVOS GENERALES..... | 3 |
| 1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS | 3 |
| 1.5 METODOLOGIA | 3 |
| 1.6 ALCANCES..... | 4 |
| CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1 SISMOS | 5 |
| 2.2 CAUSAS DE LOS SISMOS | 5 |
| 2.2.1 MOVIMIENTO OSCILATORIO DE ONDAS SISMICAS | 5 |
| 2.3 CARACTERISTICAS DE UN SISMO | 6 |
| 2.4 INGENIERÍA SÍSMICA..... | 6 |
| 2.4.1 DISEÑO SÍSMICO | 7 |
| 2.5 MESA SÍSMICA | 8 |
| 2.6 ESTADO DEL ARTE..... | 9 |
| 2.6.1 HISTORIA DE LAS MESAS SISMICAS..... | 9 |
| 2.6.2 MESAS SISMICAS EN EL MUNDO..... | 10 |
| 2.6.3 MESAS SISMICAS EN CHILE | 12 |
| CAPITULO 3 FUNDAMENTO TEORICO..... | 15 |
| 3.1 DINÁMICA ESTRUCTURAL..... | 15 |
| 3.1.1 EXCITACIONES DINÁMICAS..... | 15 |
| 3.1.2 GRADOS DE LIBERTAD..... | 17 |
| 3.1.3 UN GRADO DE LIBERTAD..... | 17 |
| 3.2 ACELERACION SISMICA | 18 |
| 3.3 VELOCIDAD SÍSMICA..... | 20 |
| 3.4 VELOCIDAD ANGULAR..... | 21 |
| 3.5 REVOLUCIONES POR MINUTO | 22 |

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|--|--|----|
| 3.6 | SISTEMA DE CONTROL..... | 22 |
| 3.6.1 | CONTROL PID..... | 23 |
| 3.6.2 | CONTROL PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADO..... | 25 |
| CAPITULO 4 ESPECIFICACIÓN TÉCNICA | | 27 |
| 4.1 | MESA SÍSMICA | 27 |
| 4.1.1 | PLATAFORMA..... | 27 |
| 4.1.2 | RODAMIENTOS LINEALES..... | 28 |
| 4.1.3 | EJE LINEAL..... | 30 |
| 4.1.4 | VARILLA ROSCADA..... | 31 |
| 4.1.5 | RODAMIENTO TIPO RÓTULA | 32 |
| 4.1.6 | DISCO EXCENTRICO | 33 |
| 4.2 | ESTRUCTURA A ESCALA..... | 34 |
| 4.3 | SISTEMA DE MONITOREO | 35 |
| 4.4 | SOFTWARE ARDUINO | 36 |
| 4.5 | HARDWARE ARDUINO | 36 |
| 4.6 | SENSOR | 37 |
| 4.6.1 | ACELEROMETRO..... | 37 |
| 4.7 | ACTUADORES | 39 |
| 4.7.1 | SERVOMOTOR | 39 |
| 4.8 | ENSAMBLE MESA SÍSMICA | 41 |
| CAPITULO 5 PARAMETROS DE ESTUDIO Y RESULTADOS..... | | 44 |
| 5.1 | SIMULACION DE SISMOS REALES..... | 44 |
| 5.1.1 | CALIBRACION SERVOMOTOR | 45 |
| 5.1.2 | CALIBRACIÓN DEL ACELEROMETRO..... | 51 |
| 5.1.3 | INGRESO DE DATOS AL ARDUINO..... | 53 |
| 5.1.4 | GRAFICOS DE ACELERACIONES | 53 |
| 5.2 | INTERPRETACIÓN DE GRÁFICOS | 59 |
| 5.2.1 | INPUT VS OUTPUT (BASE)..... | 59 |
| 5.2.2 | OUTPUT (BASE) VS OUTPUT (AZOTEA) | 61 |
| CAPITULO 6 CONCLUSIONES | | 64 |

CONTENIDO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1: <i>Mesas sísmicas en el mundo.</i> | 11 |
| Tabla 2.2: <i>Especificación mesa sísmica.</i> | 13 |
| Tabla 3.1: <i>Excitaciones dinámicas.</i> | 16 |
| Tabla 3.2: <i>Escala de Mercalli.</i> | 20 |

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| <i>Ilustración 2.1:</i> Mesa sísmica UCN..... | 12 |
| <i>Ilustración 2.2:</i> Mesa sísmica del departamento de ingeniería civil | 13 |
| <i>Ilustración 2.3:</i> Futura mesa sísmica de la facultad de ingeniería civil de la USACH. | 14 |
| <i>Ilustración 3.1:</i> Sistema de 1 GDL. (a) Modelo idealizado y (b) Diagrama de cuerpo libre. | 18 |
| <i>Ilustración 3.2:</i> Ejemplo registro de Aceleración (g) vs tiempo (seg). | 19 |
| <i>Ilustración 3.3:</i> Esquema velocidad angular..... | 21 |
| <i>Ilustración 3.4:</i> Esquema general de un control PID..... | 24 |
| <i>Ilustración 4.1:</i> Plataforma mesa sísmica..... | 28 |
| <i>Ilustración 4.2:</i> Rodamiento lineal..... | 30 |
| <i>Ilustración 4.3:</i> Ejes lineales con sus respectivos soportes..... | 31 |
| <i>Ilustración 4.4:</i> Varilla roscada..... | 32 |
| <i>Ilustración 4.5:</i> Rodamiento tipo rotula | 33 |
| <i>Ilustración 4.6:</i> Disco excentrico | 34 |
| <i>Ilustración 4.7:</i> Estructura a escala..... | 35 |
| <i>Ilustración 4.8:</i> Placa Arduino Uno..... | 35 |
| <i>Ilustración 4.9:</i> Pantalla principal programación Arduino..... | 36 |
| <i>Ilustración 4.10:</i> Plano Acelerómetro MPU6050 | 38 |
| <i>Ilustración 4.11:</i> Acelerómetro MPU6050..... | 38 |
| <i>Ilustración 4.12:</i> Plano Servomotor de rotación continua | 40 |
| <i>Ilustración 4.13:</i> Servomotor Parallax..... | 40 |
| <i>Ilustración 4.14:</i> Ensamble Mesa sísmica | 41 |
| <i>Ilustración 4.15:</i> Estructura de impresión 3D..... | 41 |
| <i>Ilustración 4.16:</i> Esquema de Ensamble Arduino Uno con motor y sensores | 42 |
| <i>Ilustración 4.17:</i> Ensamble completo..... | 43 |
| <i>Ilustración 4.18:</i> Simulador sísmico real..... | 43 |
| <i>Ilustración 5.1:</i> Giros de Servomotor | 45 |
| <i>Ilustración 5.2:</i> Grafica de r.p.m. vs Angulo de giro | 46 |
| <i>Ilustración 5.3:</i> Diagrama de flujo, transformar “Aceleración al ángulo de giro” ... | 50 |

| | | |
|--------------------------|--|----|
| <i>Ilustración 5.4:</i> | Grafico de aceleración vs tiempo sin ajustar..... | 52 |
| <i>Ilustración 5.5:</i> | Grafico de aceleración vs tiempo ajustado..... | 52 |
| <i>Ilustración 5.6:</i> | Ejemplo del ingreso de datos a la programación Arduino | 53 |
| <i>Ilustración 5.7:</i> | Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo real de Concepción | 54 |
| <i>Ilustración 5.8:</i> | Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo real de Kobe | 54 |
| <i>Ilustración 5.9:</i> | Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo real de Northridge... | 55 |
| <i>Ilustración 5.10:</i> | Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la base, Concepción..... | 56 |
| <i>Ilustración 5.11:</i> | Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la base, Kobe..... | 56 |
| <i>Ilustración 5.12:</i> | Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la base, Northridge | 57 |
| <i>Ilustración 5.13:</i> | Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la azotea, Concepción..... | 57 |
| <i>Ilustración 5.14:</i> | Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la azotea, Kobe..... | 58 |
| <i>Ilustración 5.15:</i> | Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la azotea, Northridge | 58 |
| <i>Ilustración 5.16:</i> | Gráfico comparativo Sismo Real y Sismo Simulado en la Base de la estructura, Concepción..... | 60 |
| <i>Ilustración 5.17:</i> | Gráfico comparativo Sismo Real y Sismo Simulado en la Base de la estructura, Kobe | 60 |
| <i>Ilustración 5.18:</i> | Gráfico comparativo Sismo Real y Sismo Simulado en la Base de la estructura, Northridge..... | 61 |
| <i>Ilustración 5.19:</i> | Gráfico comparativo de Sismo Simulado en la Base y Azotea de la estructura, Concepción..... | 62 |
| <i>Ilustración 5.20:</i> | Gráfico comparativo de Sismo Simulado en la Base y Azotea de la estructura, Kobe | 63 |
| <i>Ilustración 5.21:</i> | Gráfico comparativo de Sismo Simulado en la Base y Azotea de la estructura, Northridge..... | 63 |

CAPITULO 1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

En la historia de nuestro planeta han ocurrido grandes catástrofes naturales que han afectado a millones de personas, y entre ellas se encuentran los sismos. Con la finalidad de lograr reducir estos estragos, se han realizado diversas investigaciones con el enfoque de minimizar los efectos que provocan estos fenómenos naturales en infraestructura y lograr dar una mayor seguridad a los usuarios.

Para un correcto estudio de sismos es necesario recurrir la ingeniería sísmica y poder avanzar en ella. Además de los modelos analíticos, existe una manera empírica para realizar pruebas estructurales. Para lo anteriormente mencionado, es necesario que el modelo esté sometido a vibraciones que simulen el real movimiento que tiene el suelo en un evento sísmico, pudiendo verificar los resultados analíticos obtenidos. Es necesario mencionar que los estudios realizados por las mesas sísmicas no representan al 100% el real movimiento que tienen las estructuras en la superficie terrestre, pero es una alternativa válidamente representativa.

Las grandes potencias mundiales han tomado la delantera y cuentan con mesas sísmicas muy avanzadas, ayudando en gran manera al mejoramiento de las estructuras y en la resistencia ante movimientos sísmicos catastróficos.

Debido al reducido tamaño que presenta la mesa sísmica de este proyecto de título, es necesario crear modelos estructurales a escala, para luego, graficar de forma efectiva las aceleraciones en tiempo real.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Uno de los problemas más comunes que existe en la Ingeniería Civil son las fallas producidas por movimientos dinámicos presentes en los distintos tipos de estructuras, debido principalmente a terremotos ocasionados por todo el mundo y especialmente en Chile, que han traído como consecuencia la pérdida de vidas humanas. De aquí nace la importancia de generar un equipo para darle un curso a la investigación en el área de la dinámica estructural, comprobando las estructuras bajo ambientes de cargas simuladas. a su vez, que sirva de apoyo para las líneas de investigación teórico-experimental, análisis de estructuras, diseño y el comportamiento que tiene ante un sismo; debido a esto se decidió fabricar una mesa vibratoria como material de apoyo para el análisis de estructuras resistentes a los efectos dinámicos producidos por cargas sísmicas y simular un evento sísmico que registre la aceleración de los movimientos laterales mediante el *software* Arduino, para obtener una simulación en tiempo real. La mesa vibratoria es un equipo que facilita el análisis dinámico de las estructuras que son sometidas a movimientos laterales generados por movimientos telúricos en función al movimiento de un servomotor que tendrá la potencia necesaria para generar una oscilación unidireccional en una estructura. Generado el movimiento en la estructura se tendrá la posibilidad de registrar datos y realizar el análisis dinámico de la estructura.

1.3 OBJETIVOS GENERALES

Generar información en tiempo real que permita analizar el impacto que tiene un movimiento sísmico en una estructura.

1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar y construir exitosamente la mesa sísmica con la estructura que irá sobre ella.
- Comprobar parámetros a medir.
- Definir el sistema de control a utilizar.
- Calibrar adecuadamente el sistema de control para su correcto uso.

1.5 METODOLOGIA

Las actividades consideradas para el apropiado desarrollo de los objetivos planteados son los siguientes:

- Elección de los equipos a implementar y su adecuado funcionamiento previo al ensamblaje.
- Ensamblaje de la mesa sísmica y verificación de su correcto funcionamiento.
- Ensamblaje de la estructura y verificación de su correcto funcionamiento.

- Instalar los sensores de aceleración en la mesa sísmica y estructura.
- Efectuar los ensayos que sean necesarios para la calibración de los parámetros de control.

1.6 ALCANCES

- Definición de los rangos reales que tendrá el funcionamiento de la mesa sísmica.
- Calibración de los parámetros de control.
- Demostrar la respuesta de la mesa sísmica, con parámetros lo más reales posibles.

CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 SISMOS

Los sismos, temblores y terremotos son palabras que se escuchan a diario para representar el movimiento de la corteza terrestre. Estos se producen en el interior de la tierra y es propagada por ella en todas direcciones (x, y, z) con forma de ondas. Tienen una duración que no es prolongada e intensidad variable, producidos a consecuencia de la liberación repentina de energía.

2.2 CAUSAS DE LOS SISMOS

La principal causa de los sismos es la interacción entre placas tectónicas, pero no es la única que existe. Cualquier proceso que logre grandes concentraciones de energía en las rocas puede generar sismos, donde el tamaño de este puede definir entre otros factores, lo grande que sea la zona de concentración del esfuerzo. Las causas más comunes son Tectónica (originado por desplazamiento de placas), Volcánica (Producto de una erupción violenta), Hundimiento (Erosión de aguas subterráneas en el interior de la corteza), Deslizamientos (Ocurren a lo largo de fallas).

2.2.1 MOVIMIENTO OSCILATORIO DE ONDAS SISMICAS

Cuando ocurre un temblor las ondas sísmicas se propagan en todas direcciones, provocando de esta manera el movimiento del suelo (forma horizontal y vertical). Cerca del epicentro la componente vertical del movimiento es mayor que las horizontales, es decir, es un movimiento trepidatorio; por otro lado, a medida que

viajan las ondas sísmicas, las componentes se atenúan y al llegar a un suelo blando, las componentes horizontales se amplifican, dando lugar al movimiento oscilatorio.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE UN SISMO

De las principales características de un sismo se destacan las siguientes:

HIPOCENTRO: Es el foco del terremoto o sismo, en otras palabras, es el punto interior de la tierra, donde comienza el movimiento sísmico (punto interior de la litosfera).

EPICENTRO: Es la proyección del hipocentro sobre la superficie terrestre, siendo el lugar donde se percibe con mayor intensidad el sismo.

INTENSIDAD: Mide la fuerza del temblor en base a los estragos causados. Existe la escala de Mercalli, Medvédev-Sponheuer-Káenik y de Shindo. Siendo la escala de Mercalli la más utilizada.

MAGNITUD: Busca definir el tamaño del sismo y es una forma logarítmica arbitraria que asigna un número para cuantificar la energía liberada en un terremoto. Siendo utilizada frecuentemente la escala de Richter.

2.4 INGENIERÍA SÍSMICA

La ingeniería sísmica estudia el comportamiento de los edificios y las estructuras sujetas a carga sísmica. Donde los principales objetivos son los siguientes:

- Comprender la interacción entre edificios y la infraestructura pública con el subsuelo.
- Prevenir las posibles consecuencias de sismos en localidades urbanas y efectos estructurales en las edificaciones.
- Proyectar, edificar y preservar estructuras que sean resistentes a terremotos, trascendiendo las expectativas y el fiel cumplimiento de las normas asociadas a la construcción.

2.4.1 DISEÑO SÍSMICO

Forma parte de la ingeniería sísmica, y estudia la conducta de las estructuras y edificaciones, en relación con el comportamiento o cargas sísmicas que pueda sufrir. El diseño sísmico es implementado en edificaciones, para lo cual se hace un diseño especial que permita a la estructura estar preparada a sufrir eventuales cargas sísmicas. El diseño sísmico de edificaciones posee 3 cualidades que permite soportar estas cargas:

- **Ductilidad:** Se produce cuando un material sometido a una fuerza es capaz de deformarse de manera considerable antes de romperse, Es una propiedad muy útil en la ingeniería civil ya que permite realizar diseños estructurales seguros.
- **Resistencia:** Esta completamente relacionado con las propiedades del material y el sistema de construcción utilizado.
- **Disipación:** Tiene como función disipar las acumulaciones de energía asegurando que otros elementos de la estructura no sean sobre exigidos, evitando daños a la estructura. Es decir, los disipadores sísmicos ofrecen un incremento de la amortiguación a la estructura.

2.5 MESA SÍSMICA

Un sismo se produce cuando existe liberación de energía elástica mediante movimientos relativos entre las placas tectónicas. La liberación se presenta por la ruptura que existe en los contactos de las placas provocando vibraciones en la corteza terrestre. Un movimiento sísmico libera gran cantidad de energía en el suelo que es transmitida directamente a las estructuras por medio de desplazamientos, velocidades y aceleraciones. Es por este motivo que toma relevancia contar con una mesa sísmica para estudios más acabados de cómo se comportan las estructuras en un sismo.

El principal objetivo de una mesa sísmica es aplicar vibraciones sobre un modelo a escala obteniendo así una simulación de los efectos reales que causan los sismos sobre las estructuras.

Presenta distintas condiciones de movimiento, dependiendo de la cantidad de grados de libertad con los que cuenta, donde existen tres desplazamientos en los ejes X, Y, Z y las tres rotaciones sobre cada uno de los ejes. La cantidad de grados de libertad depende del número de actuadores presentes sobre la mesa vibratoria.

Ya que algunos de los efectos destructivos de los sismos son el resultado de la vibración horizontal en las estructuras, esta mesa sísmica será diseñada para lograr excitaciones unidireccionales y simular los efectos reales que causan los sismos sobre las estructuras.

La efectividad de las pruebas realizadas por el simulador dependerá principalmente en la adecuada interpretación que se dé a los resultados y de la calidad del equipo utilizado.

2.6 ESTADO DEL ARTE

La compilación de resultados de investigaciones previas sobre las mesas sísmicas permite la circulación de la información obtenida, para luego generar una demanda de conocimiento y establecer comparaciones con distintos estudios, ofreciendo diferentes posibilidades de comprensión del tema a tratar.

2.6.1 HISTORIA DE LAS MESAS SISMICAS

Entre 1890 y 1950 se creó un gran número de mesas sísmicas, a partir de la necesidad que existía en la época para resolver problemas existentes en estructuras sometidas a efectos sísmicos.

Las primeras mesas sísmicas creadas se deslizaban mediante un movimiento manual, por medio de ruedas con manivela y una plataforma móvil sobre rieles, lo que permite que se pueda mover armónicamente en un grado de libertad. Para estudiar el sismo que sacudió a California en 1906, este tipo de mecanismo arcaico fue reemplazo y mejorado por un pequeño motor eléctrico que generaba el movimiento horizontal.

En 1930 Jacobsen crea un nuevo modelo de mesa sísmica, la que generaba un movimiento a partir de un péndulo que colisiona una plataforma apoyada por resortes, provocando una aceleración máxima, seguido de otras diferentes aceleraciones. Gracias a esto, se avanzó en los estudios de suelos y cimientos.

Luego del sismo de Long Beach, en 1933, se propuso utilizar actuadores hidráulicos para el desplazamiento de las mesas sísmicas. Sin embargo, en 1936 es utilizado por primera vez el actuador hidráulico, con dos avances importantes: Uso de una señal registradora a tiempo real y un lazo cerrado para generar el desplazamiento, minimizando de esta forma el error.

A mediados de la década de 1960 se utilizaron actuadores eléctricos hidráulicos en combinación con sistemas computacionales, permitiendo aceleraciones de hasta 2 g en mesas sísmicas de un grado de libertad.

La era de las mesas vibratorias modernas comienza en 1972 con la instalación de la mesa vibratoria en la Universidad de Berkeley por parte de *MTS System Corporation*.

Actualmente en todo el mundo se están creando mesas sísmicas, pero es en Estados Unidos y Japón donde se ha desarrollado con más énfasis la creación de estas, logrando un control de hasta seis grados de libertad, posibilitando la simulación de un comportamiento no lineal.

2.6.2 MESAS SISMICAS EN EL MUNDO

Existe una gran cantidad de mesas sísmicas alrededor de todo el mundo, que hoy en día están en funcionamiento para el estudio de ingeniería sísmica, es por lo que en la tabla 1 se muestran algunas de ellas.

Tabla 2.1: Mesas sísmicas en el mundo.

| País | Localización | Dimensiones (m) | Masa máx. (t) | G.d.l | Despl X (mm) | Vel X (mm/s) | Acel X (m/s ²) | Frecuencia máx. (Hz) |
|---------------|------------------------------|--------------------|------------------|-------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------|
| China | China Academy | 6.1 x 6.1 | 60 | 6 | ±150 | ±1000 | ±15 | 50 |
| China | Guangzhou University | 3 x 3 | 20 | 6 | ±100 | ±1000 | ±26 | 50 |
| Japón | NIED 'E-Defence' | 20 x 15 | 1200 | 6 | ±1000 | ±2000 | ±9 | 50 |
| Japón | Fujita Corporation | 4 x 4 | 25 | 1 | ±500 | ±1500 | ±10 | 50 |
| Corea del Sur | Korea Institute | 4 x 4 | 30 | 6 | ±200 | ±750 | ±15 | 50 |
| Corea del Sur | Pusan National University | 5 x 5 | 300 | 2 | ±300 | ±1000 | ±20 | 60 |
| Francia | FCBA Institut Bordeaux | 6 x 6 | 10 | 1 | ±125 | ±800 | ±20 | 50 |
| Italia | Universidad de Nápoles | 4 x 4 | 20 | 2 | ±250 | ±1000 | 10 | 50 |
| Reino Unido | University of Bristol (EERC) | 3 x 3 | 17 | 6 | ±150 | ±1100 | ±60 | 100 |
| México | UNAM, Ciudad del México | 4 x 4 | 20 | 5 | ±150 | ±1100 | ±10 | 60 |
| USA | ANCO Engineers | 3 x 3 | 10 | 3 | ±200 | ±2000 | ±30 | 40 |
| USA | University of California | 6.1 x 6.1 | 45 | 6 | ±127 | ±762 | ±15 | 20 |

(Elaboración propia, 2018).

2.6.3 MESAS SISMICAS EN CHILE

Chile es un país sísmico que no está al margen de tener sus propios sistemas de estudios para estos eventos, existiendo a lo largo del territorio simuladores que ayudan a entender de una mejor forma como se puede comportar un sismo en distintos tipos de estructuras.

Por lo tanto, es necesario mencionar alguna de ellas con sus propias características de estudio.

Mesa sísmica del departamento de ingeniería civil de la UCN: Es una mesa sísmica con actuador hidráulico, creada con el fin de estudiar los comportamientos de materiales y suelo frente a movimientos telúricos, cuenta con 6 grados de libertad. Controlada por un *software* para ingresar los datos del sismo a simular.



Ilustración 2.1: Mesa sísmica UCN (Fuente: UCN)

Mesa sísmica del departamento de ingeniería civil de la UCH: La mesa tiene un actuador hidráulico y está diseñada para una capacidad de carga de 3 ton, construida con un área de piso de 2,1 m x 1,3 m. La máxima aceleración, velocidad y desplazamiento son de 1,00 g, 0,60 m/s y +0,2 m respectivamente. Las características del movimiento es que son desplazamientos relativamente pequeños para bajos periodos, necesarios para obtener frecuencias del orden de 15 Hz que simulen registros chilenos.

Tabla 2.2: *Especificación mesa sísmica.*

| Especificación | Unidad |
|------------------------|---|
| Tamaño | 2,1 m x 1,3 m |
| Peso máximo del modelo | 3 ton |
| Manejo Mecánico | - Central oleo hidráulica. - servo-válvula controlada. - servo-actuador hidráulico. |
| Desplazamiento máximo | 0,2 m |
| Velocidad máxima | 0,6 m/s |
| Aceleración máxima | 1,00 g |
| Frecuencia | 15 Hz |

(UCH, 2009)



Ilustración 2.2: Mesa sísmica del departamento de ingeniería civil (Fuente: UCH).

Departamento de ingeniería civil e la USCH: Es una mesa sísmica con plataforma de 3 metros de largo, tres metros de ancho y dos metros de alto. Soporta estructuras de más de 15 toneladas sometidas a una alta aceleración y cuenta con 6 grados de libertad.

Tiene como activador bombas hidráulicas, con capacidad máxima de 100 caballos de fuerza cada una, le proporciona aceite a los tres pistones que se encargan de darle movimiento a la mesa sísmica.

Todo lo antes mencionado está soportado por una estructura de hormigón rodeada a la mesa sísmica para que pueda soportar movimientos veloces y fuertes. Esa estructura mide diez metros de largo, diez metros de ancho y tres de alto.

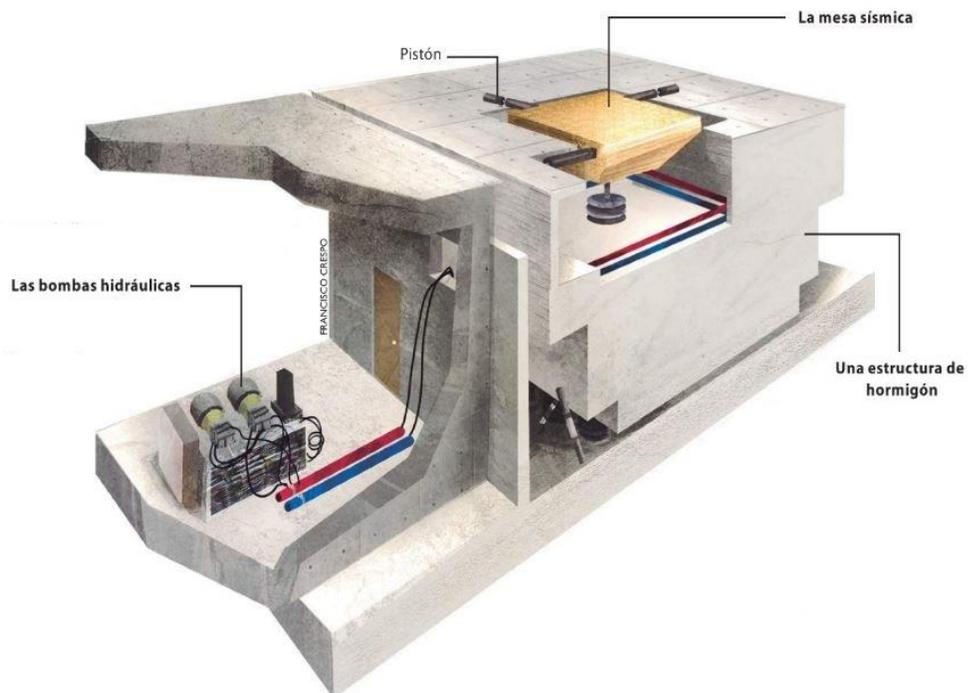


Ilustración 2.3: Futura mesa sísmica de la facultad de ingeniería civil de la USACH (Fuente: Diario Las Últimas Noticias, edición 11/08/2018).

CAPITULO 3 FUNDAMENTO TEORICO

3.1 DINÁMICA ESTRUCTURAL

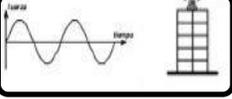
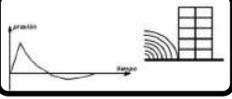
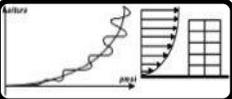
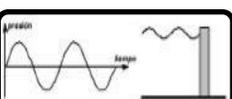
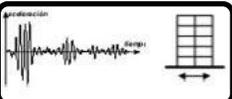
Es necesario hablar sobre dinámica estructural ya que las estructuras están sometidas a cargas variables en el tiempo, profundizando en temas fundamentales como la dinámica estructural, dando a conocer las distintas excitaciones dinámicas y el sistema de 1 grado de libertad.

Una acción es dinámica si varía en el tiempo, dando origen a fuerzas de inercia, amortiguamiento y fuerzas en las estructuras.

3.1.1 EXCITACIONES DINÁMICAS

Las estructuras son sometidas a efectos dinámicos durante toda su vida que van desde magnitudes despreciables, hasta otras que ponen en peligro su estabilidad. Existen distintos tipos de excitación dinámica que pueden afectar a una estructura y se muestran a continuación:

Tabla 3.1: *Excitaciones dinámicas*

| | |
|---|--|
|  | <p>Originado por equipos mecánicos</p> <ul style="list-style-type: none">• Causado por equipos que roten o se desplacen periódicamente. |
|  | <p>Originado por impacto</p> <ul style="list-style-type: none">• El choque de una masa con otra da como resultado una fuerza impulsiva aplicada, provocando vibraciones. |
|  | <p>Originado por explosiones</p> <ul style="list-style-type: none">• Una explosión da como resultado ondas de presión en el aire y movimientos en el suelo, afectando a las estructuras aledañas a la explosión. |
|  | <p>Originado por el viento</p> <ul style="list-style-type: none">• Las distintas intensidades de presión que ejerce el viento sobre estructuras son variables en el tiempo, provocando efectos de vibración sobre ellas. |
|  | <p>Originado por olas</p> <ul style="list-style-type: none">• Ocurre en estructuras hidráulicas, donde las olas inducen efectos dinámicos que corresponden a variaciones del empuje hidráulico sobre ellas. |
|  | <p>Originado por sismos</p> <ul style="list-style-type: none">• Los movimientos de suelo producto de un sismo conducen a vibraciones importantes en la estructura. |

(Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico, 1998)

3.1.2 GRADOS DE LIBERTAD

Es número de desplazamientos independientes requeridos para definir las posiciones desplazadas de todas las masas en relación con su posición original (Chopra) donde las estructuras de barra tienen dimensión d , con n número de barras, m cantidad de restricciones (uniones entre barras o apoyos) y r números de grados de libertad eliminados por la restricción. En función de la suma algebraica de las variables mostradas anteriormente se pueden clasificar en:

- Estructuras hiperestáticas: Donde $GL < 0$
- Estructuras isostáticas: Donde $GL = 0$
- Mecanismos: Donde $GL > 0$

3.1.3 UN GRADO DE LIBERTAD

Este sistema está definido mediante propiedades físicas esenciales de masa del sistema, propiedades elásticas y amortiguamiento. Son representados por el modelo matemático mostrado en la ilustración 3.2 (a), para un sistema con un grado de libertad (1 GDL). El modelo está definido por la masa m , la rigidez c , un desplazamiento $u(t)$, producto de una fuerza exterior $f(t)$. El esquema expresado en la ilustración 3.2 (a) representa un diagrama de cuerpo libre en la ilustración 3.2 (b), estableciendo equilibrio de las fuerzas que están asociadas al modelo.

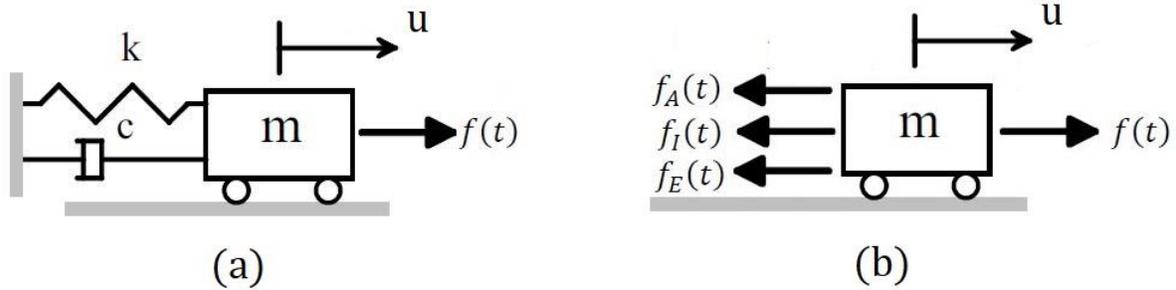


Ilustración 3.1: Sistema de 1 GDL. (a) Modelo idealizado y (b) Diagrama de cuerpo libre. (Fuente: Elaboración propia).

Se puede deducir gracias a la ilustración 3.2 (b) que el equilibrio de las fuerzas actuantes del sistema es:

$$f_I(t) + f_A(t) + f_E(t) = f(t) \quad (3.1)$$

Donde:

- $f_I(t)$ es la fuerza de inercia del sistema.
- $f_A(t)$ es la fuerza de amortiguamiento del sistema.
- $f_E(t)$ es la fuerza elástica del sistema.

3.2 ACCELERACION SISMICA

Se utiliza en ingeniería sísmica, y consiste en una medición directa de las aceleraciones que sufre la superficie del suelo en un sismo. La unidad utilizada es la intensidad del campo gravitatorio $(g = 9,81 \frac{m}{s^2})$.

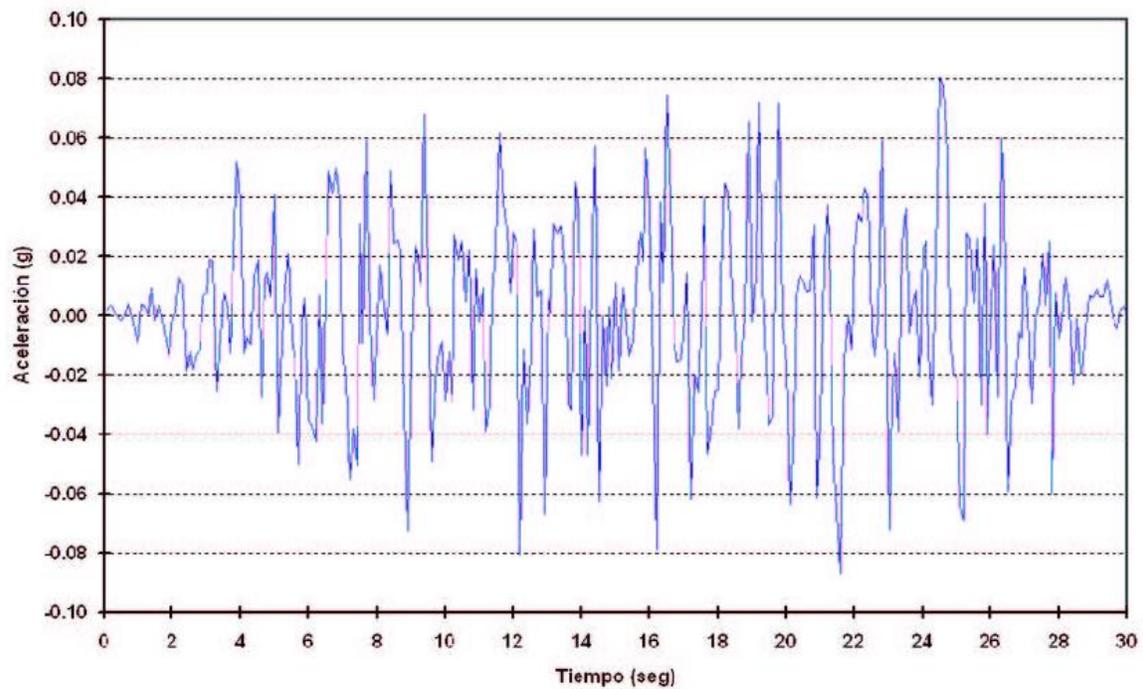


Ilustración 3.2: Ejemplo registro de Aceleración (g) vs tiempo (seg) (Fuente: Elaboración propia).

A diferencia de otras medidas que cuantifican sismos, como la escala de Richter o escala de magnitud de momento, no se puede catalogar dentro de las medidas de energía total de un sismo, por lo que no es una medida de magnitud, sino de intensidad. Se puede medir con acelerómetros y es sencillo correlacionar la aceleración del sismo con la escala de Mercalli.

La aceleración sísmica es la medida más utilizada para medir sismos dentro de la ingeniería, su valor se utiliza para establecer normativas sísmicas y zonas de riesgo sísmico. Cuando ocurre un sismo, se generan daños en infraestructuras que están directamente relacionadas con la velocidad y la aceleración sísmica.

A continuación, se presenta la tabla 3.2 donde se especifica el funcionamiento de la escala de Mercalli.

Tabla 3.2: *Escala de Mercalli.*

| Escala de Mercalli | Aceleración sísmica (g) | Velocidad sísmica (m/s²) | Percepción del temblor | Potencial de daño |
|---------------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------|
| I | < 0,0017 | < 1 | No apreciable | Ninguno |
| II-III | 0,0017 – 0,014 | 0,1 – 1,1 | Muy leve | Ninguno |
| IV | 0,014 – 0,039 | 1,1 – 3,4 | Leve | Ninguno |
| V | 0,039 – 0,092 | 3,4 – 8,1 | Moderado | Muy leve |
| VI | 0,092 – 0,18 | 8,1 – 16 | Fuerte | Leve |
| VII | 0,18 – 0,34 | 16 – 31 | Muy fuerte | Moderado Moderado |
| VIII | 0,34 – 0,65 | 31 – 60 | Severo | a fuerte |
| IX | 0,65 – 1,24 | 60 – 116 | Violento | Fuerte |
| X+ | > 1.24 | > 116 | extremo | Muy fuerte |

(Carazo,.N, 2012).

3.3 VELOCIDAD SÍSMICA

La velocidad es considerada como la rapidez en la que viaja un objeto en una dirección específica. Matemáticamente hablando, la velocidad es el cambio de posición de un objeto en determinado tiempo, y es la integral de la aceleración.

Tomando en cuenta lo anterior, la velocidad sísmica permite cuantificar la relación de cambio del desplazamiento en el tiempo que se propaga la onda. Por lo que la velocidad se puede considerar como una propiedad fundamental en el proceso e interpretación sísmica.

$$v_i = v_{i-1} + a_i * \Delta t \quad (3.2)$$

Donde v_i e v_{i-1} son velocidad, a es la aceleración del sismo y Δt es el tiempo intervalo de tiempo a medir.

3.4 VELOCIDAD ANGULAR

Se utiliza para medir la velocidad de rotación. Se define como el ángulo que gira por unidad de tiempo, y se le designa por la letra griega ω . Su unidad en el Sistema Internacional es radián por segundo (rad/s).

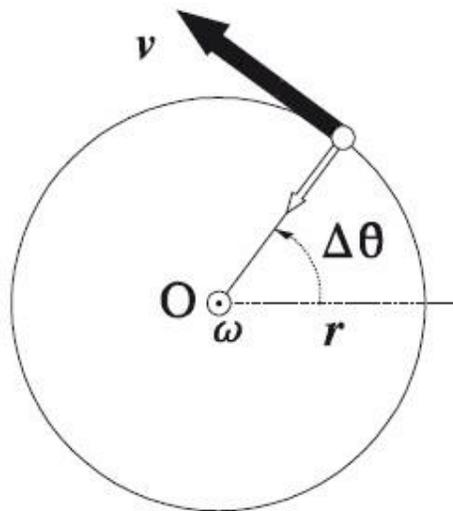


Ilustración 3.3: Esquema velocidad angular (Fuente: Elaboración propia).

Dado un movimiento circular uniforme, y sabiendo que una revolución completa está representada por 2π radianes, se tiene:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (3.3)$$

Donde T es el periodo (tiempo que tarda en dar una vuelta completa) y f es la frecuencia (número de vueltas o revoluciones por unidad de tiempo). Sabiendo esto, se obtiene:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{v}{r} \quad (3.4)$$

Donde v es la velocidad lineal, r es el radio de giro, y la unidad de medida para ω es (rad/s).

3.5 REVOLUCIONES POR MINUTO

Conocido como rpm, es la unidad de frecuencia que determina el número de vueltas dadas por un cuerpo en un minuto y girando alrededor de un eje.

Teniendo en cuenta que $2\pi = 1 \text{ rev}$, y $60\text{s} = 1\text{min}$, se puede transformar la velocidad angular a r.p.m, y queda de la siguiente forma:

$$x \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) = \frac{x \text{ rad}}{1 \text{ s}} * \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \quad (3.5)$$

3.6 SISTEMA DE CONTROL

Es fundamental tener un buen sistema de control para un correcto funcionamiento de la precisión de un simulador de sismos. Existe una variación de respuesta que debe corregirse para que a futuro no aumente y de esta manera permita estabilizar la respuesta al valor deseado. Si no existiera un controlador para el sistema, este

no aprovecharía la capacidad que tiene el equipo. Los sistemas de control mejoran notoriamente la respuesta, disminuyendo el error a un valor lo más pequeño posible. Existen varios tipos de control, utilizando el más correcto dependiendo de factores como los grados de libertad que tiene la mesa, el tipo de actuador que va a generar el movimiento, registros a reproducir y la precisión requerida.

Luego de estudiar distintos tipos de control y Según (J. O'hagan and Q. Ma, 2012), el algoritmo más utilizado para mesas sísmicas de un grado de libertad es el PID con un sistema de control de lazo cerrado.

3.6.1 CONTROL PID

Está catalogado dentro de los logaritmos clásicos y más utilizados para estudios de mesas con un grado de libertad. Su nombre viene de la sigla PID que significa que es un controlador proporcional (P), integral (I), y derivativo (D).

PID Busca proporcionar una retroalimentación al sistema, eliminar estados de inestabilidad mediante una acción de tipo integral y anticipar la respuesta que tendrá a futuro mediante una derivación.

El control puede ser realimentado o no realimentado. En esta mesa sísmica se utilizará el control realimentado, también llamado "control de lazo cerrado", por su buena capacidad de responder a perturbaciones o variaciones impredecibles de los componentes. Este sistema consta de dos componentes principales para su funcionamiento:

- Controlador: Ajusta la señal, para luego enviarla al proceso con operaciones matemáticas.

- Proceso: Son acciones que realiza un conjunto de equipos, dando como resultado una variable de salida a partir de una variable de entrada.

A continuación, se muestra el esquema general que tiene un control PID:

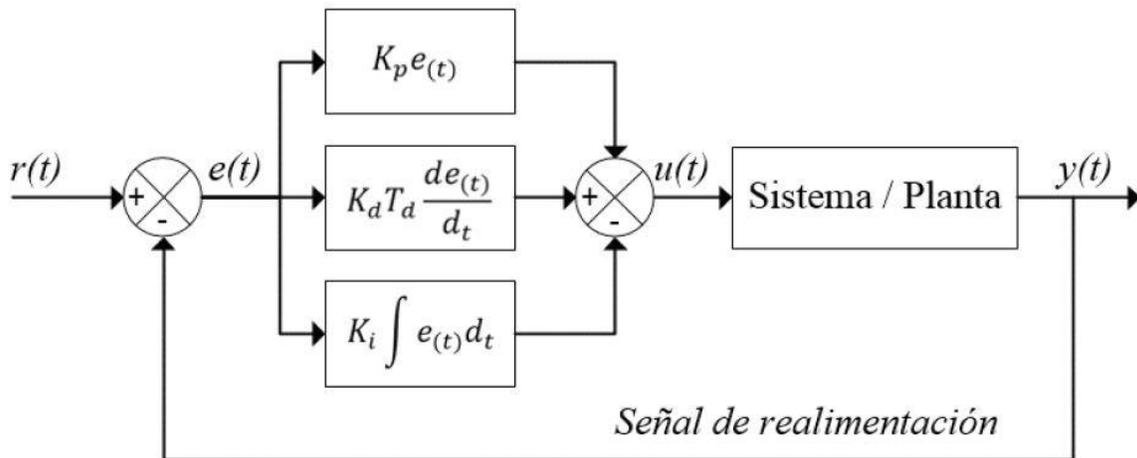


Ilustración 3.4: Esquema general de un control PID (Fuente: (J. O'hagan and Q. Ma, 2012).

Donde:

$r(t)$: Entrada y respuesta deseada del sistema

$e(t)$: Error del sistema.

$u(t)$: Acción del control.

$y(t)$: Respuesta del sistema.

K_p : Constante proporcional.

K_d : Constante derivada.

K_i : Constante integral.

$e(t)$, es la diferencia entre la variable deseada y la variable del proceso.

La ilustración 3.7 representa el algoritmo PID en función del tiempo, donde la ecuación proporcional sigue al error presente, la ecuación integral es la que acumula los errores para eliminar las perturbaciones existentes y la ecuación derivada actúa con la velocidad de cambio para lograr corregir los futuros errores.

La función de transferencia que utiliza el control PID es mediante la transformada de Laplace, que se muestra a continuación en la ecuación 3.27.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d T_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int e(t) dt \quad (3.6)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i} + T_d s \right) \quad (3.7)$$

3.6.2 CONTROL PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADO

Luego de definir cómo funciona un PID, es necesario indicar los efectos que tiene la acción de cada término en la ecuación.

- **Control proporcional:** Permite aumentar o disminuir la ganancia del sistema al modificar el error. Es común usar más de una acción proporcional, ya que se origina un error en estado estacionario frente a una entrada escalón unitario. Ese error se puede eliminar incluyendo una acción integral en el sistema.
- **Control integral:** Cuando existe un desplazamiento o un error en estado estacionario de la respuesta del equipo frente a la entrada de una función escalón, ese error se puede eliminar mediante una acción de control integral. La acción de control integral calcula el área bajo la curva del error y, por lo tanto, la señal de entrada $u(t)$ toma un valor distinto de cero cuando el error es cero, es

decir, permite desplazar la curva. Se debe tener presente que esta acción conduce a una respuesta oscilatoria, donde lo ideal es que el amortiguamiento sea lo más rápido posible, y así el sistema tome el valor deseado en el menor tiempo, ya que una mala decisión en el control puede llevar a una respuesta oscilatoria de amplitud decreciente muy lenta o hasta de amplitud creciente.

- **control derivativo:** Una acción de control derivativa siempre va acompañada de un controlador proporcional al menos, ya que por sí sola distorsiona la señal. Ello debido a que opera sobre la velocidad de cambio del error y no sobre el error mismo. Una acción de control derivativa permite corregir la magnitud del error a futuro, es decir, predice la sobre elongación y de esta forma produce una respuesta adecuada antes que la sobre elongación sea demasiado grande. De esta forma se pretende disminuir el error que comprometa la estabilidad del sistema. Esta acción es utilizada para estabilizar la señal cuando se está frente a una respuesta del sistema que oscila indefinidamente, ya que incorpora una acción de amortiguamiento en la señal hacia el valor deseado.

CAPITULO 4 ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

Después de elegir los componentes correctos y a su vez que fueran de un costo moderado, se logra llegar a la selección para estudios sísmicos de laboratorio. A su vez especificar cada uno de ellos con sus parámetros.

4.1 MESA SÍSMICA

La mesa sísmica se mueve mediante un servomotor excéntrico que está unido a una placa de aluminio por medio de un rodamiento en forma de rotula, la placa antes mencionada se desliza por un sistema de rodamiento lineal que permite el movimiento solo en un eje de coordenadas. Hay dos acelerómetros controlados por medio de Arduino, uno en la parte superior de la estructura y el otro en la placa de aluminio.

Para un análisis más detallado de cada componente se dan a conocer a continuación:

4.1.1 PLATAFORMA

Es donde se colocan los modelos estructurales para realizar las pruebas sísmicas.

El material a utilizar para construir la plataforma debe contar con características que le permitan al sistema un comportamiento adecuado al momento de aplicar cargas sísmicas. Es por lo que su selección es de suma importancia, teniendo las siguientes características: ligera, rígida lateralmente, resistente a la flexión y resistente a la fatiga.

La plataforma debe proporcionar la rigidez suficiente para resistir las cargas que tendrá sobre ella, a su vez debe soportar las cargas horizontales provocadas por el fenómeno sísmico.

La ilustración 4.1 muestra el diseño de la plataforma, que está fabricada con acero inoxidable y su medida es de 30x30x0,4 cm.

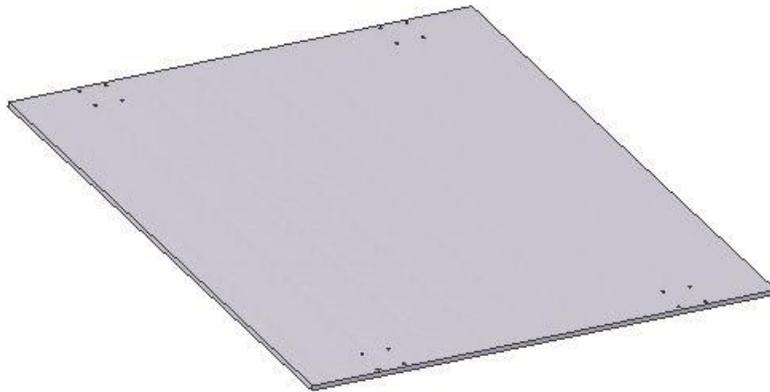


Ilustración 4.1: Plataforma mesa sísmica (Fuente: Elaboración propia).

4.1.2 RODAMIENTOS LINEALES

Los rodamientos son imprescindibles para lograr el movimiento libre de la estructura en una determinada dirección. En los sistemas de un grado de libertad es necesario utilizar rodamientos que tengan solo una dirección, de esta manera se restringen las rotaciones y desplazamientos en otras direcciones.

Para lograr buenos resultados en movimientos horizontales, es necesario contar con la menor fricción posible y capacidad de carga en compresión y tensión, de esta manera producir el menor esfuerzo en el desplazamiento del sistema.

Cada rodamiento lineal cuenta con 4 perforaciones en sus vértices para atornillar a la plataforma mediante tornillos como lo muestra la ilustración 4.2.

Especificaciones técnicas:

- Carga dinámica: 260N
- Carga estática: 400N
- Material: Aluminio.

Dimensiones:

- Diámetro interior: 10 mm.
- Largo: 30 mm.
- Ancho: 22 mm.
- Factor de seguridad $F_s = 0,85$

Como el peso que resiste la carga dinámica es menor al de la estática, se debe utilizar para calcular el peso que resiste el rodamiento, como lo demuestra la ecuación 4.1.

$$\text{Peso}_{\text{carga dinámica}} = \frac{260\text{N}}{9,8\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 26,53 \text{ kg} \quad (4.1)$$

Tomando en cuenta el factor de seguridad de la especificación técnica, el peso soportado por cada uno de los rodamientos es:

$$\text{Peso}_{\text{rodamiento lineal}} = 0,85 * 26,53 \text{ kg} = 22,55 \text{ kg} \quad (4.2)$$

Teniendo en consideración que la mesa sísmica es simétrica y consta de 4 rodamientos lineales, la carga máxima soportada es:

$$\text{Peso}_{\text{rodamiento lineal}}(4 \text{ unidades})=4*22,55 \text{ kg}=90,2 \text{ kg}$$

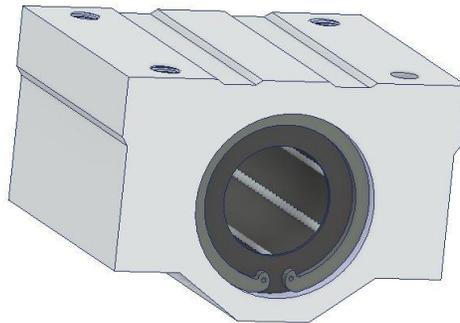


Ilustración 4.2: Rodamiento lineal (Fuente: Elaboración propia).

4.1.3 EJE LINEAL

Es lo que permite el libre movimiento horizontal del rodamiento lineal, pasando por el interior de este, y a su vez tiene la función de establecer la longitud máxima del deslizamiento de la mesa sísmica. Se utilizan 2 ejes lineales y cuentan con soportes en cada uno de sus extremos para sostenerlo, como se muestra en la ilustración 4.3.

Para el esfuerzo cortante que se produce en el centro del eje, y teniendo en cuenta que son 2 rodamientos por eje, se obtiene:

$$V = \frac{F}{2} \quad (4.3)$$

$$V = \frac{2 \cdot 22,55 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2} = 220,99 \text{ N} = 22,55 \text{ kg}$$

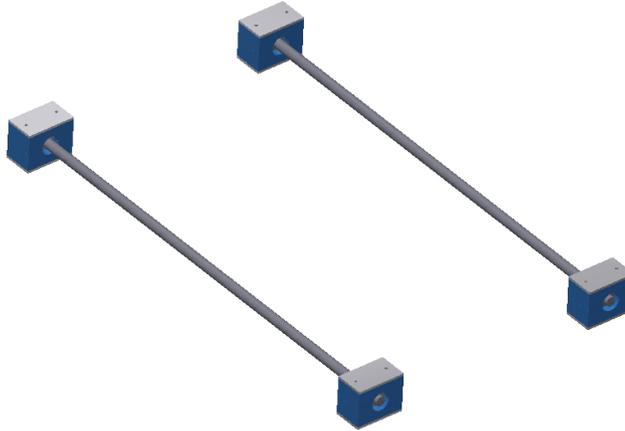


Ilustración 4.3: Ejes lineales con sus respectivos soportes (Fuente: Elaboración propia).

4.1.4 VARILLA ROSCADA

El esparrago es un eje lineal con hilo en toda su extensión. La función que cumple es generar la unión entre rotulas y de esta manera lograr que se mueva la mesa sísmica.

Especificaciones:

- Largo: 30 cm.
- Diámetro: 3/8"



Ilustración 4.4: Varilla roscada (Fuente: Elaboración propia).

4.1.5 RODAMIENTO TIPO RÓTULA

Este tipo de rodamientos se usa para realizar movimientos más complejos. Su funcionamiento es similar al de una rótula, lo cual le da una gran posibilidad de movimiento. Puede girar con respecto a los ejes (X Y Z).

Especificaciones:

- Largo máximo: 35 mm.
- Ancho máximo: 14 mm.
- Diámetro interno: 10 mm.



Ilustración 4.5: Rodamiento tipo rotula (Fuente: Elaboración propia).

4.1.6 DISCO EXCÉNTRICO

El disco excéntrico va montado sobre el servomotor, y está dotado de dos ejes (uno de giro y otro excéntrico). Se pueden distinguir 3 partes completamente definidas (Ilustración 4.6):

- Disco: Sobre el están situados los dos ejes.
- Eje de giro: Está situado en el punto central del disco y es quien guía el movimiento giratorio.
- Eje excéntrico: Está situado en paralelo al eje de giro, pero a una x distancia (radio) del mismo.

El disco excéntrico es el que restringe el movimiento de la plataforma, de esta manera la mesa se logra mover 34 mm en su plano horizontal.

Especificaciones:

- Diámetro disco: 65 mm.
- Diámetro eje de giro: 5 mm.
- Diámetro eje excéntrico: 9,5 mm.
- Distancia entre eje de giro y eje excéntrico: 17 mm.

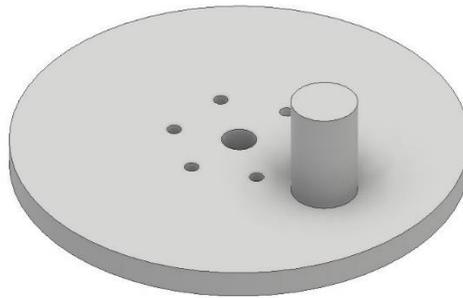


Ilustración 4.6: Disco excentrico (Fuente: Elaboración propia).

4.2 ESTRUCTURA A ESCALA

La estructura va sobre la placa de aluminio, consta de 3 pisos y está construida en impresión 3D por medio del *software* Inventor. Las losas están unidas en sus vértices por columnas cilíndricas. Cada piso lleva una masa para darle más peso a cada piso y de esta manera ser más real el movimiento que se generará.

Especificaciones:

- Dimensión losa: 12 cm.
- Largo columna: 12 cm.
- Ancho columna: 3mm x 3mm.
- Diámetro masa: mm



Ilustración 4.7: Estructura a escala (Fuente: Elaboración propia).

4.3 SISTEMA DE MONITOREO

Como sistema de monitoreo se ha elegido el *software* y *hardware* Arduino ya que es simple de utilizar. A su vez se escogió un sensor y un servomotor que don los encargados de arrojar resultados de aceleraciones para estudios sísmicos.

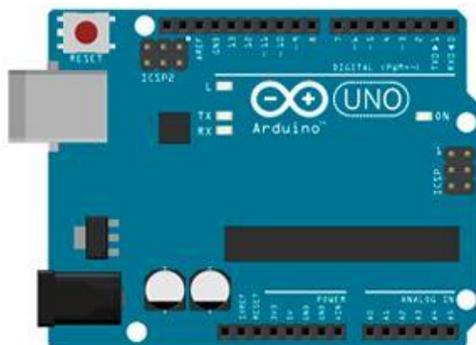


Ilustración 4.8: Placa Arduino Uno (Fuente: www.arduino.cc).

A continuación, se especifica más al detalle cada pieza a utilizar.

4.4 SOFTWARE ARDUINO

Es una herramienta de código abierto. Su lenguaje de programación está basado en C++ y se utiliza en el caso de la mesa sísmica para generar una programación válida para hacer funcionar el servomotor y los sensores acelerómetros. A su vez hará que se genere un gráfico de aceleraciones vs tiempo.

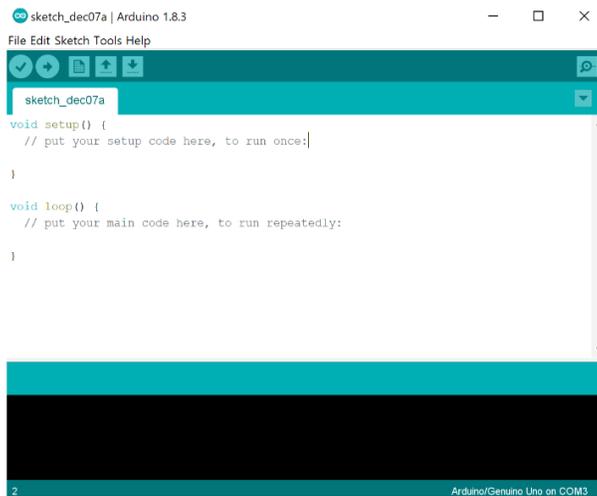


Ilustración 4.9: Pantalla principal programación Arduino (Fuente: *Software Arduino*).

4.5 HARDWARE ARDUINO

El rol que cumple el dispositivo dentro de un sistema de monitoreo de sismos está fundamentado en los procesos de captación, procesamiento y respuesta de las señales obtenidas del contexto, definidas como sensores y actuadores.

4.6 SENSOR

Es el dispositivo encargado de obtener la información del contexto para transmitirla a la unidad del procesamiento. Para el caso de la mesa sísmica se utilizan dos sensores de aceleraciones.

4.6.1 ACELEROMETRO

Es un dispositivo que, en el caso de esta tesis, mide aceleraciones sísmicas. Lo hace variando la velocidad respecto al tiempo y que se expresa matemáticamente como:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad (4.4)$$

De la misma manera, es necesario mencionar la primera ley de Newton:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (4.5)$$

Esto quiere decir que cualquier cuerpo con una masa m requiere una cierta fuerza para variar su velocidad. Equivalentemente, cualquier cuerpo sometido a una aceleración experimentará una cierta fuerza.

El acelerómetro escogido es el MPU6050 ya que es de baja potencia, y es análogo completo con 3 ejes que emite señales reguladas con voltaje de salida. Mide aceleraciones con escala $\pm 3G$ y utiliza un nivel de tensión de 3,3 V. Dentro de las

cosas que logra medir se encuentra la aceleración dinámica resultante del movimiento, utilizada para este tipo de mesas sísmicas.

Si bien es cierto cuenta con 3 ejes de señales, pero en el caso de la mesa sísmica en cuestión se utiliza solo una dirección ya que se está midiendo las aceleraciones en un solo eje de coordenadas.

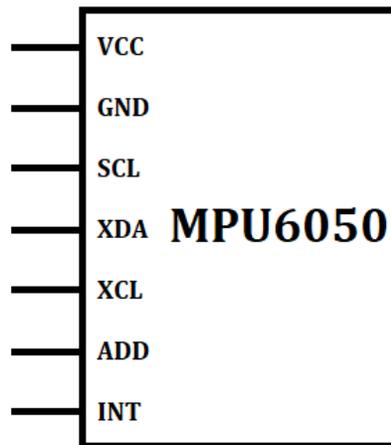


Ilustración 4.10: Plano Acelerómetro MPU6050 (Fuente: Manual de Acelerómetro MPU6050).

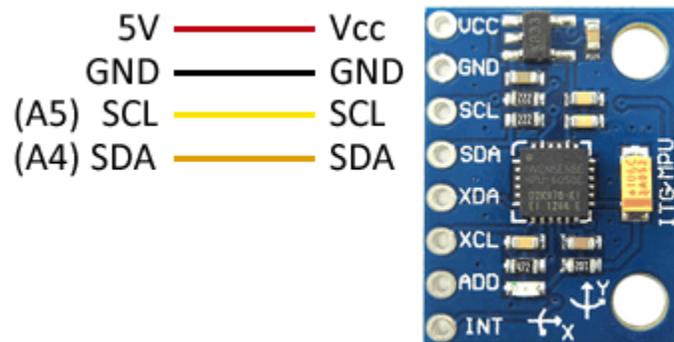


Ilustración 4.11: Acelerómetro MPU6050 (Fuente: www.luisllamas.es).

4.7 ACTUADORES

Es el dispositivo capaz de transformar energía eléctrica en la activación de un proceso, con la finalidad de generar un efecto sobre otro elemento externo. Este recibe la orden de un controlador que en este caso es Arduino Uno y en función a ella genera la orden para activar el elemento final de control.

4.7.1 SERVOMOTOR

El servomotor a utilizar es de rotación continua marca Parallax, y es ideal para este tipo de funcionamiento. Se comunica fácilmente con cualquier microcontrolador que sea capaz de producir una salida PWM de 50 hz. La función que cumple en la tesis es de generar el movimiento necesario para poder mover todo el sistema a velocidades dadas por medio del controlador Arduino.

Sus especificaciones se muestran a continuación:

- Rotación continua bidireccional • 0 a 50 rpm, con respuesta lineal a PWM para rampa de velocidad sencilla.
- Potenciómetro para ajustar la parada del motor.
- Par: 38 oz-plg. a +6 V.
- Montaje de servo R/C (hobby) estándar y conector de 3 contactos.
- Fuente de alimentación: +4 V a +6 V dc, 15 a 200 mA.
- Rango de temperaturas de funcionamiento: -10 a +50 °C.

- Dimensiones: 55,8 x 19 x 40,6 mm excluida bocina del servo.
- Peso: 42,5 g.

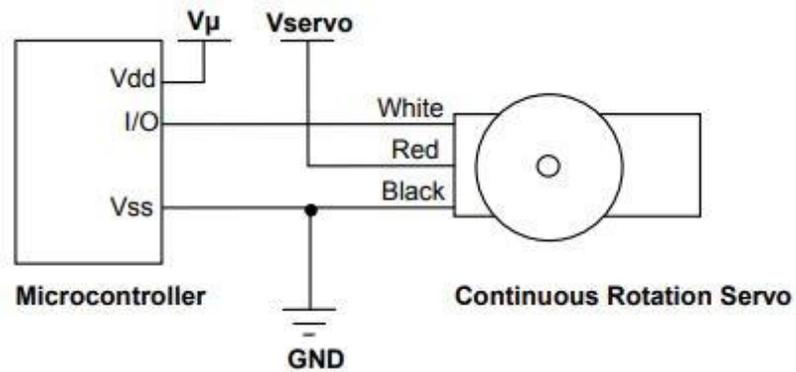


Ilustración 4.12: Plano Servomotor de rotación continua (Fuente: Manual servomotor Parallax).

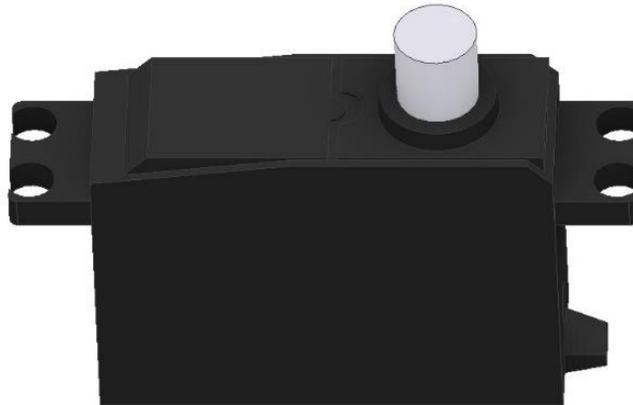


Ilustración 4.13: Servomotor Parallax (Fuente: Elaboración propia).

4.8 ENSAMBLE MESA SÍSMICA

Las siguientes ilustraciones dan a conocer el ensamble de la mesa sísmica con sus distintas piezas. Donde la ilustración 4.14 representa la parte mecánica de la mesa sísmica, que es donde se genera el movimiento horizontal del sismo.

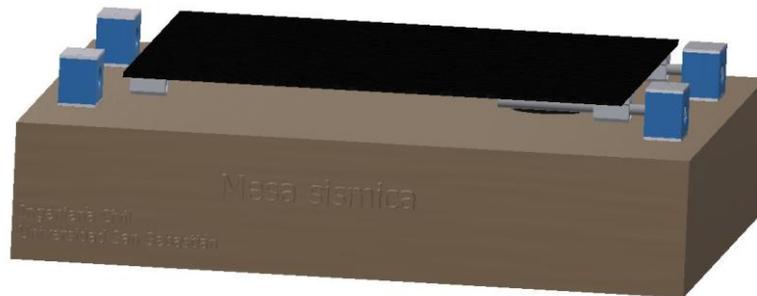


Ilustración 4.14: Ensamble Mesa sísmica (Fuente: Elaboración propia).

La ilustración 4.15 interpreta la estructura que irá sobre la mesa sísmica, y es donde están instalados los acelerómetros que medirán aceleraciones de los sismos a simular.



Ilustración 4.15: Estructura de impresión 3D (Fuente: Elaboración propia).

La ilustración 4.16 presenta las conexiones del Arduino Uno y sus distintas piezas para el buen funcionamiento de la mesa sísmica.

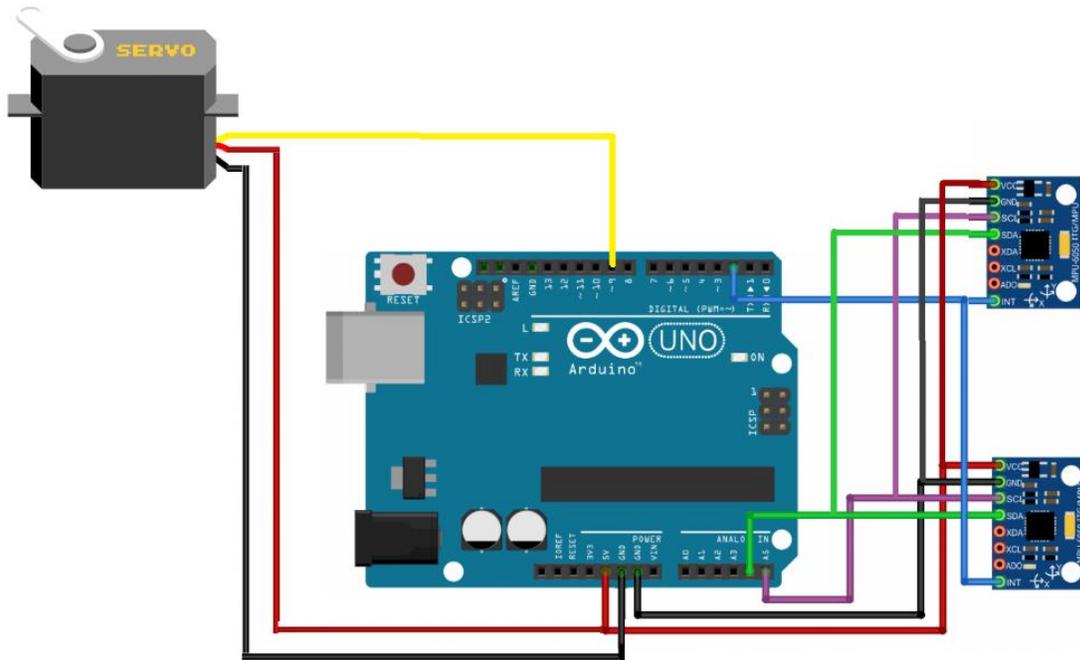


Ilustración 4.16: Esquema de Ensamble Arduino Uno con motor y sensores (Fuente: Elaboración propia).

La ilustración 4.17: muestra el ensamble completo del sistema, donde se presenta un computador que es el programador del sistema (Arduino Uno) y se transmite al servomotor para generar los movimientos horizontales que produce la mesa sísmica. Sobre la mesa sísmica va instalada la estructura que es donde están instalados los acelerómetros para lograr graficar la aceleración vs tiempo de un sismo.

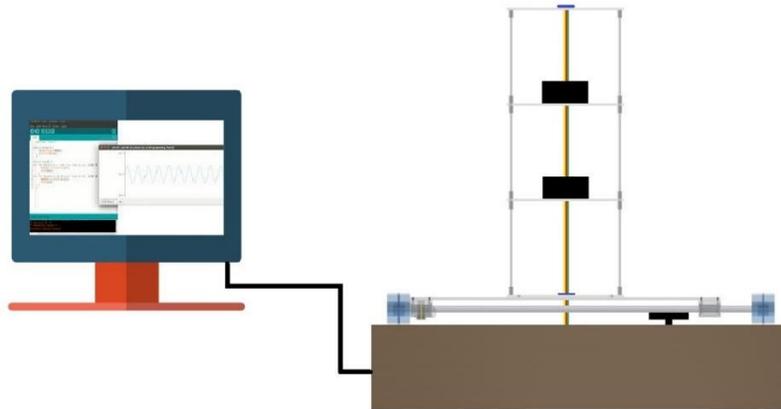


Ilustración 4.17: Ensamble completo (Fuente: Elaboración propia).

La ilustración 4.18 da a conocer el simulador en su versión original, para un completo conocimiento del real estado de la mesa sísmica.



Ilustración 4.18: Simulador sísmico real (Fuente: Elaboración propia).

CAPITULO 5 PARAMETROS DE ESTUDIO Y RESULTADOS

Los parámetros y resultados obtenidos son en base a prueba y error, para lograr llegar al mejor resultado posible.

Se decide seguir una línea de estudio para la interpretación de datos, donde se simulan 3 sismos reales y escalados, logrando generar el grafico de aceleraciones en tiempo real para cada uno de ellos.

El sistema es programado en Arduino, y es importante ingresar a la programación algunas librerías que hacen posible su correcto funcionamiento. Dentro de ellas se encuentran:

- I2C ("I2Cdev.h") y Wire ("Wire.h"): Encargadas de generar una comunicación interna entre los acelerómetros.
- MPU6050 ("MPU6050.h"): Librería para el buen funcionamiento del acelerómetro a estudiar.
- PID (<PID_v1.h>): Elimina los datos que le dan inestabilidad al sistema.
- <PGMWrap.h>: Permite almacenar datos en el Sketch, que es la partición con más espacio.
- <Servo.h>: Librería encargada del buen funcionamiento del servomotor.

5.1 SIMULACION DE SISMOS REALES.

Se consideran 3 sismos importantes a nivel mundial, que son el de Concepción (2010), Kobe (1995) y Northridge (1994).

5.1.1 CALIBRACION SERVOMOTOR

Lo primero y más importante en realizar, es lograr entender el funcionamiento del servomotor de giro continuo, para lograrlo es necesario ver el catálogo y encontrar las r.p.m máximas que soporta el servo en condiciones óptimas, que en este caso es de 50 r.p.m. También cabe destacar los rangos de giro que tiene el servomotor (giro continuo) Ilustración 5.1, donde 90° equivale al servomotor estático; de 90° a 0° va aumentando gradualmente la velocidad angular en la dirección de las manecillas del reloj, siendo este último el que tiene la mayor velocidad y por ende cumple con 50 r.p.m. Lo mismo ocurre a medida que va aumentando desde 90° a 180° pero en la dirección opuesta. De esta manera se genera una conexión directa entre ángulo y velocidad de giro.

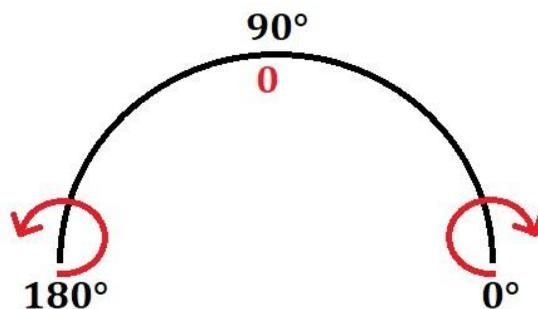


Ilustración 5.1: Giros de Servomotor (Fuente: Elaboración propia).

Saliendo de las condiciones óptimas que presenta el servomotor, toca verificar cuantas r.p.m. soporta con el peso a mover en la mesa sísmica. Para lograrlo, manualmente hay que observar cuantas vueltas da el servo en un minuto a la máxima velocidad, que en este caso puede ser 180° o 0° (dependiendo la dirección que se le dé). Una vez realizado este estudio se logró concluir que el servo en las condiciones de uso para la mesa sísmica logra un máximo de 39 r.p.m con un peso a mover de 4,2 kg.

Siguiendo con el mismo estudio anterior, es necesario verificar cuantas r.p.m. rinde en los distintos ángulos de velocidades, y una de las conclusiones es que superando los $90^{\circ} \pm 15^{\circ}$, el servo se comporta de igual manera, quedando los 15° como la velocidad máxima que gira el servomotor en 39 r.p.m. La otra conclusión es que tomando otros valores de velocidades aleatorios menores a 15° rinde:

$5^{\circ} \rightarrow 23,6$ r.p.m.

$10^{\circ} \rightarrow 36,8$ r.p.m.

$15^{\circ} \rightarrow 39$ r.p.m.

Considerando los valores anteriores, es necesario encontrar una ecuación para determinar cómo varía el ángulo y la r.p.m. Es por eso que mediante Excel se logra generar una línea de tendencia polinómica de grado 2, y de esta manera encontrar una ecuación representativa de la Ilustración 5.2.

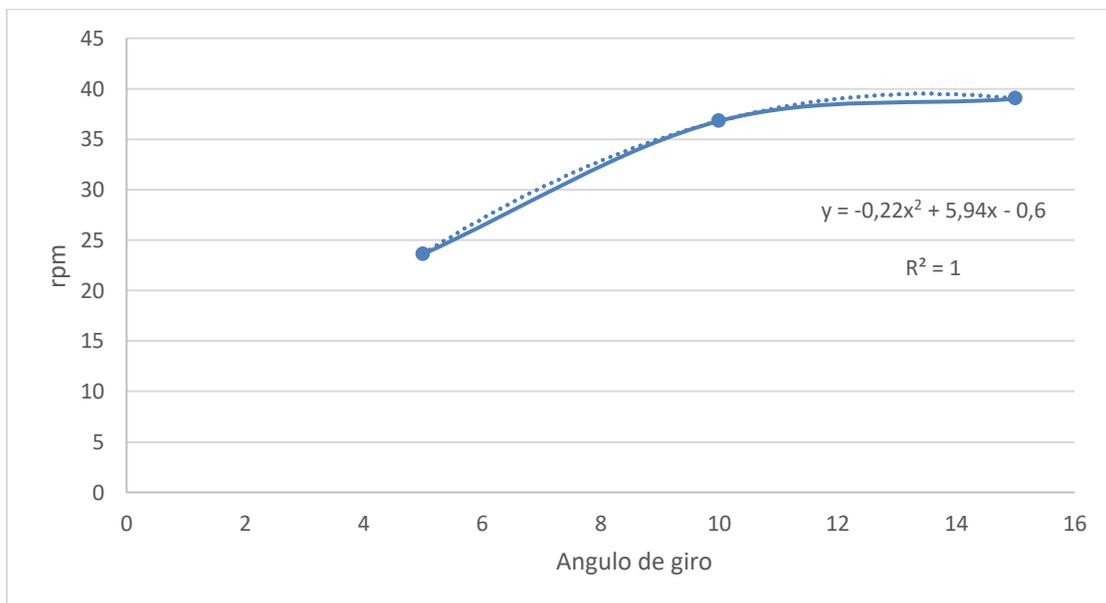


Ilustración 5.2: Gráfica de r.p.m. vs Ángulo de giro (Fuente: Elaboración propia).

Donde la ecuación asociada a la gráfica es:

$$y = -0,22x^2 + 5,94x - 0,6 \quad (5.1)$$

El siguiente paso a seguir es buscar los datos de aceleraciones en los sismos de Concepción (2010), Kobe (1995) y Northridge (1994). Estos fueron obtenidos de (<http://www.evtdb.csn.uchile.cl/>, s.f.) y de (<http://www.strongmotioncenter.org>, s.f.).

Los datos de aceleraciones obtenidos deben ser trabajados de tal manera que logren ser lo más representativos en los movimientos que genera el servomotor. Es por eso que el método a seguir en esta memoria en cada uno de los sismos es el siguiente:

- a) Lo primero es tener en cuenta la capacidad de la placa Arduino Uno, que cuenta con dos particiones: el Sketch con una capacidad de 32.256 bytes, y las variables globales que cuentan con 2.048. En este caso se ocupará el Sketch ya que es la capacidad mayor para ingresar los datos de entrada, que puede recolectar como máximo 11.000 datos de un sismo.
- b) A continuación, hay que generar una base de datos en Excel con los datos a simular. En la primera columna se ingresa el delta tiempo (seg) que existe entre cada aceleración, y en la segunda columna los datos a ingresar son las aceleraciones (m/s^2) obtenidas.
- c) Luego, es necesario integrar la aceleración, obteniendo como resultado la velocidad lineal (ecuación 3.2). El primer valor es $v_1=0$, ya que está en reposo. El segundo valor (v_2), es la velocidad lineal anterior ($v_{2-1=1}$) sumado de la multiplicación entre aceleración (a_i) y delta t. Su unidad de medida es m/s.

d) El sismo de concepción cuenta con 28.338 datos de aceleraciones y un $\Delta t=0,005$ seg, por lo que es necesario acotarlo a 1/3 para cumplir la capacidad de almacenamiento que contiene el Arduino Uno. El método para acotar estos datos es hacer un promedio cada 3 valores de velocidades lineales, obteniendo un nuevo valor que por ende arroja cambio en el delta t, dando como resultado 9.446 datos y un $\Delta t=0,015$ seg. De esta manera no perjudica la duración del tiempo del sismo, tomando una muestra representativa.

Por su parte, el sismo de Kobe cuenta con 3.201 datos de aceleraciones y un $\Delta t=0,01$ seg. En este caso no es necesario aplicar un ajuste representativo ya que cumple con el límite de memoria del Arduino Uno.

El sismo de Northridge tiene 13.436 datos de aceleraciones con un $\Delta t=0,005$ seg. Ya que los primeros datos de aceleraciones son muy pequeños y, debido ello, poco representativos, es factible eliminar los primeros 2.436 datos para quedar los siguientes 11.000, de esta manera se completa la máxima memoria del Arduino Uno.

e) El siguiente paso es pasar de velocidad lineal a velocidad angular (ecuación 3.4), donde la velocidad lineal es dividida por el radio de giro del eje excéntrico ($R=1,625$ cm). Su unidad de medida es rad/s.

f) Se continúa el proceso transformando la velocidad angular a revoluciones por minuto (ecuación 3.5), de esta manera se conoce el número de vueltas que logra realizar el servomotor en un minuto.

Ya que lo máximo que soporta el servomotor es 39 r.p.m., es necesario hacer un escalamiento, llevando el máximo valor de r.p.m. del sismo a 39 r.p.m. por medio de una tabla de tres simples:

$$\text{r.p.m escalado} = \frac{X \text{ r.p.m} * 39 \text{ r.p.m}}{\text{Max valor r.p.m}} \quad (5.2)$$

g) Es necesario despejar la variable x de la ecuación 5.2 mediante la ecuación cuadrática, ya que se necesita la transformación de r.p.m. (y) al ángulo de giro (x), y queda:

$$x = \frac{-5,94 \pm \sqrt{5,94^2 - 4 * (-0,22) * (0,6 - y)}}{2 * (-0,22)} \quad (5.3)$$

Al obtener dos valores para el ángulo de giro, es necesario escoger el correcto. Para el caso en cuestión el indicado es el que da un ángulo de giro menor o igual al máximo soportado por el servomotor (ángulo de giro $\leq 15^\circ$).

Con todos estos pasos se cumple con el objetivo de darle un output correcto a las aceleraciones. Para ejemplificar los pasos anteriormente señalados se da a conocer el siguiente diagrama de flujo (ilustración 5.3):

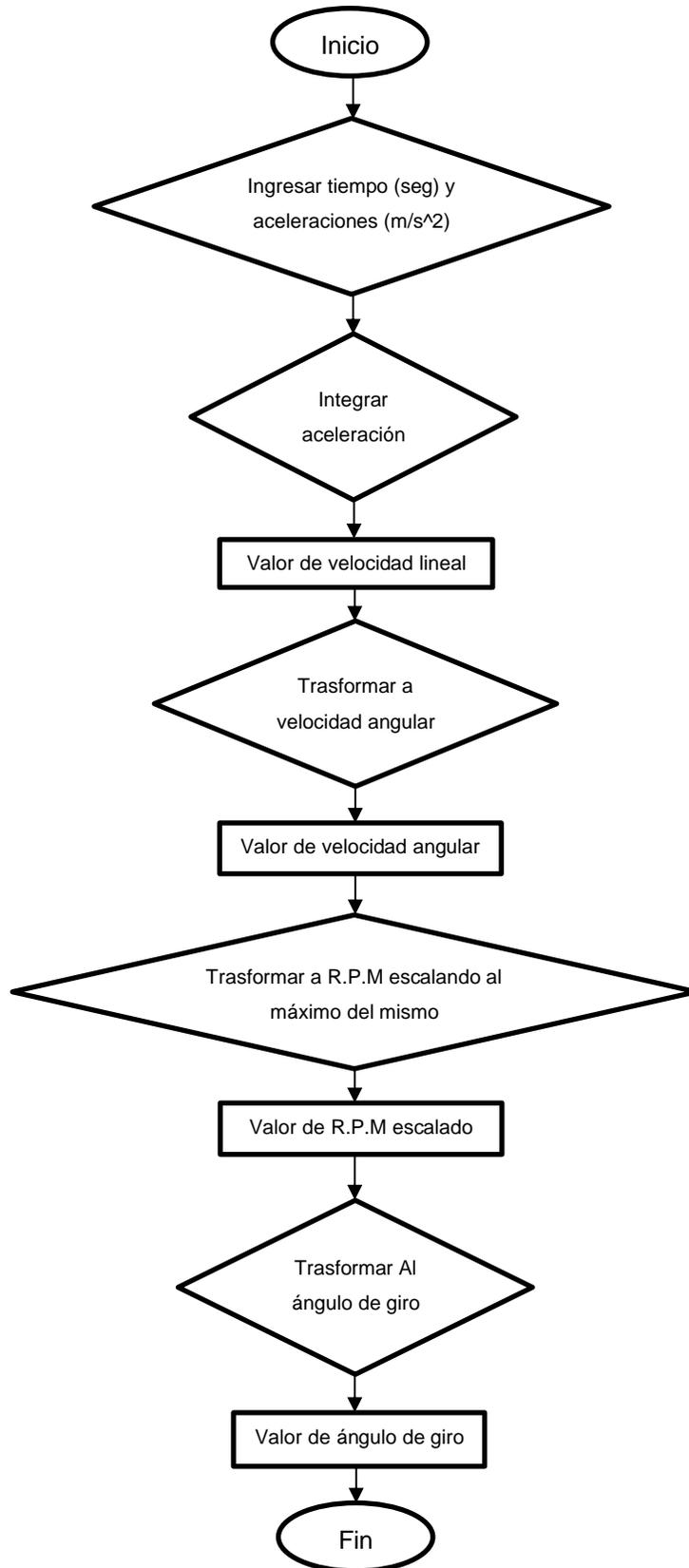


Ilustración 5.3: Diagrama de flujo, transformar de “Aceleración al ángulo de giro”

5.1.2 CALIBRACIÓN DEL ACELEROMETRO

Lo primero es calibrar el acelerómetro mediante una programación de Arduino, en la cual hay que tener el sensor en reposo, entonces el programa empieza por leer los *offsets* y pide enviar un carácter por el puerto serie. El programa trata de corregir los errores de medida, estando calibrado cuando se presentan estos valores en el puerto serie:

- Aceleración: $p_{ax}=0$, $p_{ay}=0$, $p_{az}=+16.384$
- Velocidad angular: $p_{gx}=0$, $p_{gy}=0$, $p_{gz}=0$

Luego, es necesario escalar la lectura de datos para obtener aceleraciones en m/s^2 , ya que el Arduino trabaja en g. Quedando de la siguiente manera:

$$a \left(\frac{m}{s^2} \right) = \frac{2 \cdot 9,81}{32768,0} \quad (5.4)$$

Resuelto lo anterior, es necesario abrir el monitor serie para verificar si realmente comienza en 0 la lectura de datos, y como en esta memoria no es el caso (ilustración 5.4) se debe recurrir a un ajuste, el cual consiste en registrar el primer valor de cada acelerómetro sumándolo específicamente en “`Serial.print(ay_m_s2+valor1)`” de la programación para el acelerómetro del piso y `Serial.println(ay_m_s22+valor2)` para el acelerómetro de la azotea. Logrando de esta forma graficar lo más cercano posible al origen (ilustración 5.5).

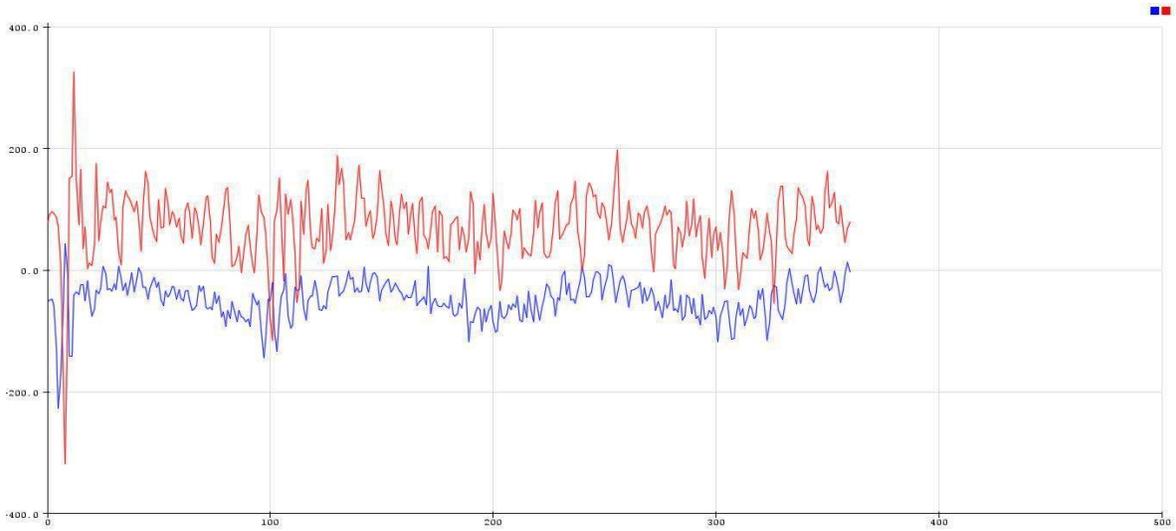


Ilustración 5.4: Grafico de aceleración vs tiempo sin ajustar (Fuente: Elaboración propia)

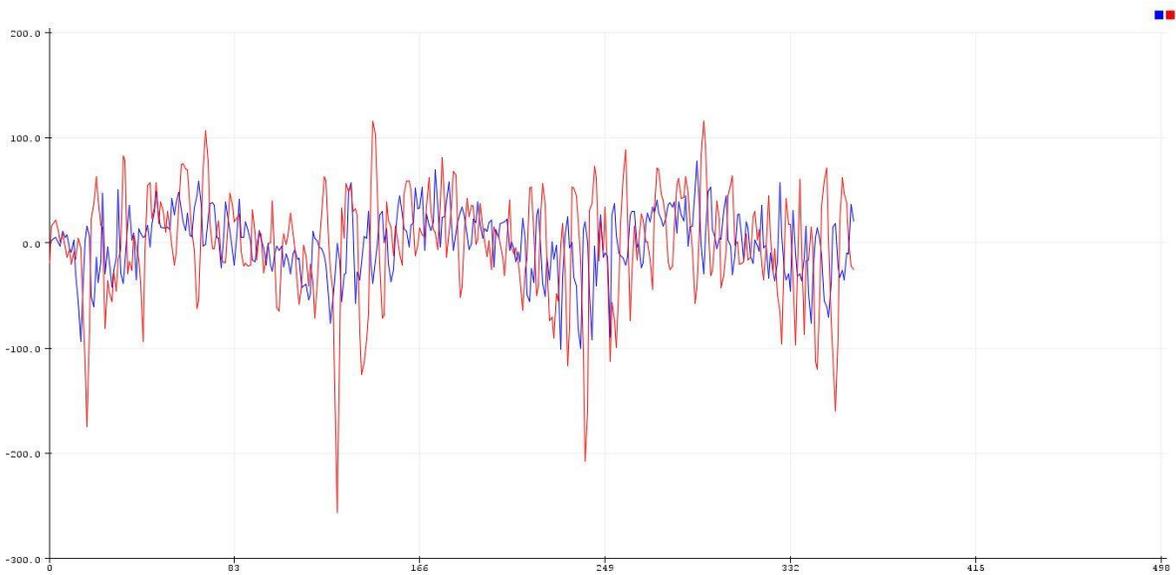


Ilustración 5.5: Grafico de aceleración vs tiempo ajustado (Fuente: Elaboración propia)

5.1.3 INGRESO DE DATOS AL ARDUINO

Los datos de las aceleraciones transformadas al ángulo de giro se envían a la programación de Arduino en forma de vector específicamente en “int16_p Aceleraciones [] PROGMEM”. Luego es necesario ingresar el Δt del sismo en milisegundos “int deltaT”. Estas son las únicas variables que se ingresan manualmente en la programación. A continuación, se muestra un ejemplo del ingreso de datos:

```
int16_p Aceleraciones[] PROGMEM = {4.6, 4.69, 4.76, 4.8, 4.82, -4.79, -4.74, 4.68}
};
int deltaT=10;
```

Ilustración 5.6: Ejemplo del ingreso de datos a la programación Arduino (Fuente: Software Arduino).

5.1.4 GRAFICOS DE ACELERACIONES

Para analizar qué tan reales son los datos obtenidos por la mesa sísmica es necesario generar una comparación entre el *INPUT* (datos de entrada) y *OUTPUT* (datos de salida).

INPUT

Como *INPUT* se tiene los datos de entrada “aceleración vs tiempo” obtenidos del sismo de Concepción (Ilustración 5.7), Kobe (Ilustración 5.8) y Northridge (Ilustración 5.9).

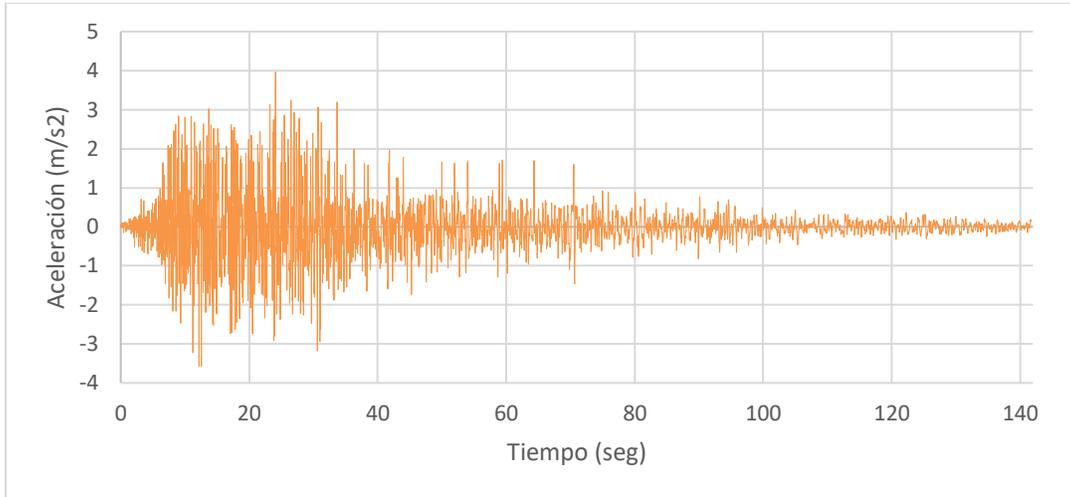


Ilustración 5.7: Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo real de Concepción (Fuente: Elaboración propia).

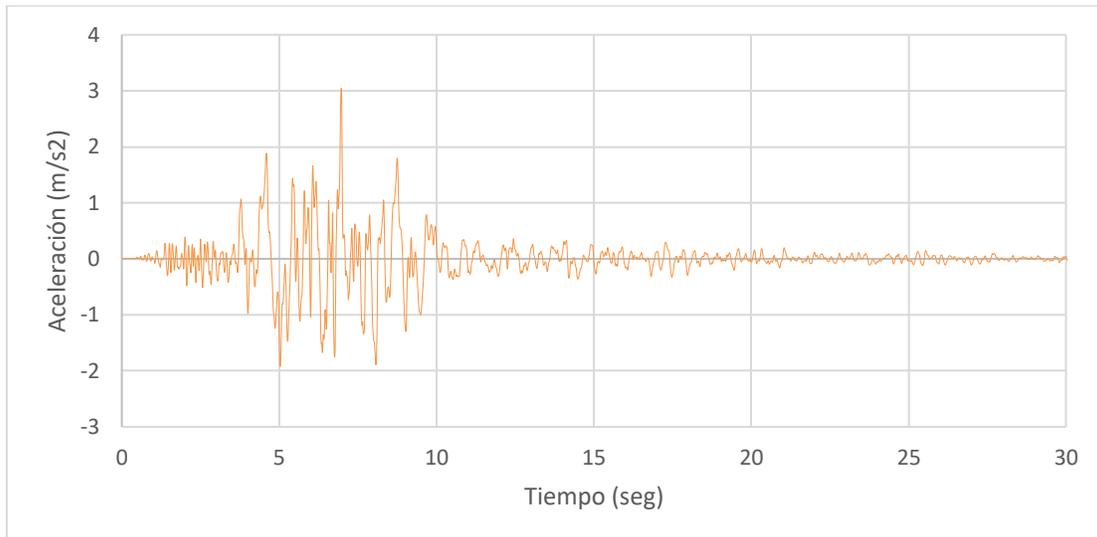


Ilustración 5.8: Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo real de Kobe (Fuente: Elaboración propia).

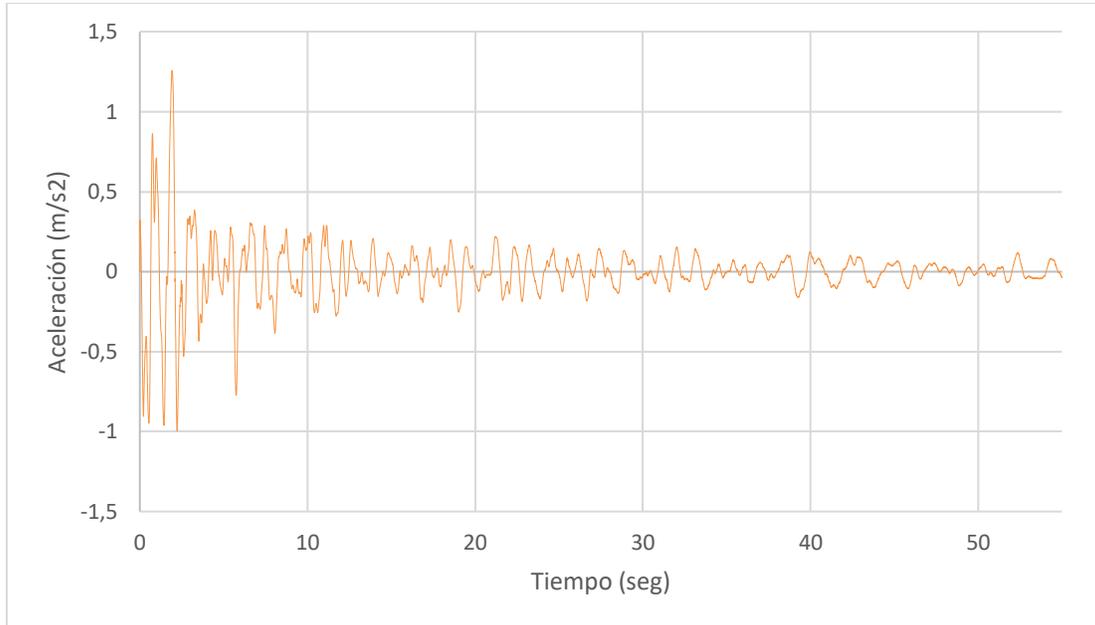


Ilustración 5.9: Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo real de Northridge (Fuente: Elaboración propia).

OUTPUT

Los *OUTPUT* son los datos de salida que crea el Arduino mediante el Monitor serie, donde se obtienen las aceleraciones de cada sismo para realizar un gráfico “Aceleración vs Tiempo” de las mediciones realizadas por el sistema para el piso y la azotea. Es relevante también mencionar que el *delay* que se ingresa no concuerda con el real, ya que los procesos previos que realiza la programación retrasan el sistema considerablemente.

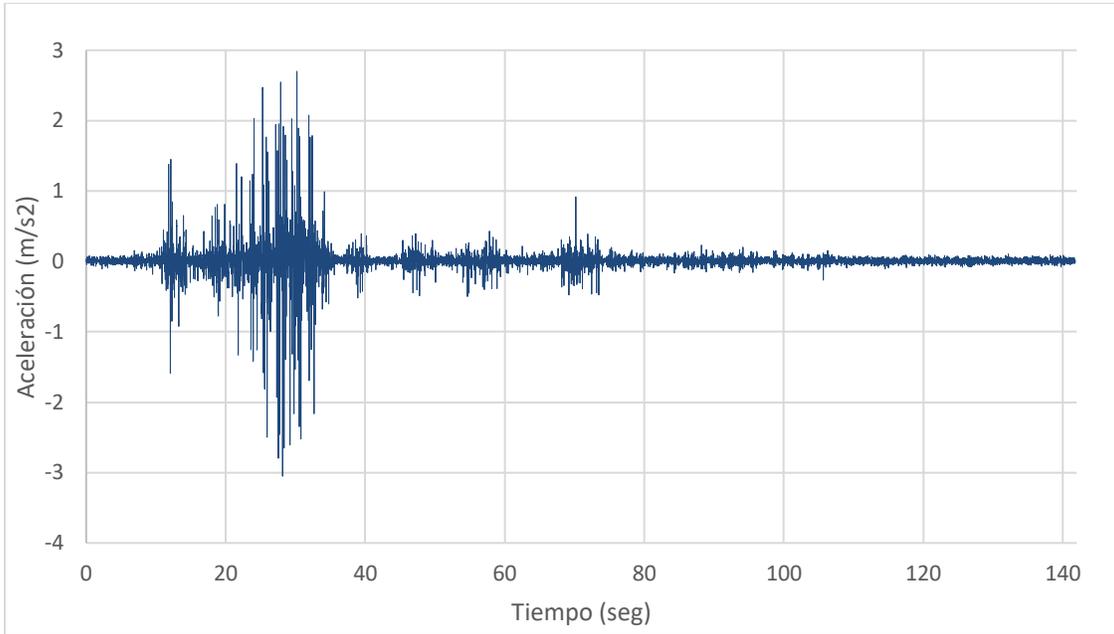


Ilustración 5.10: Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la base, Concepción (Fuente: Elaboración propia).

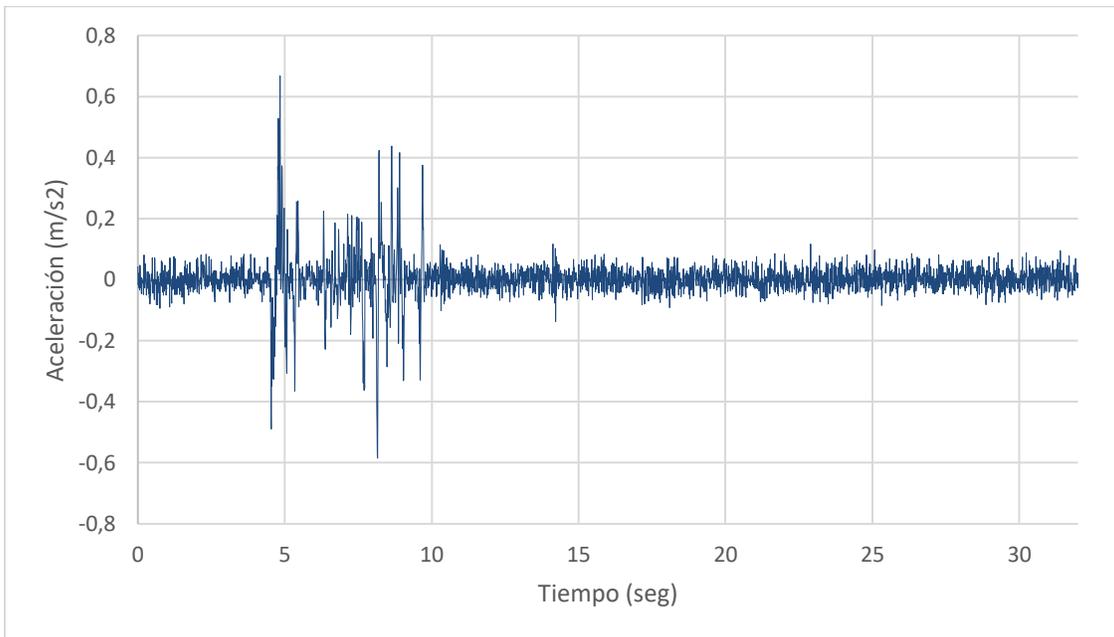


Ilustración 5.11: Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la base, Kobe (Fuente: Elaboración propia).

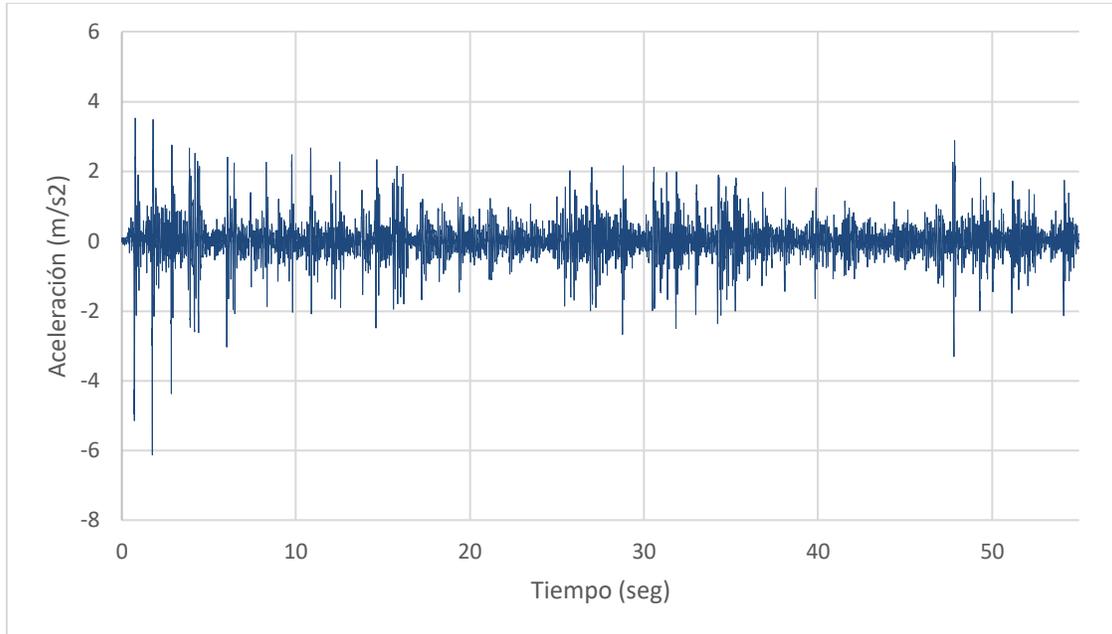


Ilustración 5.12: Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la base, Northridge (Fuente: Elaboración propia).

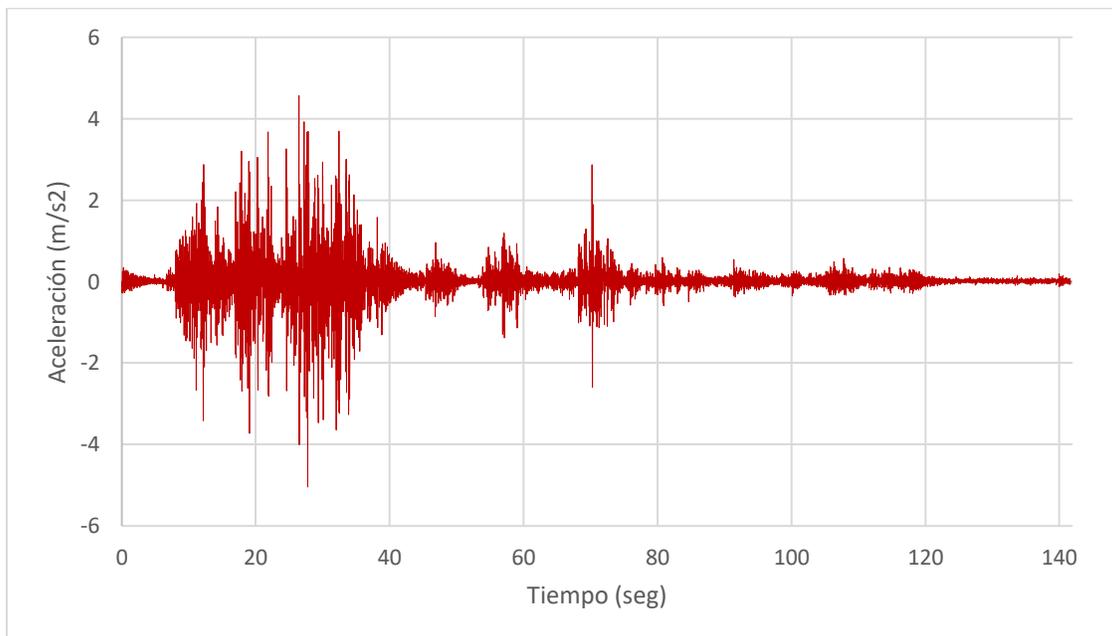


Ilustración 5.13: Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la azotea, Concepción (Fuente: Elaboración propia).

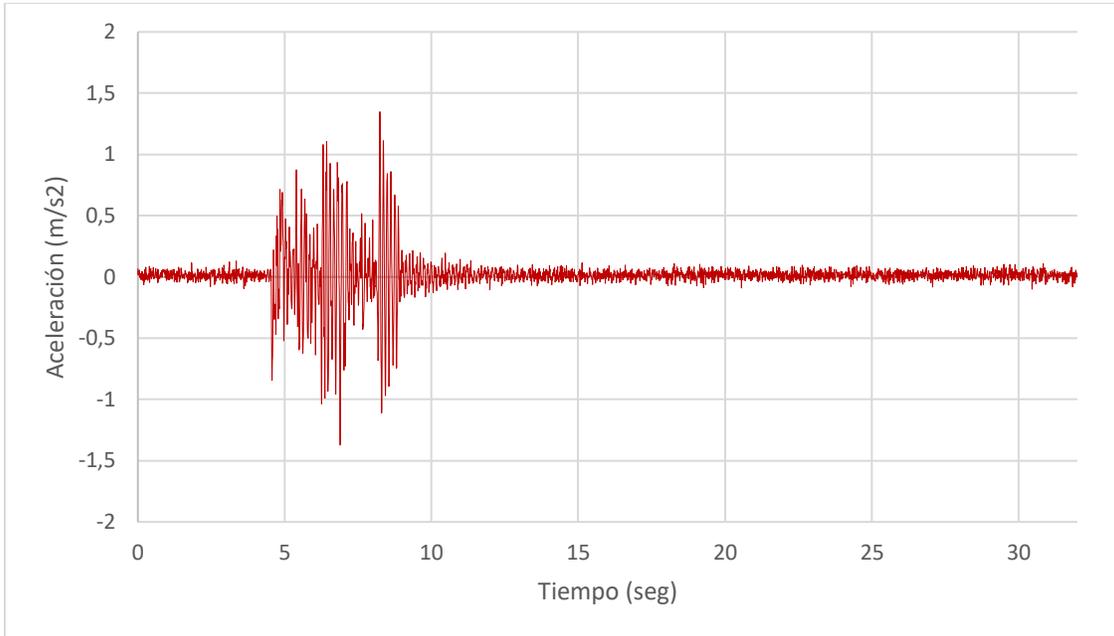


Ilustración 5.14: Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la azotea, Kobe (Fuente: Elaboración propia).

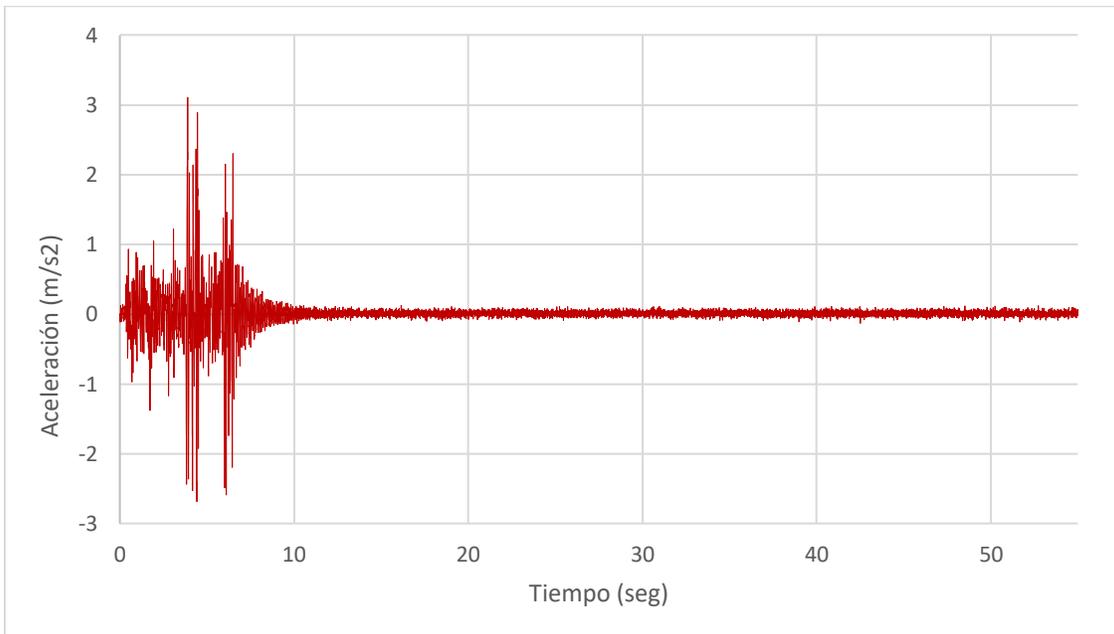


Ilustración 5.15: Gráfica de “Aceleración vs Tiempo”. Sismo simulado en la azotea, Northridge (Fuente: Elaboración propia).

5.2 INTERPRETACIÓN DE GRÁFICOS

Luego del proceso realizado para generar gráficos en tiempo real, es necesario realizar una comparación interpretando que tan similares o diferentes son entre sí.

5.2.1 INPUT VS OUTPUT (BASE)

Si bien es cierto los valores que interpreta el OUTPUT no son completamente diferentes en comparación al INPUT, no logran ser muy similares. La razón es que al realizar todo el proceso de transformación de aceleración al ángulo de giro se pierden valores que hacen generar un movimiento del servomotor lo más cerca a la realidad.

También cabe mencionar la pérdida de valores reales por la sensibilidad de los acelerómetros y el escalamiento de estos.

Por último, las limitantes del servomotor que con valores de ángulo de giro entre 1 y -1, hacen que se mantenga en reposo, perdiendo de esta manera los valores que se encuentran dentro del rango antes mencionado. Interfiriendo de esta manera en la presentación de la gráfica del INPUT.

A continuación, se muestra la unión de los gráficos INPUT y OUTPUT (Base) para ejemplificar de mejor manera lo mencionado anteriormente.

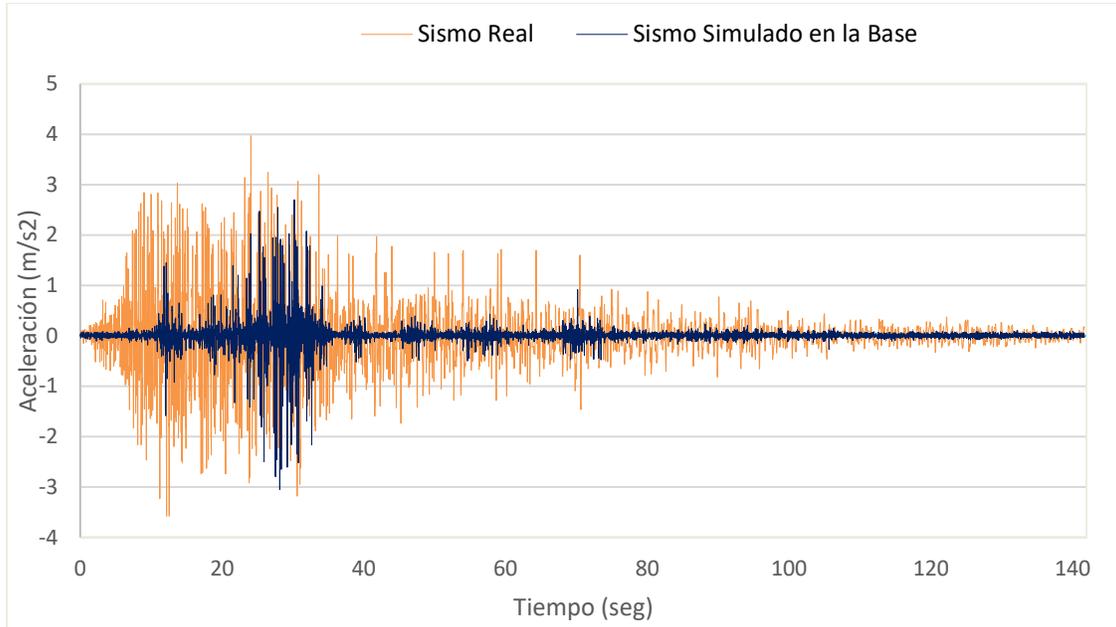


Ilustración 5.16: Gráfico comparativo Sismo Real y Sismo Simulado en la Base de la estructura, Concepción (Fuente: Elaboración propia).

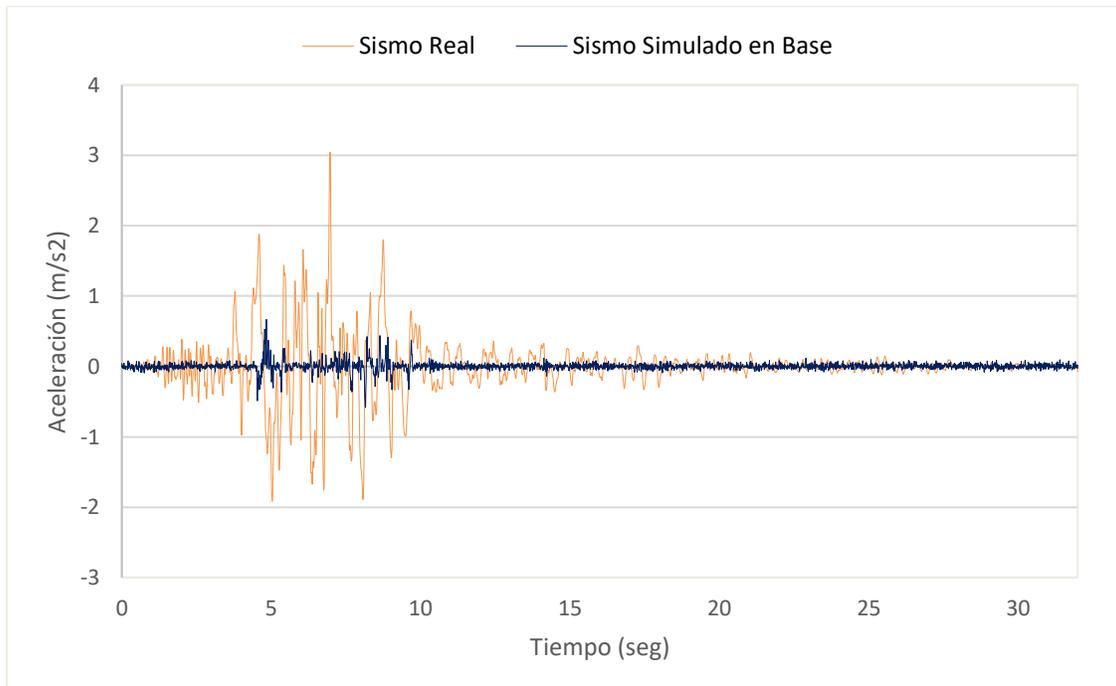


Ilustración 5.17: Gráfico comparativo Sismo Real y Sismo Simulado en la Base de la estructura, Kobe (Fuente: Elaboración propia).

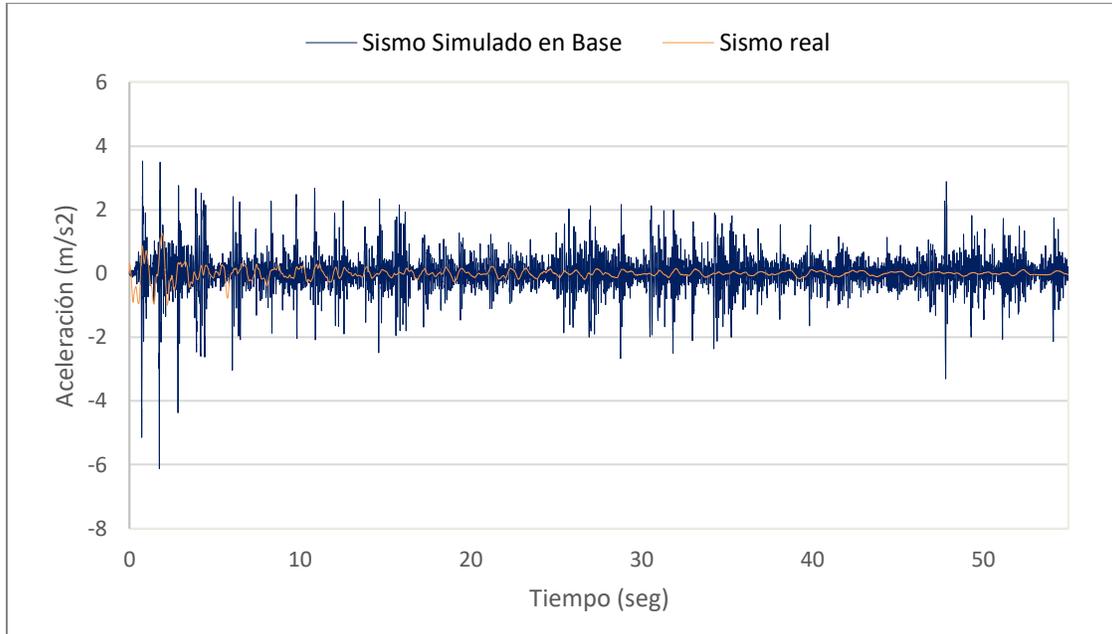


Ilustración 5.18: Gráfico comparativo Sismo Real y Sismo Simulado en la Base de la estructura, Northridge (Fuente: Elaboración propia).

5.2.2 OUTPUT (BASE) VS OUTPUT (AZOTEA)

Al comparar entre los gráficos del OUTPUT, se logra interpretar que los valores de aceleración para la base son menores a los de la azotea. Esto se debe a que la base de un edificio entra en vibración transmitiéndola a la estructura, comenzando a vibrar también. Como las estructuras tienen cierta elasticidad, la vibración no es la misma y tanto el periodo de vibración como las aceleraciones de la base son diferentes a la azotea.

Las aceleraciones a las cuales está sometida la base no son independientes, ya que el aumento de una implica el movimiento de la otra, generalmente en forma lineal.

En resumen, quiere decir que para la base los periodos de vibración son más cortos que los de la azotea, siendo directamente proporcional a los valores de aceleraciones.

A continuación, se muestra la unión de los gráficos OUTPUT de la base y azotea para ejemplificar de mejor manera lo mencionado anteriormente.

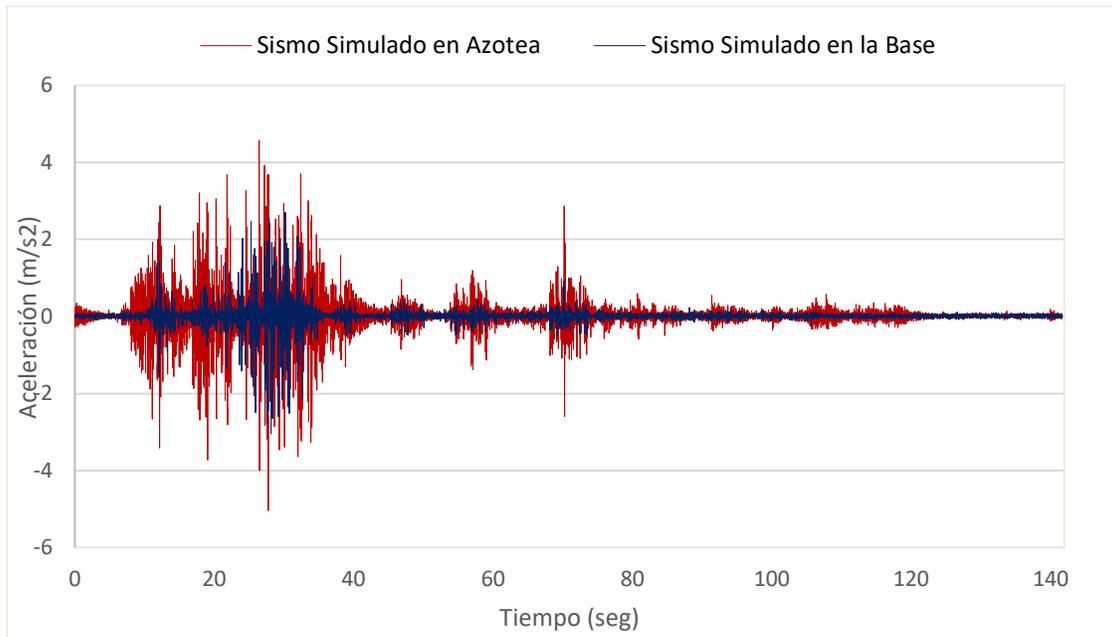


Ilustración 5.19: Gráfico comparativo de Sismo Simulado en la Base y Azotea de la estructura, Concepción (Fuente: Elaboración propia).

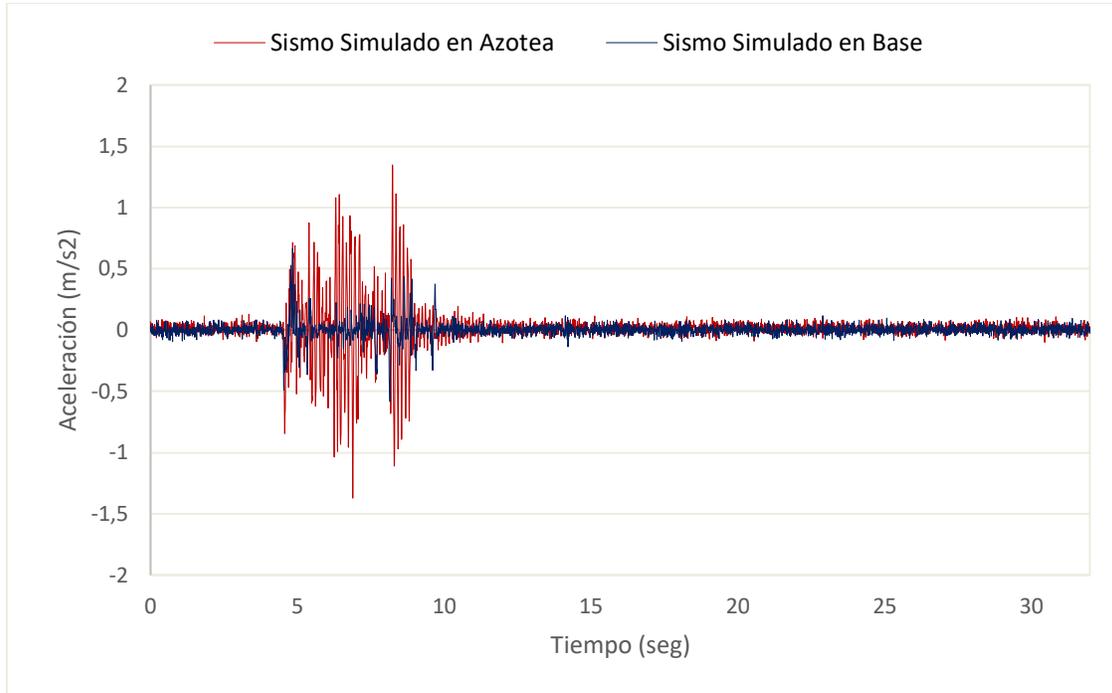


Ilustración 5.20: Gráfico comparativo de Sismo Simulado en la Base y Azotea de la estructura, Kobe (Fuente: Elaboración propia).

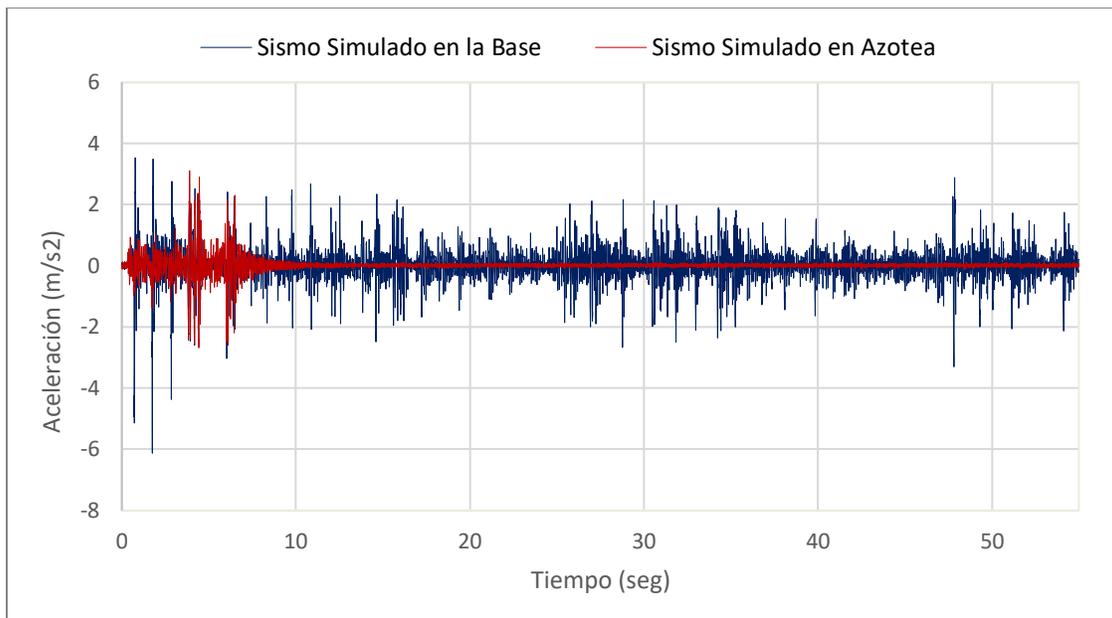


Ilustración 5.21: Gráfico comparativo de Sismo Simulado en la Base y Azotea de la estructura, Northridge (Fuente: Elaboración propia).

CAPITULO 6 CONCLUSIONES

Se consiguió crear un diseño muy práctico para los estudios sísmicos, que logró ser tangible gracias a la materialización de este, instalando una estructura sobre ella muy fácil de montar y desmontar.

Se escogió un sistema de control PID que logró eliminar gran cantidad de ruido generada por los acelerómetros para tener una gráfica lo más limpia posible de errores.

Se obtuvieron resultados muy razonables para el servomotor con giro continuo, que pasó de aceleración al ángulo de giro logrando movimientos muy similares a la realidad de un sismo. A su vez, los dos acelerómetros fueron calibrados y escalados para graficar en cm/s^2 de una correcta manera.

Si bien es cierto que se logró calibrar de una buena manera los acelerómetros, los resultados que se obtuvieron de los *OUTPUT* no son similares a los que vienen del *INPUT*, esto se debe a las diversas escalas y conversiones que se tuvieron que realizar en el sistema, por lo que se fue perdiendo el real valor de la aceleración. A su vez el Δt ingresado al tener procesos previos aumenta el valor inicial del *delay*, alargando el sismo considerablemente.

El servomotor cumple un rol fundamental en el sistema, por lo que es necesario mencionar que debido a las limitantes que tiene, no logra generar movimientos en ciertos parámetros de ángulo de giro (± 1). Interfiriendo en la gráfica resultante.

La comparación entre gráficos demuestra que los valores de aceleración de la base son menores a los de la azotea, ya que la base tiene periodos más cortos que la azotea, debido a la elasticidad de la estructura.

Cabe mencionar la gran importancia que tendrá la mesa sísmica presentada en el área académica, ya que será de gran apoyo para los estudiantes de la Universidad San Sebastián en los ramos de estructuras e ingeniería sísmica. También servirá como materia de estudio para futuras memorias de título y de esta manera ir mejorando el trabajo ya realizado.

También es importante destacar la convergencia lograda entre la programación del sistema y los conocimientos de ingeniería civil, ya que es muy importante contar con herramientas que salen un poco de la carrera, aumentando los conocimientos de una manera importante y en temas que pueden ser de gran ayuda para lograr trabajos en equipo y multidisciplinarios.

BIBLIOGRAFIA

- Carazo, N. (2012). *NC Arquitectura*. Obtenido de <http://ncarquitectura.com/que-es-la-aceleracion-sismica/>
- Chopra, A. K. (s.f.). *Dinamica de Estructuras*. . 4ta Edición.
- Coral, H. A., Ramírez, J. M., Rosero, E. E., Thomson, P., Gómez, D., & Marulanda, J. (2010). Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable para modelos. *Ingeniería y Competitividad*, 12(2), 95-115.
- Delgado, G. R. (2016). Diseño de una mesa sísmica de un grado de libertad para el desarrollo de experiencias para los alumnos de pregrado de Ingeniería Civil . (*Tesis de pregrado*). Universidad San Sebastián, Concepción.
- Gómez, J. H. (2000). *Introducción a la dinámica de estructuras*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Guajardo, M. O. (2009). Ensayo en mesa vibratoria de marco de acero con conexiones SMA. (*Tesis de pregrado*). Universidad de Chile, Santiago.
- J. O'hagan and Q. Ma. (2012). "Experimental assessment of PID control for a uniaxial shake table", 15th World Conference on Earthquake Engineering,. Lisboa, Portugal.
- Oliva, J. B. (2008). Montaje, puesta en marcha y calibración de una mesa de vibrar de un grado de libertad . (*Tesis de pregrado*). Universidad de Chile, Santiago.
- Sáez, A. (s.f.). Capítulo 2. Elementos de dinámica estructural . En A. Sáez, *Estructuras III. E.T.S.* (págs. 9-52). Sevilla: Arquitectura de Sevilla.
- Vallés, P. L. (2013). Diseño de un simulador sísmico. (*Tesis de pregrado*). Universidad de Almeria, Almería.
- (<http://www.evtdb.csn.uchile.cl/>, s.f.)
- (<http://www.strongmotioncenter.org>, s.f.)
- (<http://www.Luisllamas.es>, s.f.)

ANEXOS

ANEXO A: PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA.

La programación se realiza en el *software* Arduino Uno, y basado en un sistema de control PID, que busca minimizar el error del sistema y las ganancias particulares de la acción proporcional, integral y derivativa. A su vez, se le agrega 2 sensores para medir aceleraciones en la base de la mesa sísmica y en el último piso de la estructura.

A.1 CODIGO

```
//----- MESA SISMICA -----  
-----  
// MEMORIA DE TITULO: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MESA SÍSMICA  
UNIDIRECCIONAL CON UNA ESTRUCTURA A PEQUEÑA ESCALA PARA  
ANÁLISIS DE ACELERACIÓN DE UN SISMO"  
// AUTOR: MARCO ANTONIO BASTIDAS MEDINA  
  
//--- librerias ---  
  
#include "I2Cdev.h" // Comunicacion I2C para los acelerómetros  
#include "MPU6050.h" // Acelerómetro MPU6050  
#include "Wire.h" // Controlador extra del I2C  
#include <PID_v1.h> // Algoritmo PID  
#include <PGMWrap.h> // Almacenar datos en Sketch  
#include <Servo.h> // Servomotor
```

ANEXOS.

// --- Definicion de variables ---

MPU6050 sensorPiso(0x69); // Acelerometro 1 (Piso)

MPU6050 sensorAzotea; // Acelerometro 2 (Azotea)

Servo myServo ; // Servomotor

int ac1x, ac1y, ac1z, ac2x, ac2y, ac2z; // Valores sin procesar
(acelerometro)

int g1x, g1y, g1z, g2x, g2y, g2z; // Valores sin procesar
(giroscopio)

double ax_m_s2, ay_m_s2, az_m_s2, gx_deg_s, gy_deg_s, gz_deg_s; // Valores
procesados acelerometro 1 (da precisión a los datos)

double ax_m_s22, ay_m_s22, az_m_s22, gx_deg_s2, gy_deg_s2, gz_deg_s2; //
Valores procesados acelerometro 2 (da precisión a los datos)

double aySal1; // Aceleración salida, acelerometro
1

double aySal2; // Aceleracion salida, Acelerometro
2

int acelerometro; // Variable que almacenará la
escala ingresada

double acAcelerometro[1] = {1}; // Precisión datos de
aceleración

//--- Variables a Modificar ---

int16_p Aceleraciones[] PROGMEM = { }; // INPUT de aceleraciones de un
sismo

int deltaT= ; // delta t del sismo en milisegundo

ANEXOS.

```
//-----
```

```
int incomingByte = 0; // Para datos de entrada
boolean flag = false; // Para controlar el paso de ingreso de escala
int j,largo; // variable para ciclos
double servoAd; // potencia adicional brindada al servo
```

```
//--- PID ---
```

```
double Kp = 3.0, Ki = 5.0, Kd = 3.0; // Definicion de los
valores proporcional, integral y derivada del PID
PID myPID(&ay_m_s2, &aySal1 , &acAcelerometro[acelerometro], Kp, Ki, Kd,
DIRECT); // Inicializacion del PID Piso
PID myPID2(&ay_m_s22, &aySal2 , &acAcelerometro[acelerometro], Kp, Ki, Kd,
DIRECT); // Inicializacion del PID Azotea
```

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Iniciando puerto serial
  myServo.attach(9); // Servo conectado al pin 9
  Wire.begin(); // Iniciando I2C
  myPID.SetMode(AUTOMATIC); // Seteo de PID en automatico
  myPID2.SetMode(AUTOMATIC); // Seteo de PID2 en automatico
  myPID.SetSampleTime(deltaT); // Tiempo de ejecución PID
  myPID2.SetSampleTime(deltaT); // Tiempo de ejecución PID2
  sensorPiso.initialize(); // Inicio del acelerometro del Piso
  sensorAzotea.initialize(); // Inicio del acelerometro de la Azotea
```

ANEXOS.

```
// Control de inicio de los acelerómetros

if(sensorPiso.testConnection()){
  Serial.println("Acelerómetro iniciado correctamente");
}
else{
  Serial.println("Error al iniciar el acelerómetro");
}

if(sensorAzotea.testConnection()){
  Serial.println("Acelerómetro iniciado correctamente");
}
else{
  Serial.println("Error al iniciar el acelerómetro");
}

myServo.write(90); // Servo empieza detenido
largo = sizeof(Aceleraciones) / sizeof(Aceleraciones[0]) ; // Lector del vector
Aceleraciones
}

void loop()
{
  for(j=0;j<largo;j++) // Inicio ciclo de vector Aceleraciones
  {
    myServo.write(90+((Aceleraciones[j]))); // Giro servomotor
    sensorPiso.getAcceleration(&ac1x, &ac1y, &ac1z); // Obtencion de aceleracion
    piso
    sensorAzotea.getAcceleration(&ac2x, &ac2y, &ac2z); // Obtencion de
    aceleracion azotea
```

ANEXOS.

```
    ay_m_s2 = ac1y * (981/16384.0);           // Obtencion de valor real de
aceleracion piso
    ay_m_s22 = ac2y * (981/16384.0);        // Obtencion de valor real de
aceleracion azotea
    myPID.Compute();                         // Ejecucion de PID Piso
    myPID2.Compute();                       // Ejecucion de PID Azotea
    Serial.print(ay_m_s2+50);               // Impresion de valor de aceleracion
piso más ajuste
    Serial.print(",");                      // Separador de datos impresos
    Serial.println(ay_m_s22-73);           // Impresion de valor de aceleracion
Azotea más ajuste
    Serial.print(",");                      // Separador de datos impresos
    delay(deltaT);                          // delta t del ciclo (sismo)
}

Serial.print("En espera de 100 segundos para volver a comenzar");
delay(100000); // 100 segundos de espera hasta que comience nuevamente el ciclo
(sismo)
}

//--- Fin del programa ---
```

ANEXOS.

ANEXO B: PLANOS.

A continuación, se dan a conocer los planos de piezas que componen la mesa sísmica creadas en el *software* Autodesk Inventor.

PLATAFORMA

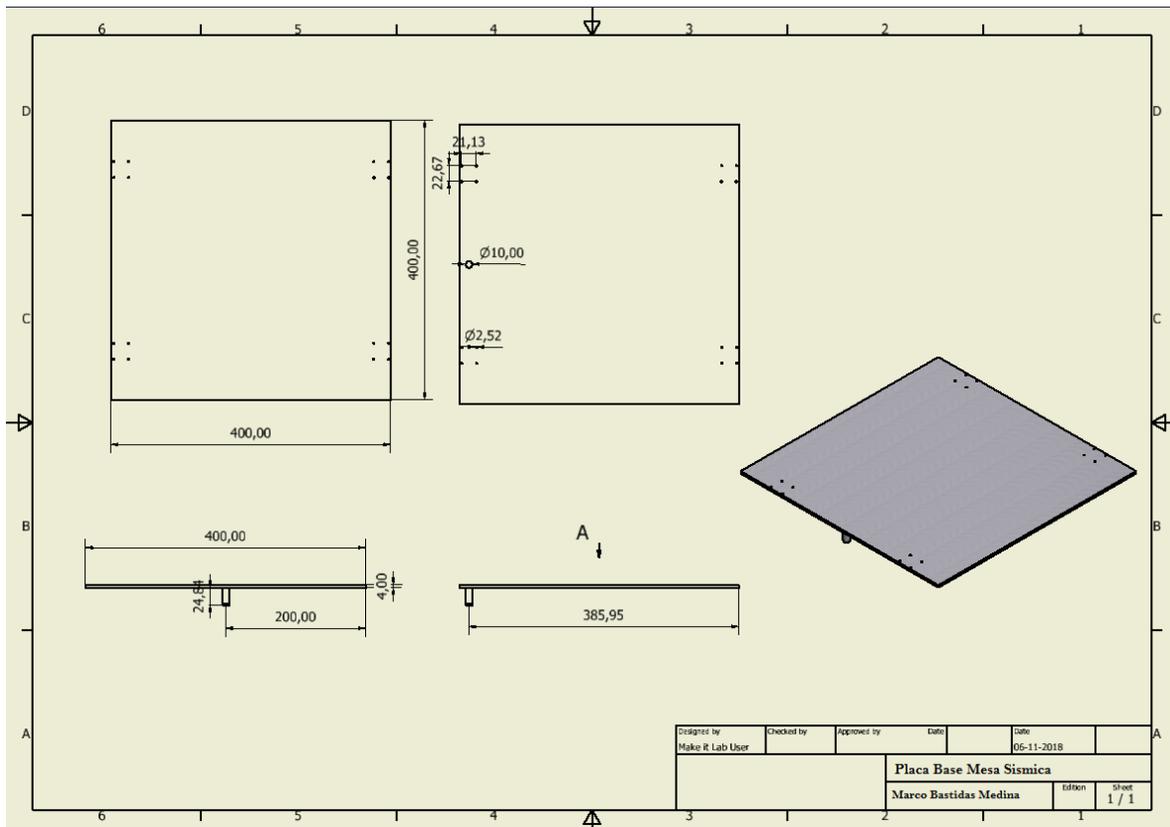


Ilustración B. 1: Plano plataforma mesa sísmica (Fuente: Elaboración propia).

RODAMIENTO LINEAL

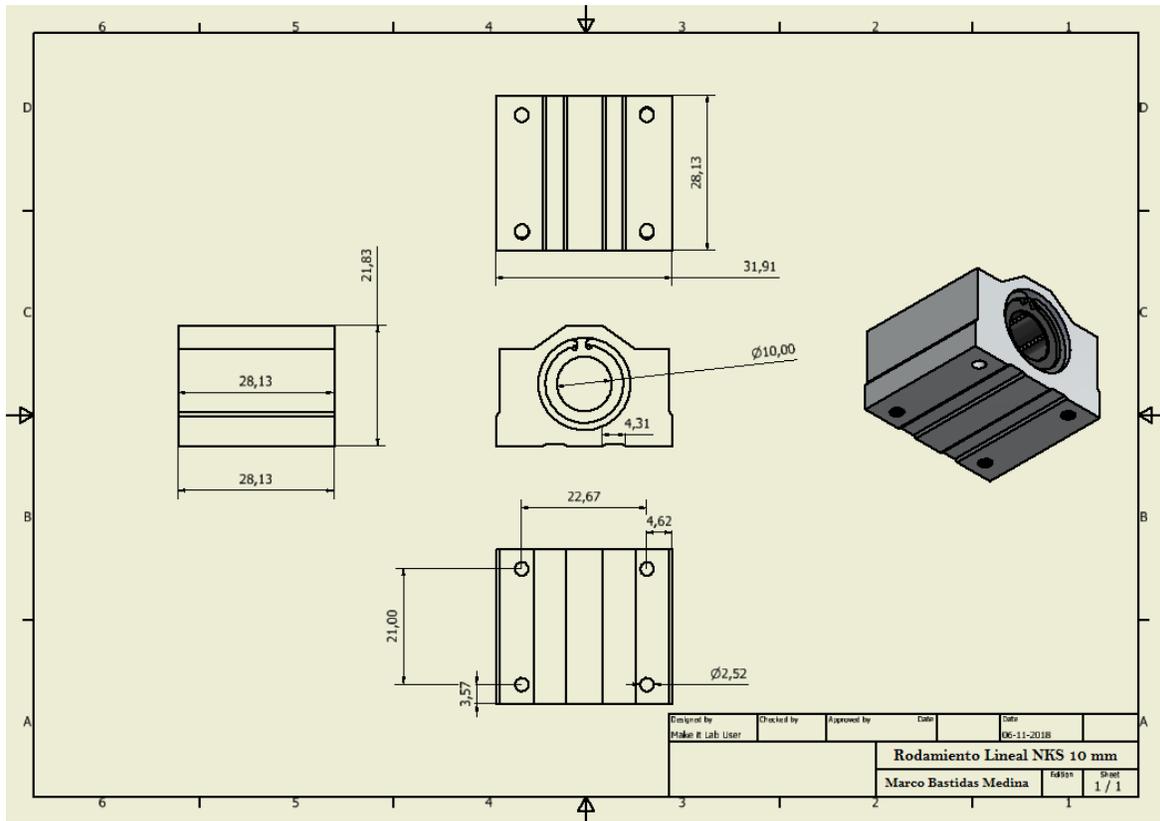


Ilustración B. 2: Plano Rodamiento lineal (Fuente: Elaboración propia).

ANEXOS.

ROTULA

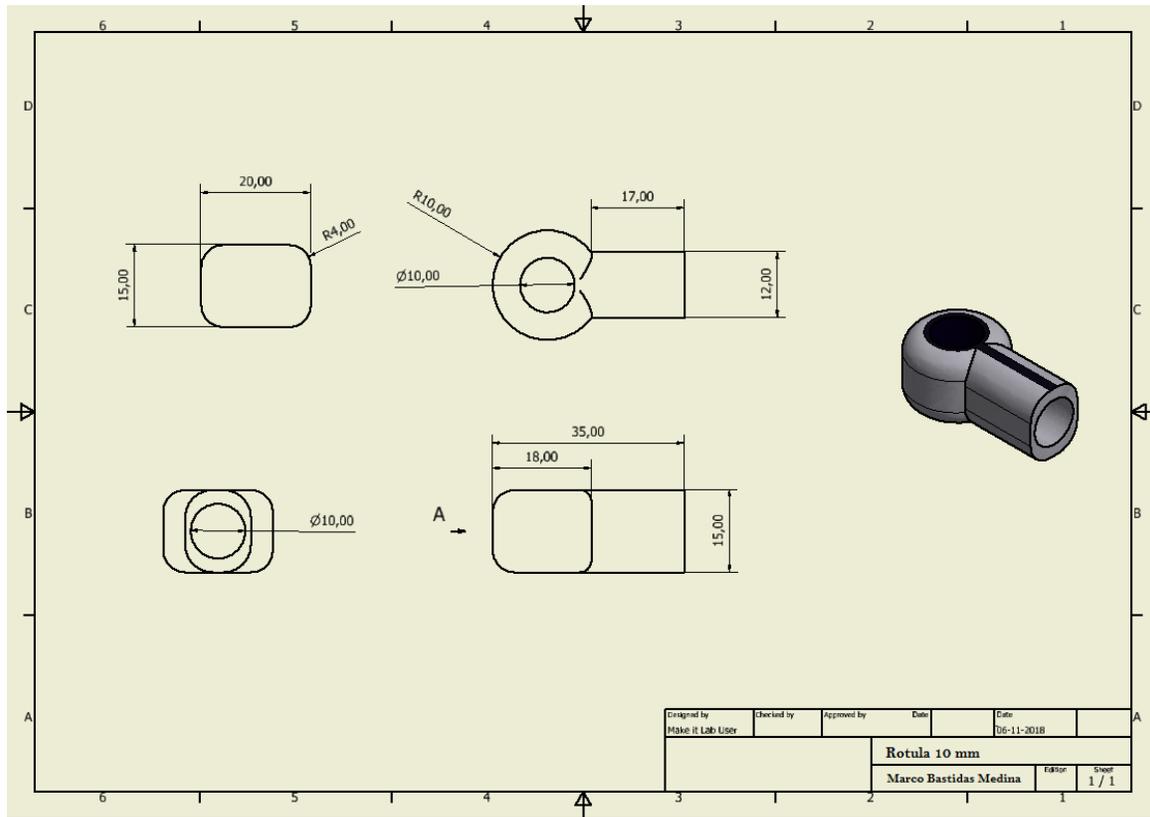


Ilustración B. 3: Plano rotula (Fuente: Elaboración propia).

ANEXOS.

SOPORTE EJE LINEAL

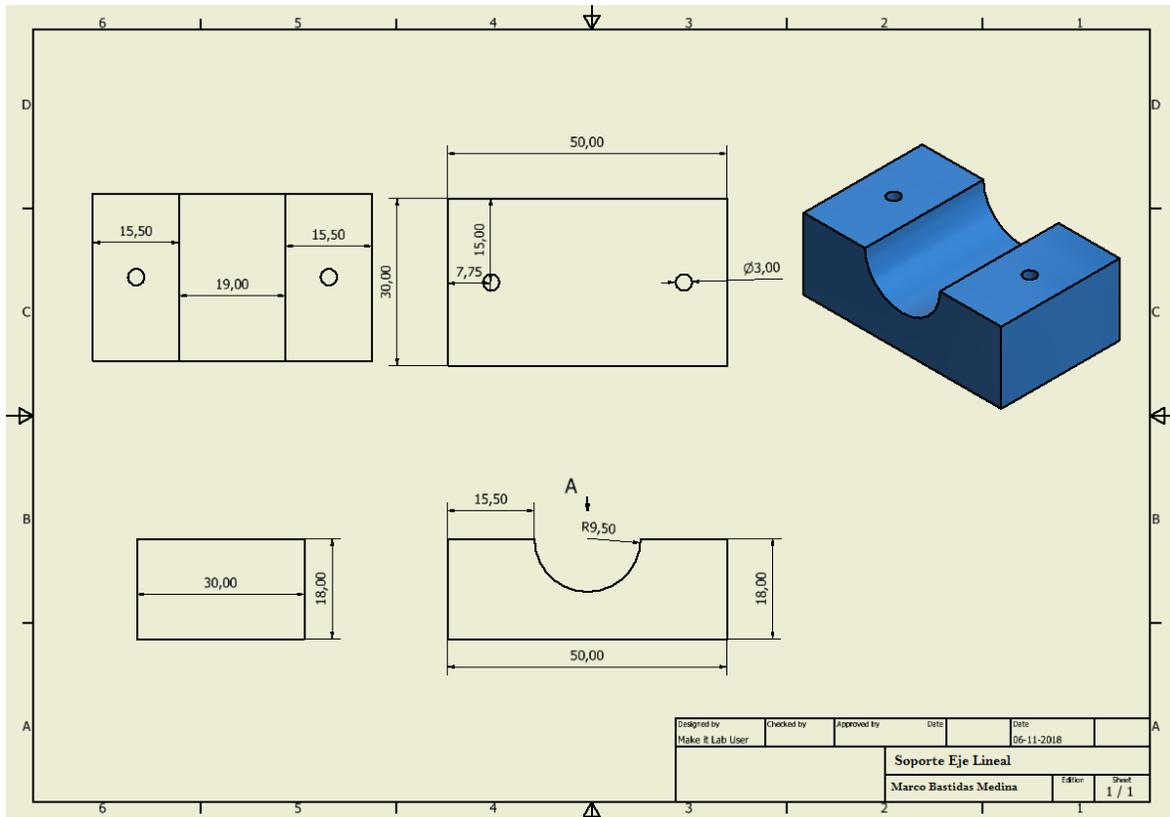


Ilustración B. 4: Plano soporte eje lineal (Fuente: Elaboración propia).

EJE LINEAL

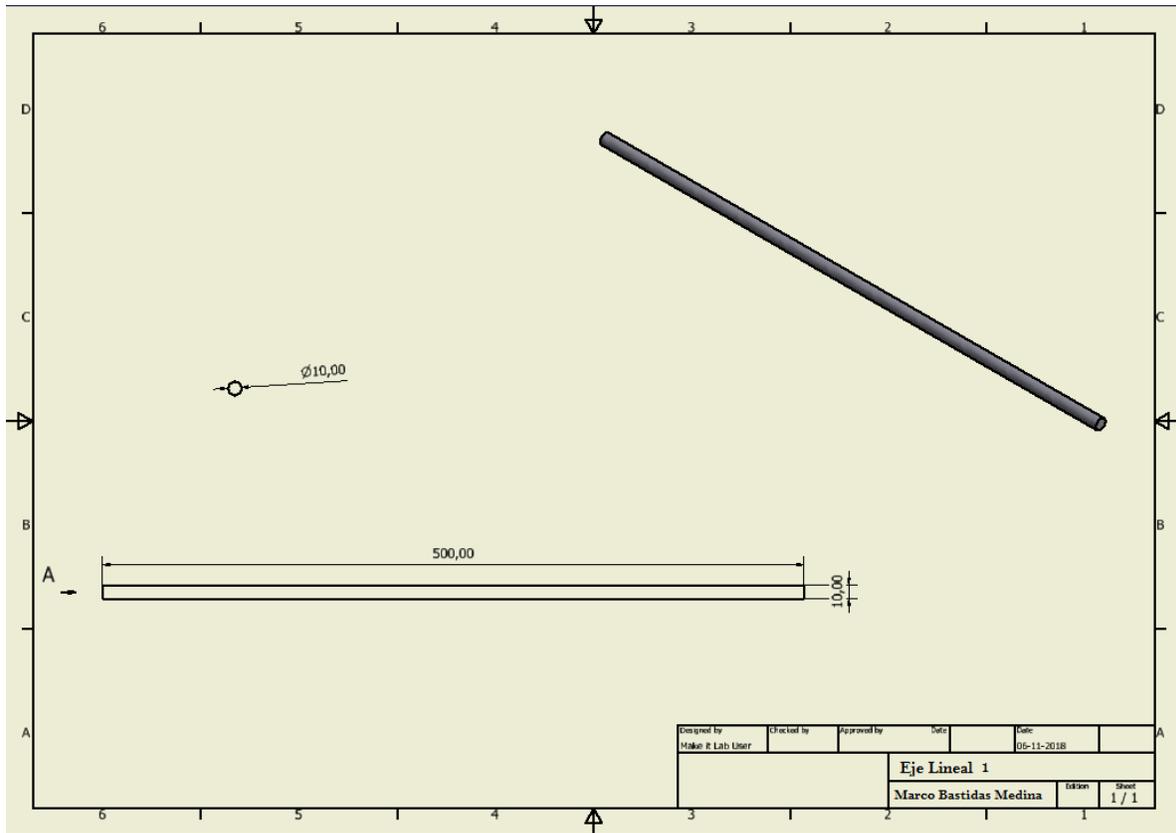


Ilustración B. 5: Plano eje lineal (Fuente: Elaboración propia).

SERVOMOTOR

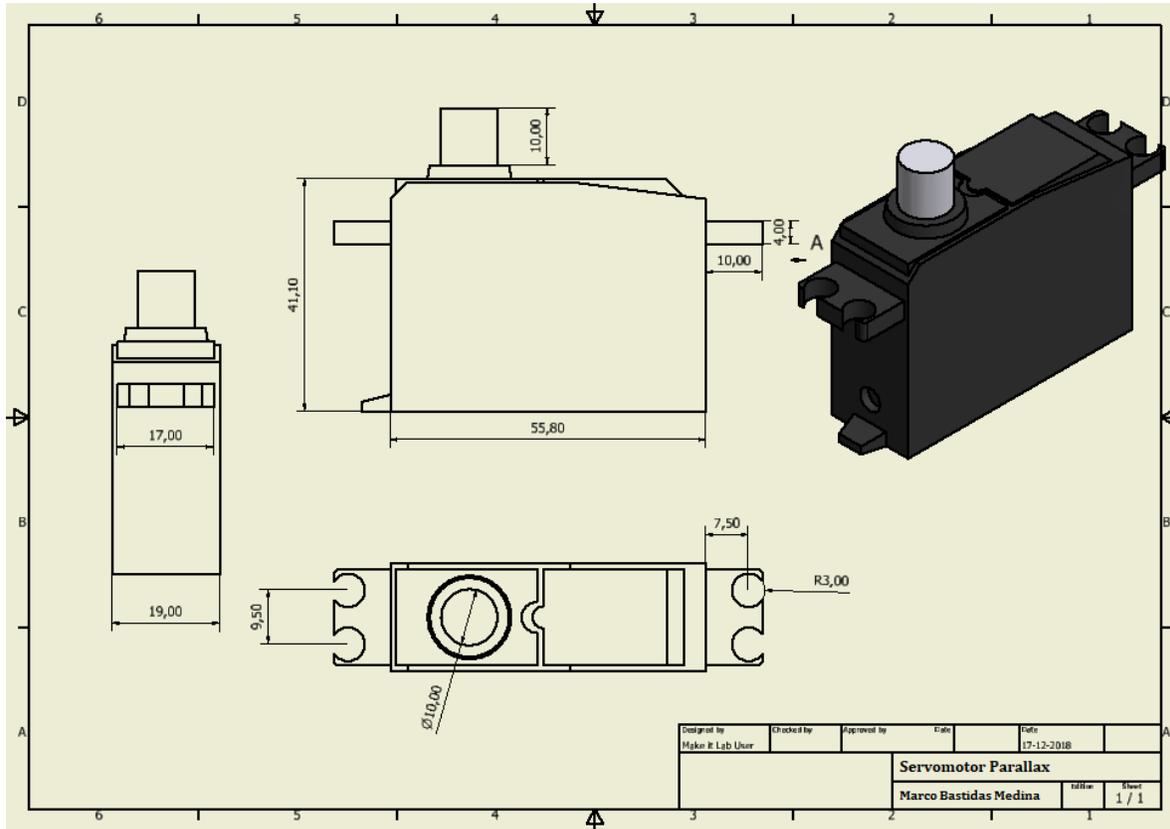


Ilustración B. 6: Plano servomotor (Fuente: Elaboración propia).

VARILLA ROSCADA

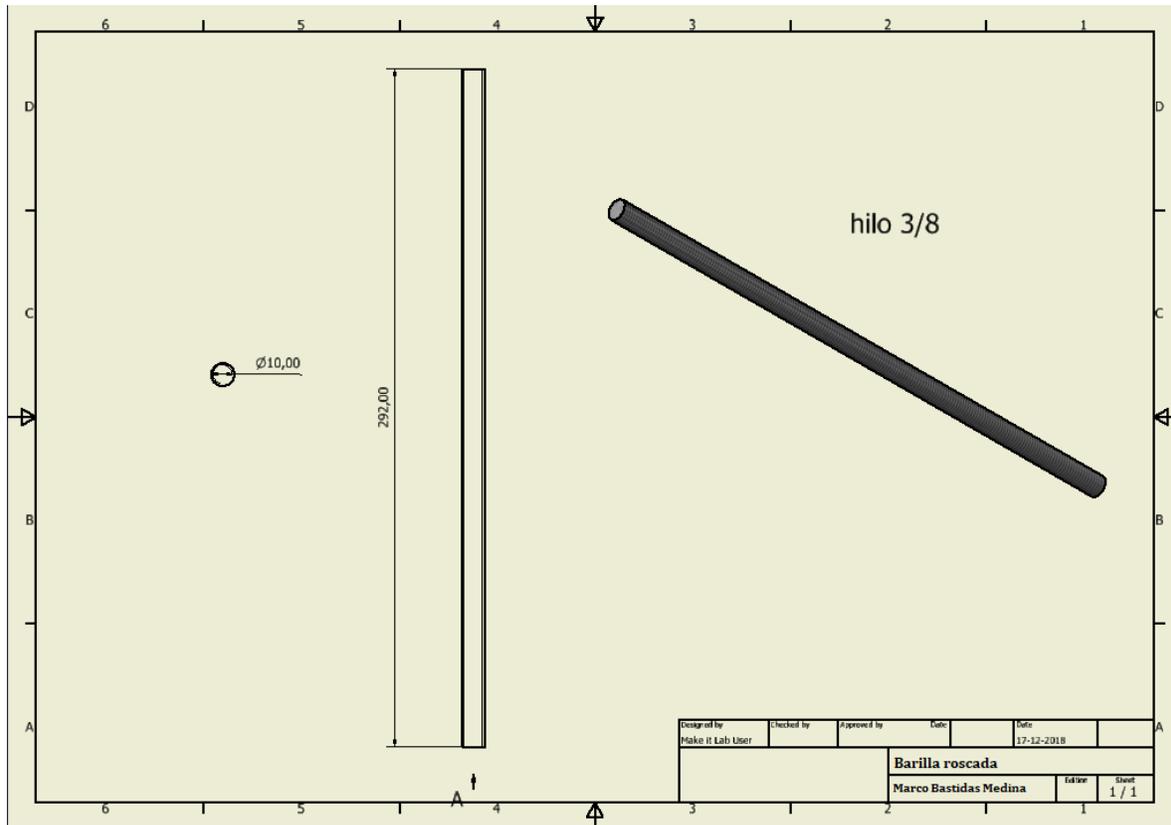


Ilustración B. 7: Plano varilla roscada (Fuente: Elaboración propia).

CAJON DE APOYO MESA SISMICA

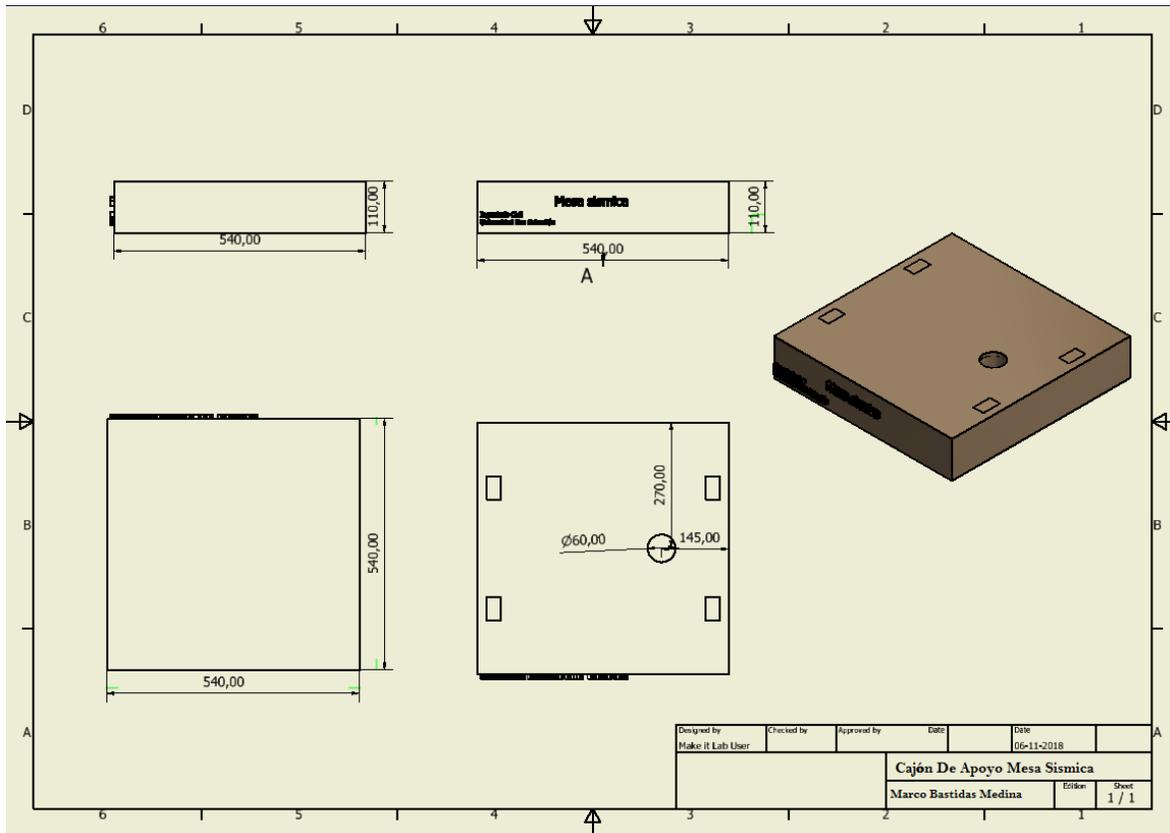


Ilustración B. 8: Plano cajón apoyo mesa sísmica (Fuente: Elaboración propia).

ANEXO C: COTIZACIÓN DE MATERIALES

| Mesa Sísmica | | | |
|---------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| Pieza | Cantidad | Precio Unitario | Precio Total |
| Rodamiento Lineal | 4 | \$ 12,000 | \$ 48,000 |
| Rotula | 2 | \$ 13,000 | \$ 26,000 |
| Placa Base | 1 | \$ 8,000 | \$ 8,000 |
| Soporte Eje Lineal | 4 | \$ 1,500 | \$ 6,000 |
| Placa apoyo eje lineal | 8 | \$ 300 | \$ 2,400 |
| Anillo Soporte Eje lineal | 4 | \$ 500 | \$ 2,000 |
| Eje lineal | 2 | \$ 15,000 | \$ 30,000 |
| Motor | 1 | \$ 7,900 | \$ 7,900 |
| Disco Excéntrico | 1 | \$ 2,000 | \$ 2,000 |
| Cajón | 1 | \$ 5,000 | \$ 5,000 |
| | | Sub total | \$ 137,300 |
| Sensores | | | |
| Pieza | Cantidad | Precio Unitario | Precio Total |
| Sensor Acelerómetro | 2 | \$ 3,800 | \$ 7,600 |
| Placa Arduino | 1 | \$ 7,900 | \$ 7,900 |
| | | Sub total | \$ 15,500 |
| | | TOTAL | \$ 152,800 |

Ilustración C.10: Cotización de materiales mesa sísmica (Fuente: Elaboración propia)

ANEXOS.

ANEXO D: IMÁGENES DEL PROTOTIPO

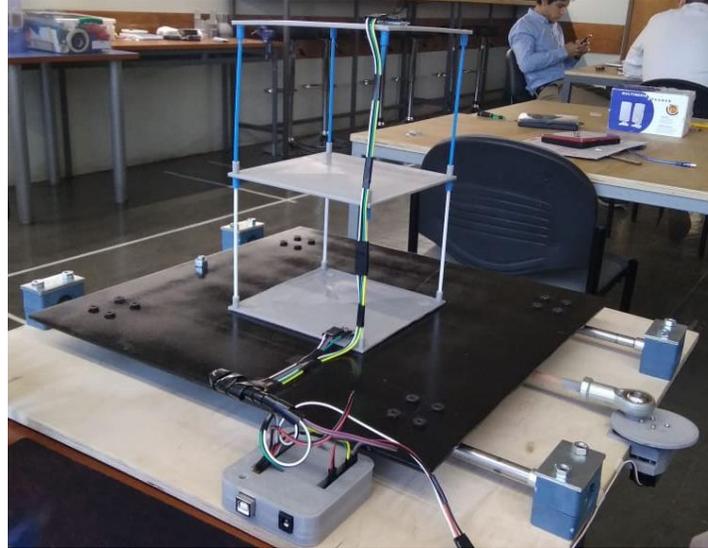


Ilustración D.1: Primer prototipo de prueba (Fuente: Elaboración propia).

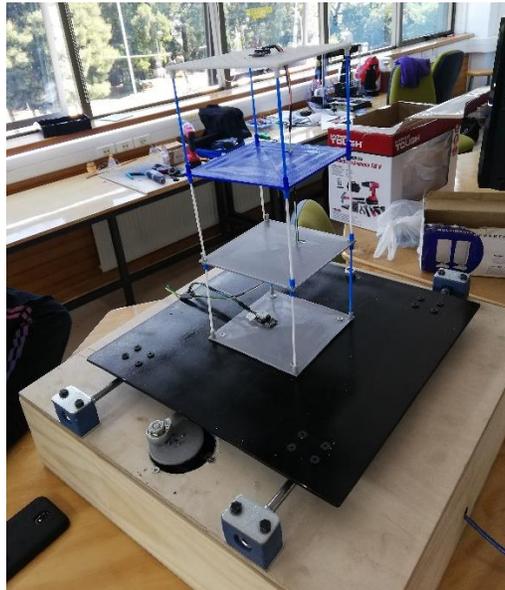


Ilustración D.2: Segundo prototipo de prueba (Fuente: Elaboración propia).

ANEXOS.

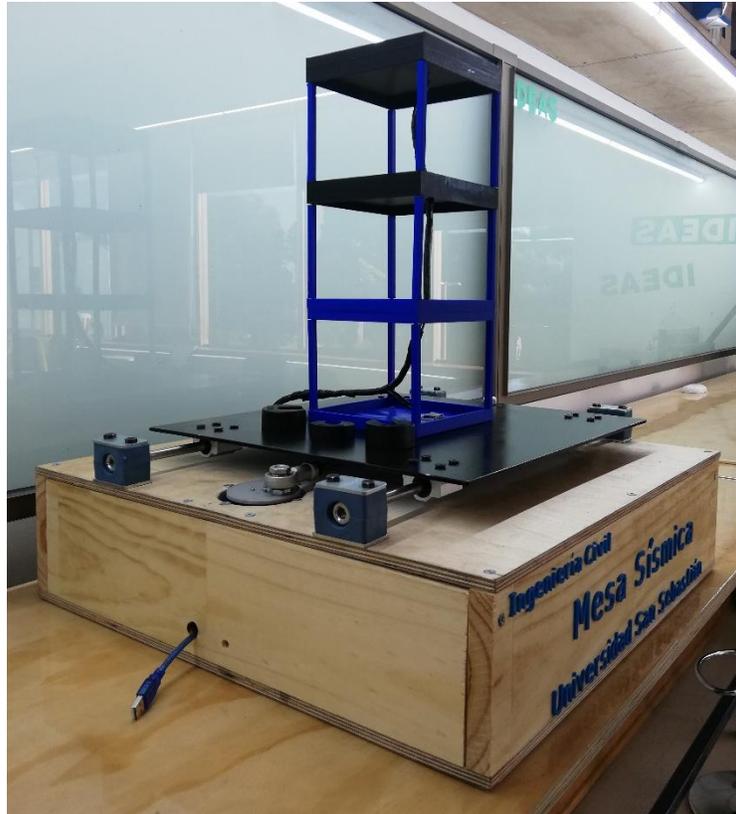


Ilustración D.3: Tercero y definitivo prototipo (Fuente: Elaboración propia).