


## CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Alonso Poveda Montoya, Ing. Ángel Navarro Mora, Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Mauricio Araya Rodríguez, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

WILLIAM  
ALONSO  
POVEDA  
MONTROYA

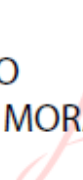


Firmado digitalmente  
por WILLIAM ALONSO  
POVEDA MONTROYA  
Fecha: 2020.08.21  
14:45:33 -06'00'

---

Ing. Alonso Poveda Montoya.  
En representación del Director

ANGEL  
HUMBERTO  
NAVARRO MORA  
(FIRMA)

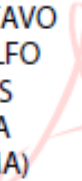


Firmado digitalmente por  
ANGEL HUMBERTO  
NAVARRO MORA (FIRMA)  
Fecha: 2020.08.21  
10:31:33 -06'00'

---

Ing. Ángel Navarro Mora.  
Profesor Guía

GUSTAVO  
ADOLFO  
ROJAS  
MOYA  
(FIRMA)



Firmado  
digitalmente por  
GUSTAVO  
ADOLFO ROJAS  
MOYA (FIRMA)  
Fecha: 2020.08.21  
12:05:19 -06'00'

---

Ing. Gustavo Rojas Moya.  
Profesor Lector

MAURICIO  
ESTEBAN ARAYA  
RODRIGUEZ  
(FIRMA)



Firmado digitalmente por  
MAURICIO ESTEBAN ARAYA  
RODRIGUEZ (FIRMA)  
Fecha: 2020.08.21 10:59:29 -06'00'

---

Ing. Mauricio Araya Rodríguez.  
Profesor Observador

# **Diseño, ensamblaje y validación de una mesa sísmica para el análisis estructural de modelos a escala reducida**

# Abstract

This project arises from the need to study the effects caused by seismic movements in structures. In this way, it was proposed as main objective the development of a shake table that allows the study of scale models of structures submitted to seismic forces. This is intended to provide support to the teachers to explain students, in a practical way, the phenomena experienced in a seismic movement.

The equipment is powered by a stepper motor which is controlled by means of an Arduino Mega, which receives data previously processed in MATLAB. It has the ability to reproduce different periods in simple harmonic movements with an error less than 5 % and several predetermined earthquakes, verified by response spectra.

In order to demonstrate concepts related to the structures behavior, it was analyzed the effects of table excitation on simple models. In addition, a graphical tool and an accelerometer were included to complement the operation and understanding of the equipment.

Of the most important mechanical characteristics, a permitted overload of 80 kg, a peak speed of 25 *mm/s*, given by the motor's capabilities, and a displacement of  $\pm 9$  cm stand out.

**Keywords:** Shake table, simple model, simple harmonic movement, earthquake.

# Resumen

El presente proyecto nace ante la necesidad de estudiar los efectos provocados por movimientos sísmicos en estructuras. De esa manera se planteó como objetivo principal el desarrollo de una mesa sísmica que permita el estudio de modelos de estructuras a escala sometidos a fuerzas sísmicas. Con ello se pretende cooperar con los profesores para que expliquen a los estudiantes, de manera práctica, los fenómenos experimentados ante un movimiento sísmico.

El equipo es accionado con un motor a pasos que es controlado por medio de un Arduino Mega, el cuál recibe datos previamente tratados en MATLAB. Se tiene la capacidad de reproducir distintos períodos en movimientos armónicos simples con un error menor a 5 % y varios sismos predeterminados, comprobados mediante espectros de respuesta.

Para demostrar conceptos relacionados al comportamiento de las estructuras se analizaron los efectos que provoca la excitación de la mesa sobre modelos simples. Además, se incluyó una herramienta gráfica y un acelerómetro para complementar el funcionamiento y comprensión del equipo. Entre las características mecánicas más importantes se resalta una sobrecarga permitida de 80 kg, una velocidad pico de 25 *mm/s*, dadas por las capacidades del motor, además de un desplazamiento de  $\pm 9$  cm.

**Palabras claves:** Mesa sísmica, modelo simple, movimiento armónico simple, sismo.

# **Diseño, ensamblaje y validación de una mesa sísmica para el análisis estructural de modelos a escala reducida**

JONATHAN ÁVILA VALERIO  
ABIGAIL ZÚÑIGA CAMPOS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

**Julio del 2020**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN**



# Índice

<b>Índice de figuras</b>	<b>2</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>6</b>
<b>Resumen Ejecutivo</b>	<b>8</b>
<b>Introducción</b>	<b>11</b>
<b>Antecedentes</b>	<b>13</b>
<b>Objetivos</b>	<b>15</b>
<b>Alcances y limitaciones</b>	<b>16</b>
<b>Marco teórico</b>	<b>17</b>
<b>Metodología</b>	<b>34</b>
<b>Resultados</b>	<b>42</b>
<b>Análisis de los resultados</b>	<b>77</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>86</b>
<b>Recomendaciones</b>	<b>87</b>
<b>Apéndices</b>	<b>92</b>
<b>Anexos</b>	<b>131</b>

# Índice de figuras

1.	Modelo de Tectonic (producto final construido) . . . . .	9
2.	Gráfica $x(t)$ en movimiento armónico simple . . . . .	17
3.	Gráfica $v(t)$ en movimiento armónico simple . . . . .	18
4.	Gráfica $a(t)$ en movimiento armónico simple . . . . .	18
5.	Propagación de onda P . . . . .	20
6.	Propagación de onda S . . . . .	20
7.	Propagación de onda R . . . . .	21
8.	Propagación de onda L . . . . .	21
9.	Grados de la escala Mercalli modificada . . . . .	22
10.	Escala JMA de intensidades sísmica . . . . .	22
11.	Ejemplo de acelerograma. . . . .	25
12.	Ejemplo de un espectro elástico de aceleración espectral . . . . .	26
13.	Ejemplo de espectro inelástico de ductilidad, se consideran diferentes ductilidades. . . . .	27
14.	Ejemplo de un espectro de diseño de pseudo-aceleración normalizada. . . . .	27
15.	Ejemplo de pulso eléctrico . . . . .	33
16.	Arduino Mega 2560 . . . . .	33
17.	Diagrama de flujo de la metodología . . . . .	34
18.	Archivo con extensión .lis . . . . .	36
19.	Aceleración con datos LIS y su simplificación . . . . .	42
20.	Errores de integración presentes en velocidad y desplazamiento. . . . .	44
21.	Representación de aceleración, velocidad y desplazamiento. (Cinchona, 2009) . . . . .	45
22.	Componentes del cuerpo principal de la mesa . . . . .	49
23.	Contenedor de componentes electrónicos . . . . .	50
24.	Función convertidora de velocidad a micropulsos electrónicos. . . . .	51
25.	Período de 3s sin calibrar . . . . .	52
26.	Desfase calibrado en el MAS de 3s . . . . .	53
27.	Error de desplazamiento en Cinchona (2009) . . . . .	54
28.	Error de velocidad en Cinchona (2009) . . . . .	54
29.	Error de aceleración en Cinchona (2009) . . . . .	55
30.	Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo de Cinchona (2009) . . . . .	55
31.	Espectro de respuesta de aceleración del sismo de Cinchona (2009) . . . . .	56
32.	Visualización general de fenómenos observados en las pruebas . . . . .	57
33.	Modelo simple 1 . . . . .	57
34.	Período de la barra de 15 cm . . . . .	58
35.	Período de la barra de 30 cm . . . . .	59
36.	Período de la barra de 45 cm . . . . .	59
37.	Movimiento inducido en modelo de 15 cm. . . . .	60
38.	Movimiento inducido en modelo de 30 cm. . . . .	61
39.	Movimiento inducido en modelo de 45 cm. . . . .	61

40.	Modelo simple 2 . . . . .	62
41.	Período del marco esbelto, sin sobrecarga . . . . .	63
42.	Período del marco esbelto, con sobrecarga . . . . .	64
43.	Período del marco de edificio de dos pisos, sin sobrecarga . . . . .	64
44.	Período del marco de edificio de dos pisos, con sobrecarga . . . . .	65
45.	Movimiento inducido en modelo esbelto, sin sobrecarga. . . . .	65
46.	Movimiento inducido en modelo de dos pisos, sin sobrecarga. . . . .	66
47.	Movimiento inducido en modelo esbelto, con sobrecarga. . . . .	66
48.	Movimiento inducido en modelo de dos pisos, con sobrecarga. . . . .	67
49.	Modelo simple 3 . . . . .	68
50.	Período del modelo con el peso colocado en dos esquinas opuestas . . . . .	69
51.	Período del modelo con el peso colocado en una sola esquina . . . . .	69
52.	Movimiento inducido en modelo con peso igual en dos esquinas. . . . .	70
53.	Movimiento inducido en modelo con peso en una sola esquina. . . . .	70
54.	Modelo simple 4 . . . . .	71
55.	Movimiento inducido en modelo de edificio . . . . .	72
56.	Sensor utilizado para el acelerómetro . . . . .	73
57.	Vista general de la herramienta gráfica. . . . .	73
58.	Acelerograma generado a partir de los datos de aceleración del sensor instalado	74
59.	Aceleración, velocidad y desplazamiento según datos obtenidos del sensor. . . .	74
60.	Comparación entre datos de aceleración medidos e ideal . . . . .	75
61.	Comparación entre datos luego de ejecutar un filtro del rango (0,1-20 Hz) . . . .	75
62.	Espectro de respuesta de aceleración sin filtro aplicado . . . . .	76
63.	Espectro de respuesta de aceleración con filtro de rango (0,1-20) Hz . . . . .	76
1.	Diagrama de momentos . . . . .	94
2.	Deformaciones en la placa. . . . .	94
3.	Modelo con cargas aplicadas y reacciones axiales de los elementos . . . . .	96
4.	Modelo con momentos en los elementos . . . . .	96
5.	Representación de la mesa con cargas y medidas . . . . .	101
6.	Representación de la mesa con nuevos refuerzos . . . . .	104
7.	Representación de la mesa con su período natural final . . . . .	104
8.	Desfase calibrado en el MAS de 0,05s . . . . .	106
9.	Desfase calibrado en el MAS de 0,1s . . . . .	106
10.	Desfase calibrado en el MAS de 0,2s . . . . .	107
11.	Desfase calibrado en el MAS de 0,3s . . . . .	107
12.	Desfase calibrado en el MAS de 0,4s . . . . .	108
13.	Desfase calibrado en el MAS de 0,5s . . . . .	108
14.	Desfase calibrado en el MAS de 0,6s . . . . .	109
15.	Desfase calibrado en el MAS de 0,7s . . . . .	109
16.	Desfase calibrado en el MAS de 0,8s . . . . .	110
17.	Desfase calibrado en el MAS de 0,9s . . . . .	110
18.	Desfase calibrado en el MAS de 1s . . . . .	111
19.	Desfase calibrado en el MAS de 1.5s . . . . .	111

20.	Desfase calibrado en el MAS de 2s . . . . .	112
21.	Desfase calibrado en el MAS de 2.5s . . . . .	112
22.	Comportamiento del sismo de Alajuela (1990) a través del tiempo . . . . .	113
23.	Error de desplazamiento en Alajuela (1990) . . . . .	113
24.	Comparación de espectros de respuesta desplazamiento del sismo de Alajuela (1990) . . . . .	114
25.	Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Alajuela (1990) . . . . .	114
26.	Comportamiento del sismo de Armuelles (2003) a través del tiempo . . . . .	115
27.	Error de desplazamiento en Armuelles (2003) . . . . .	115
28.	Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Armuelles (2003) . . . . .	116
29.	Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Armuelles (2003) . . . . .	116
30.	Comportamiento del sismo de Cóbano (1990) a través del tiempo . . . . .	117
31.	Error de desplazamiento en Cóbano (1990) . . . . .	117
32.	Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Cóbano (1990) . . . . .	118
33.	Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Cóbano (1990)	118
34.	Comportamiento del sismo de Damas (2004) a través del tiempo . . . . .	119
35.	Error de desplazamiento en Damas (2004) . . . . .	119
36.	Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Damas (2004) . . . . .	120
37.	Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Damas (2004)	120
38.	Comportamiento del sismo de Dominical (1999) a través del tiempo . . . . .	121
39.	Error de desplazamiento en Dominical (1999) . . . . .	121
40.	Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Dominical (1999) . . . . .	122
41.	Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Dominical (1999) . . . . .	122
42.	Comportamiento del sismo de Jacó (2017) a través del tiempo . . . . .	123
43.	Error de desplazamiento en Jacó (2017) . . . . .	123
44.	Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Jacó (2017) . . . . .	124
45.	Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Jacó (2017)	124
46.	Comportamiento del sismo de Limón (1991) a través del tiempo . . . . .	125
47.	Error de desplazamiento en Limón (1991) . . . . .	125
48.	Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Limón (1991) . . . . .	126
49.	Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Limón (1991)	126
50.	Comportamiento del sismo de Nicoya (2012) a través del tiempo . . . . .	127
51.	Error de desplazamiento en Nicoya (2012) . . . . .	127

52.	Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Nicoya (2012) . . . . .	128
53.	Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Nicoya (2012)	128
1.	Cuerva de eficiencia del motor, según fabricante OMC Corporation Limited. . .	131

# Índice de cuadros

1.	Comparación entre especificaciones de distintas mesas sísmicas . . . . .	14
2.	Registro de sismos históricos de Costa Rica . . . . .	23
3.	Parámetros físicos para el funcionamiento de la mesa . . . . .	29
4.	Factores de escala geométricos típicos . . . . .	32
5.	Aspectos considerados. . . . .	46
6.	Plantilla de evaluación . . . . .	47
7.	Porcentaje para cada una de los parámetros . . . . .	47
8.	Evaluación de alternativas . . . . .	47
9.	Componentes principales de la mesa sísmica . . . . .	48
10.	Función de los componentes principales de la mesa sísmica . . . . .	49
11.	Características mecánicas de la mesa construida . . . . .	50
12.	Selección de amplitud máxima para tres movimientos armónicos . . . . .	51
13.	Resumen de error asociado a períodos fundamentales reproducidos . . . . .	53
14.	Resumen de movimientos observados en el modelo 1 . . . . .	62
15.	Resumen de movimientos observados en el modelo 2 . . . . .	68
16.	Resumen de movimientos observados en el modelo 3 . . . . .	71
17.	Resumen de movimientos observados en el modelo 4 . . . . .	72
1.	Parámetros generales de la columna 4 . . . . .	98
2.	Datos generales de la sección . . . . .	98
3.	Resultados de resistencia básica . . . . .	98
4.	Propiedades de la sección de la estructura . . . . .	101
5.	Cargas a las que se somete la estructura . . . . .	102
6.	Costo de materiales utilizados en el proyecto . . . . .	129
7.	Costo de mano de obra del proyecto . . . . .	130
8.	Costo total de la construcción de la mesa sísmica . . . . .	130

# Agradecimientos

Son muchos los involucrados en el proceso de este proyecto. Primeramente, queremos agradecer a nuestro profesor guía, el ingeniero Ángel Navarro Mora por su acompañamiento, comprensión y palabras alentadoras. También, agradecemos al director de carrera, el ingeniero Gustavo Rojas Moya, por la confianza otorgada para el desarrollo de este proyecto.

Por otro lado, valoramos el apoyo incondicional de Julián Barquero Jiménez, como asistente en el área mecánica y eléctrica.

Jonathan y Abigail

Agradezco a Dios por el hecho de haberme enviado a este viaje que culmina con este proyecto. Estoy en deuda por el esfuerzo y sacrificio hecho a lo largo de los años por mi padre y mi madre para permitirme estudiar de la manera más tranquila posible. Apreciaré siempre sus consejos, sus palabras de aliento y su permanente preocupación por mí. Atribuyo a mi hermano menor el ser mi fuente de motivación para concluir todo lo comenzado y realizarlo de la mejor manera, para poder inculcarle que lo hecho a conciencia tendrá un mérito personal. Finalmente, doy gracias a mis amigos por su compañía a través del tiempo.

Jonathan Ávila Valerio

Primero que todo, quiero agradecerle a Dios por darme la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa institución y permitirme mi desarrollo como persona en distintas áreas de mi vida. Reconozco especialmente el apoyo y los sacrificios que, con mucho amor, hicieron mis padres y hermanos para darme la mejor herencia que pudieron brindarme. Este logro es tanto mío como suyo.

También, doy gracias a mi madrina, a los demás miembros de mi familia, y a mi mejor amiga por estar siempre presentes y manifestarme el apoyo moral necesario para salir adelante.

En el camino recorrido en los últimos cinco años, mis amigos se han convertido en los más importantes de mi vida, gracias a su presencia en distintas épocas de la carrera. Sin duda puedo considerarlos como una segunda familia.

Por último, quiero agradecer al equipo de Taekwondo del TEC, por darme la oportunidad de descubrir un nuevo estilo de vida y una fuente de apoyo.

Abigail Zúñiga Campos

# Resumen Ejecutivo

Los movimientos sísmicos pueden ocurrir en cualquier momento, sin esperarse, inclusive se pueden presentar vibraciones provenientes de fuentes externas que afecten la integridad de las estructuras.

Con el propósito de fortalecer el estudio de eventos fortuitos y sus consecuencias nacen estudios físicos para observar el comportamiento de estructuras a escala ante la presencia de cierta excitación. Entre ellos se puede mencionar la mesa sísmica.

Ante lo mencionado surgió la iniciativa de construir una mesa sísmica capaz de reproducir distintos movimientos. Este proyecto es de gran importancia a la Escuela de Ingeniería en Construcción al brindar un producto que puede ser utilizado tanto por los estudiantes como por los profesores, como apoyo para comprender fenómenos presentados por distintas estructuras, a su vez, se puede relacionar con la gestión del riesgo antes de la construcción.

Una de las ventajas del proyecto es que promueve la aplicación de varias áreas interdisciplinarias, entre ellas la de construcción encargada del tratamiento de los sismos; y la respuesta que presentan modelos ante vibraciones inducidas. Se destaca el área mecánica para escoger el mecanismo adecuado para el funcionamiento del equipo. Asimismo el área electrónica y de computación para lograr el control de los movimientos y el procesamiento de datos de una manera acertada.

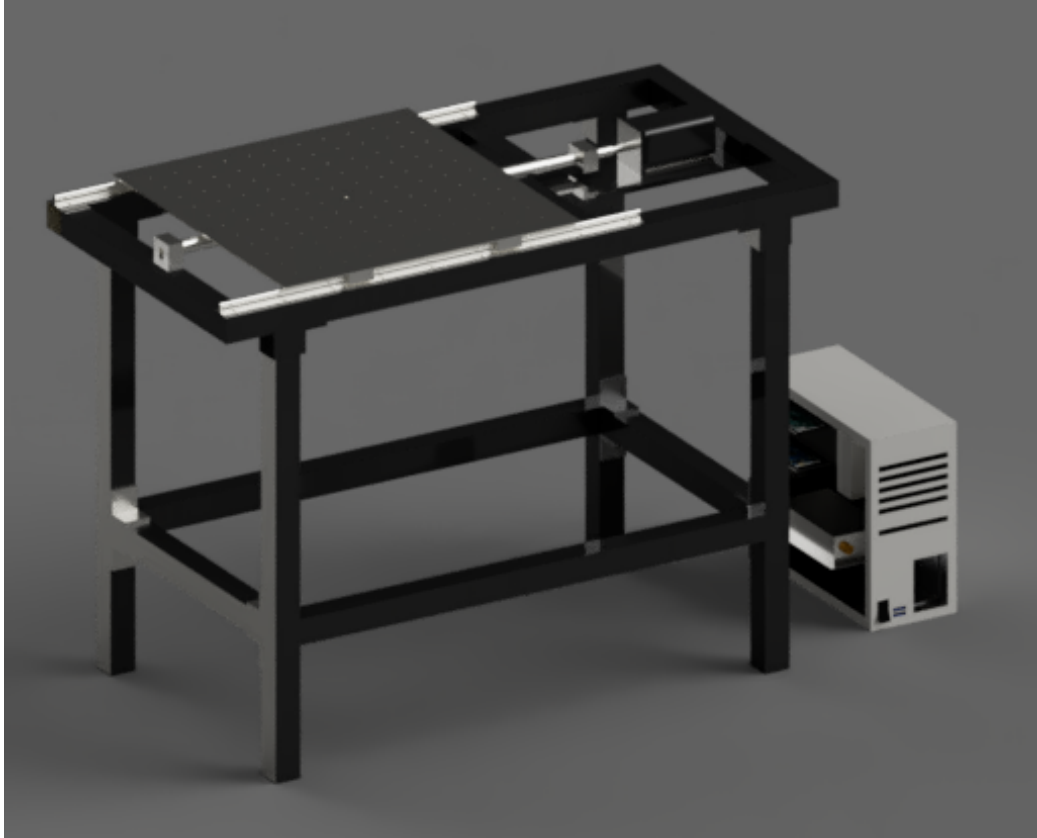
Como objetivo del proyecto se pretendió investigar los requerimientos necesarios para el funcionamiento de una mesa sísmica, tal como los establecidos por el Consorcio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas (UCIST, por sus siglas en inglés). Además, se investigó como reproducir los parámetros característicos de un movimiento sísmico.

Por otra parte, se realizaron medidas para determinar el tiempo que tarda el motor en reproducir cierta cantidad de pasos y con ello determinar una función para convertir la velocidad en pulsos electrónicos, con el fin de obtener los puntos necesarios para la reproducción de sismos y de movimientos armónicos simples.

Finalmente, se propuso el análisis del comportamiento de estructuras simples ante la acción efectuada por la plataforma sísmica, una vez que se encontrará en estado funcional.

Como objetivo general del proyecto se planteó el desarrollo de una mesa sísmica que permita el estudio de modelos de estructuras a escala sometidos a fuerzas sísmicas. Con ello da origen Tectonic, el producto final desarrollado para la escuela.





**Figura 1.** Modelo de Tectonic (producto final construido)  
Fuente: Autoría propia, Fusion 360.

Entre las características más importantes del producto desarrollado se puede mencionar su capacidad de carga, la cuál es de 80 kg. Además es capaz de reproducir una velocidad de 25 mm/s recorriendo una distancia de  $\pm 9$  cm. Esto en un total de 15 movimientos armónicos simples con distintos períodos que se encuentran en el rango de 0,05 s y 3,0 s; también cuenta, de manera predeterminada, con nueve sismos históricos ocurridos en Costa Rica.

El costo para construir la mesa sísmica, con las características ya mencionadas es de aproximadamente 768.000,00 CRC, es importante señalar que que los componentes mecánicos fueron importados y dicho costo corresponde aproximadamente un 1/6 del monto ya especificado.

Para verificar la correcta reproducción de los movimientos se obtuvieron los datos reales registrados por el motor tras la reproducción y se compararon con los datos teóricos con el fin de obtener un error menor al 5%. En el caso de los sismos se obtienen los espectros de respuesta del sismo reproducido y el real para verificar su similitud, con la salvedad de que inclusive la duración del movimiento puede modificar el resultado final obtenido.

Cabe destacar que los errores presentados en el resultado de los movimientos reproducidos tienen que ver con la transformación de datos a pulsos electrónicos generados a nivel

computadora. También, los errores matemáticos inducidos pueden atribuirse a los tratamientos realizados a los datos para cumplir con la capacidad del arduino y del motor.

Entre las herramientas utilizadas en el desarrollo de este proyecto se destaca MATLAB, el IDE de Arduino y Python 3.8 para el procesamiento de datos y la programación de todos los movimientos. También se utiliza Fusion360 de la familia Autodesk para el modelado de distintos elementos antes de su construcción.

El material más importante en la construcción de la mesa sísmica fue el acero A36 como parte de los perfiles estructurales que conforman el cuerpo principal, la plataforma deslizante y la placa que soporta el motor. Se utilizaron distintos métodos de unión como soldadura y tornillos pasantes y con rosca. Además, se utilizó un case de computadora restaurado para colocar los componentes electrónicos. En cuanto a los modelos estructurales, que también fueron construidos manualmente, se utilizaron barras roscadas de acero inoxidable, MDF y tubos de PVC, además de placas de acero de distintos espesores como sobrecargas.

Por último y con referencia a los modelos simples estudiados se logró comprobar que cuando se incrementa la rigidez en función de la longitud del modelo, mientras se mantiene la masa, aumenta también su período natural. A su vez, agregarle peso aumenta su período, siempre y cuando se mantenga la misma rigidez. Además, cuando se concentra una carga en la esquina de un marco en tres dimensiones se genera torsión en el sentido del movimiento inducido.

# Introducción

Costa Rica es un país de alta sismicidad, ya que, al estar ubicado en línea con el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde históricamente los países que allí se encuentran han sufrido graves accidentes sísmicos de distintas intensidades debido a la subducción de placas tectónicas. Nuestro país se encuentra bajo la influencia de cuatro de ellas: Coco, Caribe, Nazca y la microplaca de Panamá (Climent et al.,2008). Cuando la placa Coco se subduce bajo la Caribe a lo largo del litoral Pacífico la energía elástica se concentra en distintos puntos en forma de energía potencial y al superar el límite que las rocas pueden almacenar, se libera dicha energía en forma de calor y ondas sísmicas que llegan a la superficie y causan daños en las estructuras y/o elementos que allí se encuentren.

Además de los movimientos provocados por las placas, también hay otros originados por fallas locales que están distribuidos a lo largo del país. De acuerdo con un mapa de fallas activas de la Red Sismológica Nacional, en Costa Rica se registran 88. La magnitud del sismo viene dada por el tamaño de la placa que la provoca, por eso, técnicamente son mayores aquellos provocados por las placas, sin embargo, al estar las fallas locales más cercanas a los centros urbanos podrían llegar a ser causantes de aún más daño.(Red Sismológica Nacional, 2019b)

El estudio del comportamiento de las estructuras se torna complejo, ya que en estas no solo interfieren las cargas permanentes y las cargas temporales que van a soportar, sino que se debe incluir la influencia de fuerzas externas naturales, como lo son el viento y los sismos; para poder garantizar la seguridad de los usuarios y en algunos casos la integridad de la misma estructura. Cabe destacar que estas interacciones externas son imprevisibles por lo que no se puede verificar con certeza como se comportará la estructura a lo largo de su vida útil o si incluso esta se verá afectada por alguna excitación en su período de servicio.

A raíz de lo mencionado surge la creación de una mesa sísmica como parte de una de las alternativas para observar el comportamiento de estructuras a escala de manera física y no solamente mediante un software; al observar un efecto real y no virtual. Con ello se pretende la contribución con el proceso de aprendizaje de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería en Construcción, en el ámbito estructural de tal manera que cuenten con un dispositivo capaz de causar una excitación en la base de modelos que se deseen poner a prueba, distintas finalidades, y así observar su reacción.

De esta manera se procedió con la construcción de una plataforma sísmica, llamada Tectonic, capaz de reproducir 15 períodos distintos en forma de movimiento armónico simple, además de la reproducción de algunos de los sísmicos que se han sido registrados en el país.

Para poder llegar al producto final que se pretende lograr con este proyecto fue necesario abordar tres fases de estudio. El primero relacionado a los movimientos que se deben reproducir

y cómo hacerlo, además de los requisitos que se deben cumplir. El segundo se relaciona con la construcción y programación de su funcionamiento. Por último, el tercer eje aborda el estudio de conceptos relacionados a estructuras por medio de pruebas cualitativas aplicadas a modelos simples.

En relación con lo mencionado previamente, como parte de la primera fase de estudio, deben definirse los períodos y las amplitudes de acuerdo con los criterios establecidos por el Consorcio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas (UCIST) con un código efectuado en MATLAB. De acuerdo con el tratamiento de acelerogramas a partir de los registros sísmicos adquiridos a través de la plataforma de Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica, se obtiene la velocidad y los desplazamientos por medio de integración numérica.

Como parte de la segunda fase temática, Tectonic es controlado por un motor a pasos el cual recibe señales de su controlador, que a su vez los recibe de un microcontrolador Arduino MEGA 2560 que convierte los datos de cada movimiento a pulsos eléctricos. Esto a través de una función empírica que convierte la velocidad a micropulsos electrónicos; sabiendo la capacidad máxima del equipo utilizado.

Se extrajo de la memoria de Arduino los datos que fueron reproducidos por el motor en cada movimiento para compararlos con el movimiento teórico y realizar un ajuste en caso de ser necesario; esto para los movimientos armónicos simples. En el caso de los sismos se comprobaron con sus respectivos espectros de respuesta.

Con respecto a la tercer fase de estudio, una mesa sísmica puede ser utilizada para demostrar conceptos relacionados al comportamiento de las estructuras, es por ello que se analizan los efectos que provoca la excitación de la mesa sobre modelos simples con relación al período y como cambia este al variar la altura, la rigidez, el peso y la ubicación de las cargas aplicadas.

En pro de mejorar el sistema construido se agrega un acelerómetro capaz de tomar mediciones en tiempo real (de la plataforma o del modelo, sea cuál sea la base donde se coloque), mostrar una visualización gráfica del movimiento y posteriormente descargar los datos reproducidos, si así se desea. Este aparato es capaz de medir al mismo tiempo, el desplazamiento en los tres ejes, además de las torsiones generadas en los ejes principales, como un giroscopio. Esto es posible visibilizarlo en un software o herramienta gráfica creada, denominada eTectonic, con el fin de que pueda ser útil para comprender los fenómenos reproducidos con la mesa sísmica.

# Antecedentes

Con el propósito de continuar con el estudio de eventos fortuitos y sus consecuencias nacen los estudios físicos para observar el comportamiento de la estructura al provocarle cierta excitación, y así observar la reacción de la interacción entre la estructura y la fuerza externa; de manera que se pueda estudiar qué puntos son más propensos al daño y si es posible reforzarlos para disminuir el impacto.(Renda y col., 1999). Uno de esos estudios es la mesa vibratoria (Renda y col., 1999), la cuál es la técnica más cercana a la realidad, pues induce una excitación a velocidad real en la base de la estructura y esta es deformada por las fuerzas de inercia de su masa.

De acuerdo con un artículo de la Universidad Militar de Nueva Granada, a lo largo de la historia se han creado distintos modelos de mesas sísmicas, pero siempre con el mismo objetivo principal, comprender el comportamiento de ciertas estructuras. Las primeras fueron desarrolladas ente 1890 y 1950; estas producían los movimientos de manera manual con ayuda de una rueda con manivela y una plataforma sobre rieles que permitía tener un grado de libertad. Posteriormente, en 1906 se siguió con ese modelo en California, pero fue mejorado con un pequeño motor eléctrico. A partir de 1930 nace una nueva generación de mesas vibratorias gracias a Jacobson, el cual propuso utilizar un péndulo que impacta una plataforma sostenida por resortes que produce los picos de aceleración y frecuencias.(Bernal, Aponte y Carrillo, 2015).

Posteriormente, en 1933 después de un sismo en Long Beach nació una nueva generación de mesas que utilizaba actuadores hidráulicos para producir los movimientos; siguió en estudio hasta 1936 cuando se logró implementar un sistema para controlar los desplazamientos en lazo cerrado para minimizar el error, aparte de usar una señal registrada por un sismo real. A partir de 1960 se comenzaron a utilizar actuadores electro-hidráulicos en combinación con sistemas computacionales, para permitir el desarrollo de aceleraciones mayores. (Bernal, Aponte y Carrillo, 2015).

La era moderna de este tipo de artefactos comenzó a partir de 1972 en la Universidad de Berkeley por parte de MTS System Corporation. Actualmente, los mayores avances han sido logrados en Estados Unidos y Japón con el desarrollo de mesas sísmicas de gran tamaño que permiten realizar pruebas en elementos a escala real con hasta seis grados de libertad. (Bernal, Aponte y Carrillo, 2015).

Actualmente, el estudio de las consecuencias debidas a los movimientos telúricos en una estructura crece cada vez más, es por eso que muchos países se han visto en la necesidad de adquirir o elaborar sus propias mesas sísmicas para realizar análisis estructurales. Un país que cuenta con una lista larga de ensayos de este tipo es Estados Unidos, dónde cuentan con centros de investigación o prototipos realizados por ellos mismos como en: la Universidad de Stanford, Universidad de Rice, Universidad de Calgary, Universidad de Berkeley, Universidad de Illinois,

Universidad Estatal de Nueva York, Corporación Americana de Ingenieros; los modelos de las localidades mencionadas anteriormente varían entre ellas dependiendo de su tamaño que oscila desde los 1.4x1.4 m hasta los 30.5x30.5 m, con límites de carga entre 22.2 kN y 17792.9 kN, además cuentan con distintas fuerzas y aceleraciones según su capacidad de carga, distribuidas en una distancia desplazada entre 6.25 cm y 30.48 cm dependiendo del modelo. (Contreras y Clavijo, 2011).

A nivel comercial se puede mencionar a Quanser. Ha desarrollado una línea de mesas sísmicas con el fin de que estudiantes de grado puedan comprender el comportamiento dinámico de las estructuras en su interacción con los movimientos telúricos. Cuentan con cuatro tipos de mesas vibratorias: Shake table I-40, Shake table II, XY Shake table III, Hexapod Multi-axial shaker; cada una de ellas con distintas capacidades de carga y grados de movimiento para su funcionamiento. (Quanser, 2016).

A continuación se muestra un resumen de las mesas más reconocidas actualmente con sus especificaciones (Damcı y Şekerci, 2019):

**Cuadro 1.** Comparación entre especificaciones de distintas mesas sísmicas

Especificación	Kinay	Quanser Shake Table II	Testbox Shake Table	SANSAR Shake Table
Dimensiones(cm)	40 x 40	46 x 46	50 x 50	50 x 50
Desplazamiento (cm)	14	15,2	20	15
Velocidad (cm/s)	2,5	6,65	5	3,5
Aceleración (g)	2	2,5	1	1,5
Carga (kg)	80	7,5	-	200
Grados de Libertad	1	1	1	1
Tipo de simulación	Sismo	Sismo	Sismo	Sismo
Sistema motriz	Servomotor	Servomotor	Servomotor	Motor de paso

Fuente: Autoría propia.

# Objetivos

## Objetivo general

Desarrollar una mesa sísmica que permita el estudio de modelos de estructuras a escala sometidos a fuerzas sísmicas.

## Objetivos específicos

- Investigar los parámetros típicos que caracterizan a los sismos que se originan en el país y los requerimientos necesarios para el funcionamiento de una mesa sísmica.
- Construir una mesa sísmica vibratoria mecánica capaz de reproducir sismos.
- Analizar modelos simplificados de estructuras, de manera cualitativa, con el uso de la mesa sísmica.

# Alcances y limitaciones

Con el desarrollo del presente proyecto se cumplen a cabalidad los siguientes aspectos:

- La construcción de la mesa sísmica Tectonic capaz de reproducir 15 períodos distintos en movimiento armónico simple con un error menor al 5%; además de nueve sismos históricos ocurridos en Costa Rica. También, es capaz de soportar una carga de 80 kg con una velocidad pico de 25 mm/s sin verse afectado su rendimiento.
- El control de la mesa es totalmente computarizado por medio del IDE de Arduino. Además se creó una herramienta gráfica, eTectonic v.1, creada en Python 3.8, con una interfaz sencilla e intuitiva que también incluye los datos tomados por un acelerómetro.
- Adicionalmente se creó un manual de uso donde se muestran los componentes de la mesa y el funcionamiento del software. Estas consideraciones así como la guía de mantenimiento son fundamentales cuando se realicen pruebas. También se cuenta con los planos de taller del producto.
- Tres modelos simples compatibles con la mesa para la demostración de conceptos relacionado al comportamiento de las estructuras.

En el proceso se manifestaron algunas limitaciones que no permiten utilizar el máximo potencial del producto:

- El motor adquirido necesita 6 A y 80 V en corriente directa para funcionar correctamente, sin embargo se utilizan como máximo 1.5 A y 48 V debido a que en el país no existen fuentes de poder con esas características. Se puede adquirir en China, sin embargo, debido a la emergencia generada por la Covid-19 esta última podría tardar hasta tres meses en arribar al país.
- Debido a la deficiencia en la corriente utilizada se tiene una velocidad máxima de 25 mm/s.
- Arduino tiene una capacidad de 256 kB equivalentes a 3900 datos. Para hacer un sismo se necesita alrededor de 10.000 datos. Esto origina la necesidad de escalar los sismos.
- Python no procesa microsegundos ( $\mu s$ ) por lo que afecta la conexión directa entre Python y Arduino.



# Marco teórico

## Movimiento Armónico Simple

De acuerdo con Sears.F y Zemansky. M (2009) es aquel que después de cierto tiempo se vuelve a repetir el ciclo o recorrido de una partícula. Su comportamiento se describe con la siguiente ecuación diferencial dependiente del tiempo:

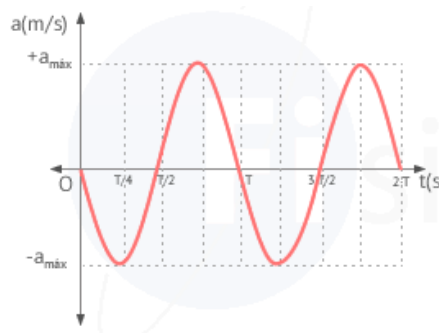
$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$$

Con la solución matemática de la ecuación anterior se obtienen las siguientes ecuaciones, que describen el comportamiento del desplazamiento, la velocidad y la aceleración.

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi)$$

Donde:

- $x(t)$  es el desplazamiento en el tiempo
- $A$  es la amplitud de la onda
- $\omega$  es la frecuencia angular
- $t$  es el tiempo
- $\phi$  es el ángulo de fase



**Figura 2.** Gráfica  $x(t)$  en movimiento armónico simple  
Fuente: Fernández, s.f.

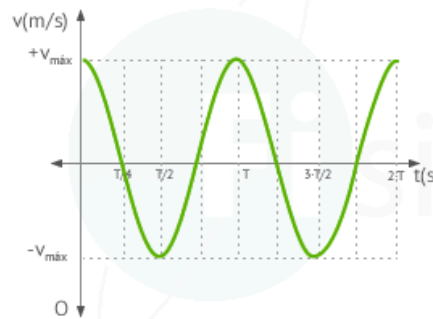
De la misma forma al derivar la ecuación anterior se obtiene la función para definir la velocidad de la partícula y al derivar por segunda vez dicha ecuación es posible obtener la magnitud de la aceleración para un determinado momento. Entonces se tiene que:

$$v(t) = -\omega A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi)$$

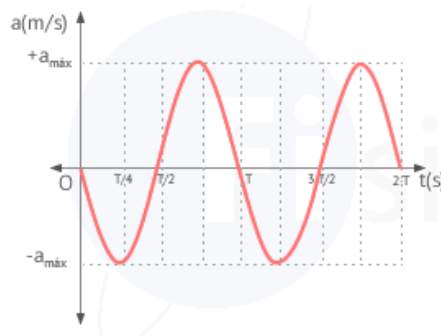
$$a(t) = -\omega^2 A \cdot \text{cos}(\omega \cdot t + \phi)$$

Donde:

- $v(t)$  es la velocidad en el tiempo
- $a(t)$  es la aceleración en el tiempo
- $A$  es la amplitud de la onda
- $\omega$  es la frecuencia angular
- $t$  es el tiempo
- $\phi$  es el ángulo de fase



**Figura 3.** Gráfica  $v(t)$  en movimiento armónico simple  
Fuente: Fernández, s.f.



**Figura 4.** Gráfica  $a(t)$  en movimiento armónico simple  
Fuente: Fernández, s.f.

# Sismos

Un sismo es el movimiento de la tierra originado desde su interior; son de corta duración y su intensidad es variable; provocado por una liberación repentina de energía. Sus orígenes puede tener distintas causas Servicio Geológico Mexicano, 2017:

- Tectónica: la causa principal de los sismos. Es generado por el desplazamiento de las placas tectónicas que forman la corteza terrestre.
- Volcánica: puede generar movimientos en las zonas circundantes en caso de ser una explosión fuerte, pero su radio de acción siempre será menor a la tectónica.
- Hundimiento: se presentan en casos de erosión debida a aguas subterráneas dónde se generan vacíos (cavidad kárstica) que posteriormente se puede convertir en hundimiento debido al peso superior, dando como resultado un sismo de poca extensión.
- Deslizamientos: puede producir sismos a deslizarse la tierra por las fallas, sin embargo, estos no suelen ser de gran magnitud.
- Explosiones atómicas.

## Ondas sísmicas

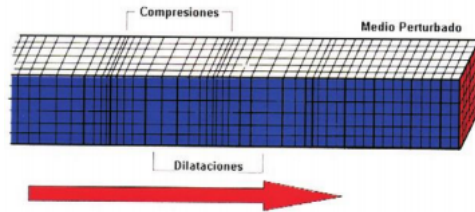
De acuerdo con el material didáctico de Póveda,A. (2017), la liberación de energía que provoca el sismo se propaga por medio de ondas sísmicas o elásticas. Se propagan en todas las direcciones, haciendo vibrar la tierra. En general existen dos tipos: las ondas internas o de cuerpo y las ondas de superficie.

### Ondas internas

Son las que viajan a través de los cuerpos continuos como el suelo o las rocas. Siguen una trayectoria vertical al llegar a la superficie. Hay dos tipos de ellas:

#### Ondas primarias

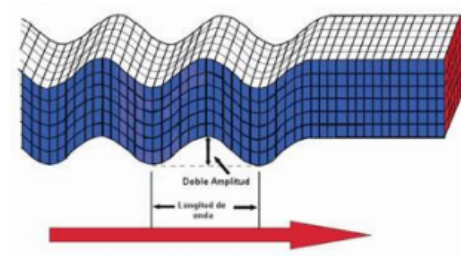
También conocidas como ondas P. Son ondas longitudinales, primarias o de compresión, ya que son las más rápidas y las primeras en llegar a la superficie o a la fuente de medición. Hacen vibrar a las partículas en sentido de la propagación de la onda.



**Figura 5.** Propagación de onda P  
Fuente: Póveda, 2017

## Ondas secundarias

También llamadas ondas transversales, ondas S o de cizalla ya que hacen vibrar las partículas en dirección perpendicular al sentido de avance de la onda.



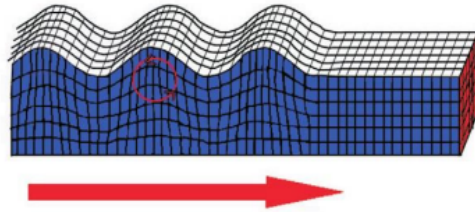
**Figura 6.** Propagación de onda S  
Fuente: Póveda, 2017

## Ondas superficiales

Este tipo de ondas son las que tienen más importancia para la ingeniería civil ya que los asentamientos humanos están ubicados donde ellas se hacen presentes. Existen dos tipos:

### Ondas Rayleigh

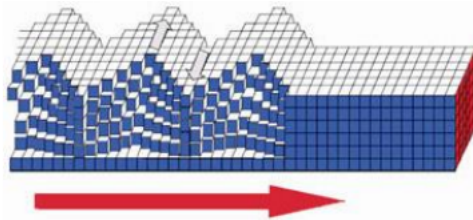
También conocidas como ondas R. Hace vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimiento elíptico horizontal y vertical simultáneamente.



**Figura 7.** Propagación de onda R  
Fuente: Póveda, 2017

## Ondas Love

También conocidas como ondas L. Hacen vibrar la partícula horizontalmente en sentido perpendicular a la dirección de propagación, sin movimiento vertical. Producen desplazamiento de las partículas solamente en dirección transversal, y su amplitud varía con la profundidad



**Figura 8.** Propagación de onda L  
Fuente: Póveda, 2017

## Características físicas

### Magnitud

La magnitud de un sismo es una medida objetiva que indica la cantidad de energía liberada. Para medirla se han establecido relaciones donde se utilizan las distancias y la amplitud de las ondas S recibidas en un aparato de medición; de allí nació la escala de Richter, la más común de todas.

La escala de Richter cuenta con una escala logarítmica, donde, de acuerdo con los datos recibidos se van generando trazas, de tal forma que entre más larga sea esta, más fuerte ha sido el sismo. De la misma manera, se ha utilizado la escala de Magnitud Momento  $M_w$  que también utiliza una escala logarítmica, sin embargo, esta no se basa en la amplitud máxima de la onda, si no que relaciona el área de ruptura de la falla y su desplazamiento.

Cabe resaltar que, la escala  $M_w$  permite definir con facilidad la magnitud de sismos de gran escala, lo cual se volvía complicado con la escala Richter la cual respondía con datos erróneos o sin concordancia con sismos de alta magnitud (Red Sismológica Nacional, 2019a).

## Intensidad

Es una medida subjetiva ya que se encuentra relacionada con los efectos que tenga el sismo, referente a edificaciones y pérdida de vida humana.

La medición de la intensidad se relaciona con la clasificación en la escala de Mercalli la cuál cuenta con 10 grados de afectaciones o bien, la escala de Mercalli Modificada que cuenta con 12 grados. En ambas, los grados bajos refieren la influencia de cómo sintieron el temblor las personas. (por medio de entrevistas), por otro los grados altos aluden estragos en la naturaleza y/o edificaciones que son observables.

A continuación se muestra un resumen de los grados de Mercalli y sus principales características:

Escala Sísmica Modificada de Mercalli	
I. Imperceptible	Microsismo, detectado por instrumentos
II. Muy Leve	Sentido por algunas personas (generalmente en reposo)
III. Leve	Sentido por algunas personas dentro de edificios
IV. Moderado	Sentido por algunas personas fuera de edificios
V. Poco Fuerte	Sentido por casi todos
VI. Fuerte	Sentido por todos
VII. Muy Fuerte	Las construcciones sufren daño moderado
VIII. Destructivo	Daños considerables en estructuras
IX. Muy Destructivo	Daños graves y pánico general.
X. Desastroso	Destrucción en edificios bien construidos
XI. Muy Desastroso	Casi nada queda en pie
XII. Catastrófico	Destrucción total

**Figura 9.** Grados de la escala Mercalli modificada  
Fuente: Pin, 2017

La Agencia Meteorológica de Japón (JMA) desarrolló una escala de intensidad, correlacionada con la de Mercalli, que describe el grado de agitación en un punto de la superficie terrestre. La escala está subdividida en cuatro niveles de percepción: Débil, Moderado, Fuerte y Muy Fuerte; variando en el rango de 0 a 7, donde 0 es un movimiento imperceptible y 7 corresponde a un terremoto destructivo, como se muestra a continuación.

Intensidad en la escala JMA	0	1	2	3	4	5-	5+	6-	6+	7
Percepción		Débil		Moderado		Fuerte		Muy Fuerte		
Escala Mercalli	I	I-II	II-IV	III-IV	V-VII	V-VIII	VI-IX	VIII-X	IX-X	X-XII
Aceleración (Gal)	<0.5	1.7	5.4	17	54	96	170	302	537	>537

**Figura 10.** Escala JMA de intensidades sísmica  
Fuente: Laboratorio de Ingeniería Sísmica, 2015

## Registros sísmicos en Costa Rica

Costa Rica es un país que se caracteriza por una intensa actividad sísmica donde se han sufrido daños importantes. Se han evidenciado sismos provocados por la subducción de las placas, los cuales suelen tener las magnitudes más altas, sin embargo, han existido otra gran cantidad provocados por las fallas locales presentes a lo largo de todo el territorio nacional, estos por lo general tienen magnitudes entre 5,0 y 6,5 Mw; de acuerdo con la Red Sismológica Nacional (2019c). A continuación se muestra una lista de los sismos que han marcado la historia del país:

**Cuadro 2.** Registro de sismos históricos de Costa Rica

Fecha	Magnitud Mw	Localización	Intesidad máx (MM)
21/3/1842	5,4	Alajuelita	VII
29/5/1879	7	Zona Sur	VIII
13/4/1910	5,8	Cartago	VII
4/5/1910	6,4	Cartago	VIII
4/3/1924	7	Orotina	IX
6/12/1941	6,0	Bagaces	VIII
30/12/1952	5,9	Platillos	VIII
12/8/1972	5,7	Isla del Coco	VII
14/4/1973	6,5	Tilarán	IX
1/7/1979	6,4	Paso Canoas	VI
2/4/1983	7,4	Sábado Santo	VIII
3/7/1983	6,1	Buena Vista	IX
13/12/1988	5,8	Fraijanes	IX
26/2/1989	4,7	Los Santos	VII
25/3/1990	7,3	Cóbano	VII
30/6/1990	5,1	Puriscal	VII
22/12/1990	5,7	Piedras Negras	VII
22/4/1991	7,7	Limón	IX
9/8/1991	4,9	Frailes	VII
6/3/1992	5,6	Naranjo	V
10/7/1993	5,8	Pejibaye	VII
20/8/1999	6,9	Quepos	VII
27/2/2002	5,4	Upala	VI
30/7/2002	6,2	Burica	VII
25/12/2003	6,6	Armuelles	VII
4/2/2004	5,8	Corredores	VII
20/11/2004	6,2	Damas, Quepos	VIII
8/9/2009	6,2	Cinchona	IX
5/9/2012	7,6	Sámara	VII

Fuente: Red Sismológica Nacional, 2019c

De acuerdo con esto se seleccionaron sismos, que además se encuentran disponibles en la plataforma del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (2020), donde se puede obtener los registros acelerográficos de algunos de los sismos más significativos de la historia. Entre los encontrados se menciona:

- Jacó, 13 de noviembre de 2017
- Dominical, 20 de agosto de 1999
- Nicoya, 5 de setiembre de 2012
- Limón, 22 de abril de 1991
- Cinchona, 8 de enero de 2009
- Alajuela, 22 de diciembre de 1990
- Damas, 20 de noviembre de 2004
- Cóbano, 25 de marzo de 1990
- Armuelles, 25 de diciembre de 2003

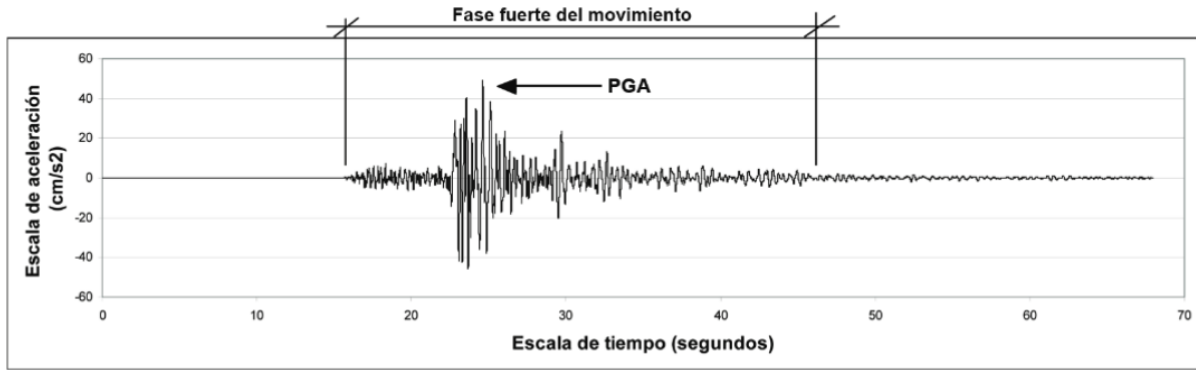
## Acelerogramas

De acuerdo con Schmidt,V y Quirós,C (2007), un acelerograma es un registro de la aceleración en función del tiempo. Este se cuantifica en un lugar determinado, puede ser en el suelo o en edificaciones, dependiendo de los parámetros de movimiento que se pretenden estudiar. Años atrás, debido al poco avance en tecnología, los sismos eran registrados en artefactos analógicos llamados sismógrafos. Actualmente, los movimientos sísmicos se registran por acelerógrafos.

Es común que las aceleraciones se registren en tres dimensiones, en dos planos ortogonales de manera horizontal y una tercera verticalmente. En general, un acelerograma consta de ciertos componentes básicos: una escala de tiempo, una escala de aceleración, la aceleración pico del terreno (PGA) y la duración.

En términos de ondas, considerando que los movimientos sísmicos ocurren de manera esporádica el registro de su aceleración se describe como una superposición de ondas de una alta complejidad. Sus abruptas variaciones dependen del sitio en donde se coloque el acelerógrafo, es decir, de las condiciones geológicas y geotécnicas que ofrezca dicho lugar. Es por esto que ningún registro acelerográfico es exactamente igual a otro.





**Figura 11.** Ejemplo de acelerograma.  
Fuente: Schmidt y Quirós, 2007

## Espectros de respuesta

De acuerdo con Crisafulli, F. y Villafañe, E. (2020), un espectro de respuesta consta de una representación gráfica de la magnitud máxima; sea esta en aceleración, velocidad o desplazamiento, que produce una acción dinámica, la cual es única para una estructura específica de un grado de libertad. Normalmente se utilizan para el estudio de sismos, no obstante, ya que pueden representar cualquier acción dinámica podrían ser utilizados para estudiar otros fenómenos.

La gráfica de cualquier espectro de respuesta debe contener en el eje horizontal los valores de período o frecuencia y en el eje vertical las magnitudes máximas de aceleración, velocidad o desplazamiento, según sea el caso.

El desarrollo de un espectro de respuesta lleva consigo la consideración de diversas estructuras de un grado de libertad las cuales tendrán distintos períodos de vibración al mismo tiempo que todas poseen un mismo valor de amortiguamiento. Al aplicar un movimiento sísmico, por ejemplo, cada estructura tendrá un comportamiento diferente debido a la diferencia en sus períodos, su respuesta máxima es la dibujada dentro del espectro de respuesta.

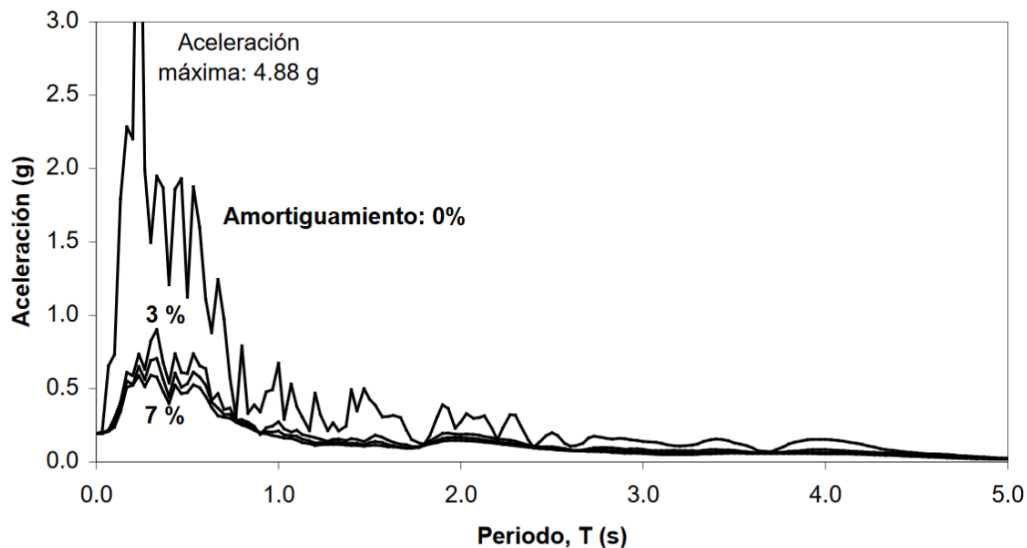
La utilidad de estos espectros está en simplificar o condensar la respuesta dinámica de cualquier sismo que se estudie. Al obtenerse la máxima magnitud, la cual es la considerada en el diseño de cualquier estructura, se facilita el cálculo de estructuras. Cabe destacar que estos espectros de respuesta, a pesar de su amplio uso, omiten algunos parámetros dinámicos como la duración del movimiento sísmico o el número de ciclos que serían críticos para determinada estructura.

## Tipos de Espectros de Respuesta

Al ser elementos importantes para la dinámica estructural, se han desarrollado distintos espectros de respuesta (Crisafulli, F and Villafañe, 2020):

## Espectros de respuesta elástica

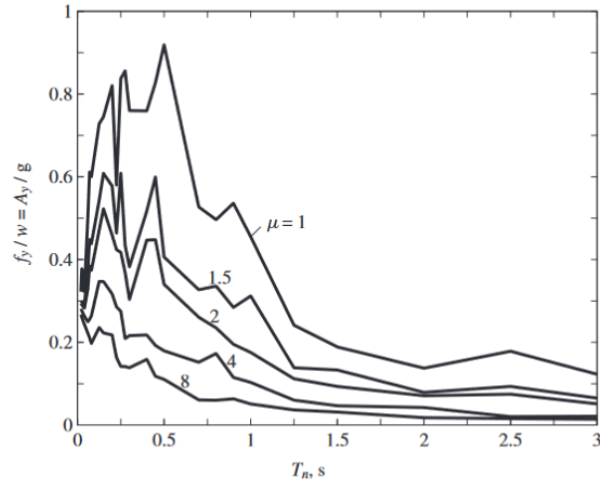
Presentan parámetros de respuesta para un sismo específico, se considera cierto amortiguamiento, y al tiempo el comportamiento de la estructura es lineal. Esto implica que no existirá un daño en la estructura estudiada. Es esperado que la representación gráfica no posea una tendencia suavizada, es decir, que incluya picos y valles; esto como resultado de los registros acelerográficos.



**Figura 12.** Ejemplo de un espectro elástico de aceleración espectral  
Fuente: Crisafulli, F and Villafañe, 2020.

## Espectros de respuesta inelástica

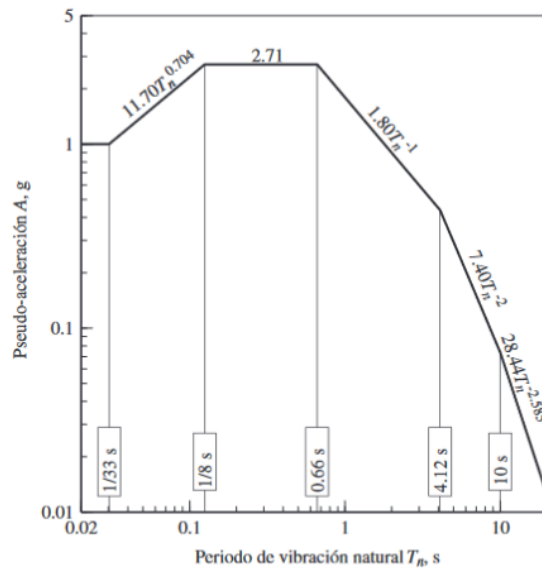
Difiere de los anteriores al considerar que la estructura de un grado de libertad estudiada será dañada por el movimiento del sismo, por lo que se espera que el comportamiento sea no lineal cuando se presentan deformaciones dentro del rango plástico. Un ejemplo de estos espectros son aquellos que consideran la ductilidad dentro del análisis dinámico.



**Figura 13.** Ejemplo de espectro inelástico de ductilidad, se consideran diferentes ductilidades.  
Fuente: Chopra, 2014

### Espectros de diseño

Estos son considerados para los cálculos del diseño sismoresistente de estructuras. Los espectros de respuesta anteriores consideran un sismo en específico por lo tanto no es posible diseñar una estructura a partir de dichos espectros. Estos espectros de diseño se presentan como gráficas suavizadas donde se considera el efecto de distintos sismos, esto implica la representación de una envolvente de diversos espectros de respuesta para una zona.



**Figura 14.** Ejemplo de un espectro de diseño de pseudo-aceleración normalizada.  
Fuente: Chopra, 2014.

# Mesa sísmica

## Concepto

Es una plataforma que es capaz de simular movimientos de un sismo, con la ayuda de algún sistema mecánico o hidráulico que provoque la excitación, para así poder estudiar sus efectos sobre las estructuras, dando resultados de posibles fallas que se presentarían y los efectos que pueda provocar. (Contreras y Clavijo, 2011)

## Características generales

Por lo general, son elaboradas de algún material metálico con una base rígida, como concreto o acero, conectados a una serie de computadores que controlan los movimientos cumpliendo con leyes de similitud para el escalado de las estructuras, sobre todo en términos de desplazamiento, aceleración y frecuencia; a partir de bases de datos registradas. (Contreras y Clavijo, 2011)

Se deben definir una serie de características técnicas que regirán el desempeño de la mesa. Entre ellas se destacan: sus dimensiones, número de grados de libertad, aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos y capacidad soportante.

Bajo estos principios se puede trabajar para simular diversas situaciones como:

- Efectos de carga
- Características de respuesta dinámica bajo una excitación real
- Mecanismos de fisura
- Efectos de masa e irregularidades de rigidez
- Torsión y efectos de vuelco
- Inestabilidad dinámica
- Idealización de los efectos de la base de la estructura

## Propiedades mecánicas

Para la definición de los parámetros de funcionamiento de la mesa, considerando que es un aparato que tiene como fin dar apoyo en la docencia, se deben regir una serie de estándares establecidos por el Consorcio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas (UCIST). Dicho consorcio fue formado en 1999 por veintitrés universidades en Estados Unidos, con el fin de generar herramientas educativas y proyectos de investigación con modelos a escala reducida

en pro de la ingeniería sísmica y la dinámica estructural; actualmente se han expandido a más de 100 universidades dentro del territorio estadounidense.(University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST), s.f.)

De acuerdo con Dyke (2000), en pro de mejorar el desempeño de las pruebas y que estas sean reproducibles con resultados confiables, UCIST ha dictado una serie de parámetros que se deben cumplir, como mínimo, para tener un desempeño satisfactorio, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

**Cuadro 3.** Parámetros físicos para el funcionamiento de la mesa

Parámetro	Valor
Carga útil de diseño	11,34 kg
Aceleración pico	9,8 $m/s^2$
Rango de operación de frecuencia	0 - 20 Hz
Velocidad pico	50,8 cm/sec
Dimensiones de la mesa deslizante	45 cm x 45 cm
Distancia recorrida	15,24 cm (/ 7,62 cm)
Peso de la mesa	$\leq$ 45,35 kg

Fuente: Dyke, 2000

Adicional a lo mencionado en el cuadro 3 se debe destacar que la mesa sísmica debe ser controlada por un sistema computacional con una interfaz sencilla, que sea portátil para demostraciones fuera del sitio, que presente una operación libre de mantenimiento por lo menos durante 10 años, y que tenga un ensamblaje simple; además de tener un bajo costo. (Dyke, 2000)

## Componentes físicos

De acuerdo con Lozano,P. (2013), los componentes que se deben considerar para el funcionamiento de la mesa dependen del tipo específico de mecanismo seleccionado para provocar los movimientos, sin embargo,de acuerdo con las partes principales son:

- Masa de reacción: Es aquella a la cual se van a transferir las fuerzas de reacción debidas al movimiento. Por lo general, es un cuerpo rígido que sirve como soporte para todo el sistema y se ancla en su base. Su configuración depende de los grados de libertad de la mesa.
- Plataforma rígida de simulador: Es la superficie en la cual se va a montar el modelo y es acoplada sobre el sistema de rodamiento para ser movida por el actuador. Es importante destacar que esta debe ser lo suficientemente rígida en sus dos direcciones para minimizar el efecto vibratorio sobre ella.
- Sistema de soporte: Es la base sobre la que se colocarán los aparatos. Esta debe ser rígida para evitar movimientos de rotación indeseados. Además, deben poseer la capacidad de

carga necesaria para soportar el modelo y la plataforma. Y debe ser de baja fricción, para minimizar al máximo la distorsión a la respuesta del modelo.

- Sistema de rodamiento lineal: Es la superficie sobre la cual se dará el desplazamiento de la plataforma. Debe poseer baja fricción.
- Unidad de potencia: Es el sistema que otorga las características de aceleración y frecuencia de la mesa.
- Servo-válvulas y actuadores: Son los que permiten los cambios de dirección y los movimientos del actuador. Los actuadores son cilindros que se encargan de transferir el movimiento a la plataforma.
- Servo-controladores: Realiza la conexión entre la señal enviada por el computador, y los puertos de acción de la servo-válvula.
- Instrumentación para medición: Sensores montados a lo largo de la superficie de la mesa con el fin de medir las variables estipuladas en la prueba. Por lo general, se utilizan acelerómetros para medir la aceleración o sensores LVTD que se encargan de medir la distancia recorrida.
- Sistemas de adquisición y procesamiento de datos: Sistema que hace funcionar al servo-controlador. Esto es posible mediante un software diseñado específicamente para el control de la mesa en función de los datos que recibe.

## Modelos a escala

Un modelo es una representación física de una estructura o parte de ella, por lo general, en una escala reducida. También, suelen ser utilizados en distintas pruebas. Se pueden crear distintos tipos de estructuras como edificios, puentes, presas, torres, estructuras mecánicas y aeroespaciales o submarinas; todas ellas expuestas a distintas fuerzas, incluyendo las estáticas, simulación de sismos, térmicas y efectos de viento. (Harris y Sabnis, 1999)

Los modelos estructurales se pueden clasificar de distintas formas dependiendo de la función que se quiera cumplir. Por ejemplo si solo se quiere observar su respuesta elástica, o si se le quiere añadir carga para así observar su capacidad y modo de falla. De esta forma, se pueden distinguir los siguientes (Harris y Sabnis, 1999):

### Modelos elásticos

Su geometría es semejante al del prototipo original, sin embargo, no está construido con el mismo material. Este tipo de modelo funciona para observar el comportamiento elástico de la estructura, pero no el comportamiento inelástico que se presente al ser cargados. Por lo general, suelen ser construidos con material acrílico o PVC, inclusive madera comercial por su facilidad de trabajar. Para fines educativos también se suelen usar materiales como caucho y papel y plástico debido a su bajo módulo de elasticidad.

## **Modelos indirectos**

Este tipo de modelo es una variable del elástico, solo que este no tiene semejanza en su geometría con respecto al prototipo y es utilizado para obtener los diagramas de influencia de la estructura por reacciones y fuerzas internas. Las cargas no son puestas directamente sobre ellos si no que se le añaden por superposición a los resultados obtenidos. Por lo general, son utilizados para representar miembros no uniformes en marcos indeterminados.

## **Modelos directos**

Es similar geoméricamente al prototipo. Además, las fuerzas externas se aplican de la misma manera que en el original, así se pueden observar las deformaciones, los esfuerzos para cada escenario estudiado.

## **Modelos de resistencia**

Estos modelos son una réplica del prototipo. Presentan condiciones como las de los modelos directos pero estos son construidos con materiales similares al original; así, este tipo de modelo puede predecir el comportamiento del prototipo hasta la falla.

## **Modelos para efectos de viento**

Pueden haber dos tipos para medir el efecto del viento: modelos de forma rígida donde toda la presión sobre la estructura será medida, o, modelos aeroelásticos donde se escala la forma y los esfuerzos para poder medir los esfuerzos inducidos por el viento y las deformaciones provocadas por la interacción viento - estructura.

## **Modelos dinámicos**

Son utilizados para medir las vibraciones y los efectos de cargas dinámicas. Estos deben ser probados en una mesa sísmica o en un túnel de viento para observar sus efectos. También suelen ser utilizados para estudiar los efectos del impacto a nivel tanto interno como externo.

## **Modelos instructivos, de investigación y diseño**

Los modelos instructivos deben ser lo más simple posible para demostrar los conceptos en estudio. Los de investigación deben ser elaborados con técnicas de laboratorio que permitan exactitud. Los de diseño tienen un nivel de exactitud intermedio entre los tipos mencionados anteriormente, depende de los resultados que se quieran obtener. Estos tipos de modelos suelen ser utilizados para prever consecuencias que pueden ser muy serias en estructuras grandes o monumentales; sin embargo, su desventaja es el elevado costo económico. (Harris y Sabnis, 1999)

## Selección de la escala

En relación a lo explicado por Harris y Sabnis (1999) los modelos estructurales se les debe aplicar un factor óptimo de escala. Se debe considerar el tamaño según la dificultad de la estructura y la capacidad del equipo con el que se va a probar. Un modelo muy pequeño puede presentar dificultades de fabricación, aunque, necesita cargas más ligeras. En cambio, modelos grandes pueden presentar facilidad constructiva, sin embargo, se necesita mayor carga sobre ellos e inclusive, instrumentación más grande. A continuación se muestra una lista de las escalas recomendadas para distintos elementos estructurales:

**Cuadro 4.** Factores de escala geométricos típicos

Tipo de estructura	Modelo elástico	Modelo de resistencia
Techo de concha	1:200 - 1:50	1:30 - 1:10
Puentes	1:25	1:20 - 1:4
Revestimiento de reactores	1:100 - 1:30	1:20 - 1:4
Placas	1:24	1:10 - 1:4
Presas	1:400	0,09375
Efectos de viento	1:300 - 1: 50	No aplica

Fuente:Harris y Sabnis, 1999.

## Proceso de modelado

De acuerdo con Harris (1999), el proceso de modelado se debe dividir en ciertas etapas según la complejidad y función que se quiera obtener con el modelo. De esta manera, se han definido una serie de pasos generales a seguir:

1. Definir el alcance del problema, qué se necesita del modelo.
2. Especificar los requerimientos de similitud según la geometría, materiales, cargas e interpretación de resultados; considerando las limitaciones.
3. Decidir el tamaño del modelo, contemplando el grado de precisión y confiabilidad, además, de los recursos disponibles.
4. Escoger el material de construcción considerando los pasos anteriores.
5. Planear la fase de fabricación, tomando en cuenta los procesos constructivos.
6. Seleccionar los equipos de falla y carga, de acuerdo con los requerimientos iniciales.
7. Seleccionar los equipos de almacenamiento de datos y mediciones físicas.
8. Observar la respuesta del modelo durante la carga, tomar anotaciones completas del comportamiento, acompañado de registros fotográficos o de vídeo.
9. Analizar datos y obtener conclusiones referentes a ellos.



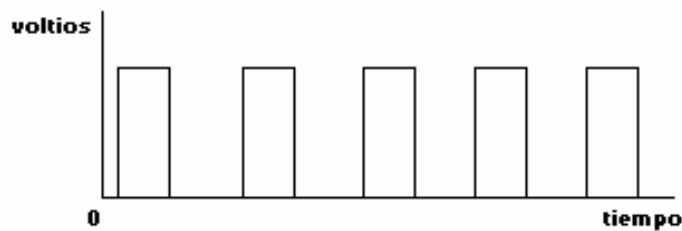
# Aspectos generales de electrónica digital

## Señal

Es una tensión cuyo potencial varía a través del tiempo de acuerdo al medio en el que viaje. Estos medios podrían atenuar la señal ejerciéndole resistencia a su paso. (García, 1999)

## Pulso

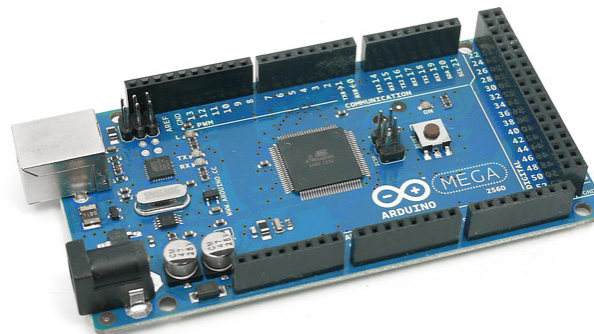
Un pulso está compuesto por una señal rectangular la cual depende de la frecuencia y la potencia y puede variar la duración. La señal se mantiene en un valor de potencial definido por un tiempo hasta que vuelve a disminuir a cero y posteriormente vuelve a subir y así sucesivamente. (García, 1999)



**Figura 15.** Ejemplo de pulso eléctrico  
Fuente: García, 1999

## Arduino Mega 2560

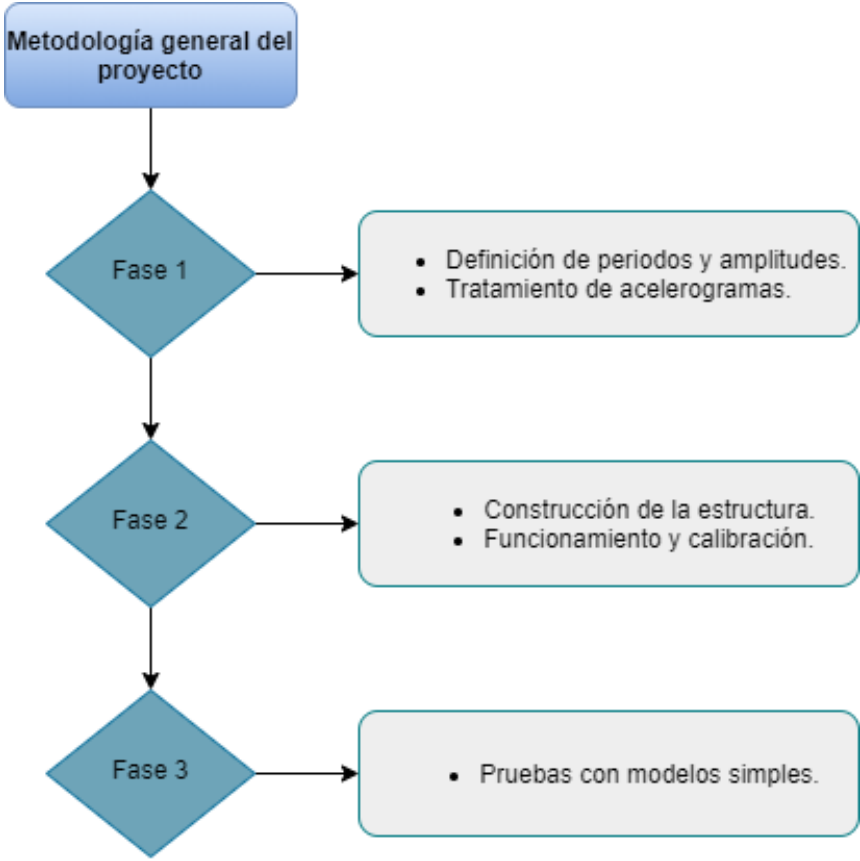
Es una tarjeta utilizada para el desarrollo de hardware, conformada por un microcontrolador Atmega2560. Es la más capaz de la familia Arduino (comunidad internacional dedicada al diseño y manufactura de este tipo de tarjetas). Este tipo de arduino cuenta con 54 pines de salida o entrada de los cuales 14 pueden ser utilizados como PWM (modulación por ancho de pulso) y cuenta con una memoria flash de 256 KB destinada a programación elevada. (Velo, 2018)



**Figura 16.** Arduino Mega 2560  
Fuente: García, 1999

# Metodología

El presente proyecto pretende ser desarrollado basándose en una investigación, recolección y síntesis de datos a partir de una revisión bibliográfica de fuentes inherentes al tema, también se aplicará un análisis estadístico a los datos con el fin de establecer relaciones entre los mismos. Además, se contó con la ayuda de un asistente, estudiante de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, para lograr el funcionamiento mecánico de la mesa sísmica, según parámetros establecidos posterior a la investigación. A continuación se desglosa el proceso seguido:



**Figura 17.** Diagrama de flujo de la metodología  
Fuente: Autoría propia.

Las dos funcionalidades de la mesa sísmica consisten en la simulación de un movimiento armónico simple, limitado por un período fundamental y una amplitud que se deben definir de manera arbitraria, y una simulación de sismos a partir de su desplazamiento, el cual se obtiene con un proceso de tratamiento de acelerogramas de sismos.

## Definición de periodos y amplitudes

Para la selección de los períodos fundamentales se tomó como insumo la lista de requerimientos presentados por la UCIST para el aceptable funcionamiento de una mesa sísmica. Dichos requerimientos establecen que las frecuencias a replicar deben encontrarse dentro del rango de 0-20 Hz, por lo que los períodos deberían replicarse en un rango de 0.05-1 s para cumplir dicho requisito.

Con respecto a la amplitud del movimiento este dependerá de la capacidad del motor para generar dichos periodos con la mayor amplitud posible, ya que existe la limitante de velocidad, la cual es de 25 mm/s. De esta forma, se espera producir, en las estructuras, la mayor velocidad y aceleración que es capaz de reproducir el motor.

De esta forma, se efectuó un código en el programa MATLAB siguiendo el siguiente proceso:

1. Establecer el período y la amplitud que representa la onda que se desea replicar.
2. Plantear la ecuación de desplazamiento.
3. Derivar una vez la ecuación anterior para obtener la velocidad y derivar una segunda ocasión para obtener la aceleración.
4. Determinar el tiempo probable del movimiento en la mesa sísmica, para este proyecto en específico se estimó 30 s.
5. Graficar los datos generados para obtener una representación práctica del movimiento esperado.

## Tratamiento de acelerogramas

Luego de establecer los sismos por replicar, se debe tener claro el hecho de que los datos obtenidos por cualquier instrumento, sea este un sismógrafo o acelerógrafo, presentan un grado de error que puede ser corregido con los procesos adecuados. Estos deben ser:

1. Corrección instrumental, ligadas específicamente a la calibración de estos.
2. Corrección de línea de base, por desfase ocurrido en la toma de datos.
3. Corrección por ruido de frecuencias altas y bajas, ligadas a vibraciones externas independientes del movimiento sísmico.
4. Obtención de velocidad y desplazamiento mediante integración numérica.
5. Corrección por desviación lineal y cuadrática de integración numérica.
6. Escalado de los datos obtenidos para simularse en la mesa sísmica.

Para la realización de este proyecto se utilizaron datos de aceleración disponibles en la página web del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS). Cabe mencionar que estos datos se encontraban corregidos por naturaleza del instrumento y por ruido registrado en la aceleración por lo que fue necesaria la realización de los pasos posteriores.

Para obtener datos sobre velocidad y aceleración se utilizó el programa MATLAB, en el cual se escribió un código que reconoce los datos de aceleración obtenidos de un archivo con extensión .lis; propio del laboratorio de la UCR, dichos datos se integran punto por punto mediante integración numérica por el Método del Trapecio. Cabe mencionar que cualquier otro método de integración numérica puede ser utilizado, no obstante, ya que son datos discretos el error asociado al método como tal es nulo.

```

Agency Lab. Ing. Sismica, INII-UCR, Costa Rica
Processed on Mon May 30 13:28:52 2005
Epicenter Cobano de Puntarenas
=====
Record name:          199003251316_ALJ.lis
Event Date:           1990/03/25 13:16
Event Latitude:       9.5540
Event Longitude:      -84.9480
Event Depth (km):     16.3000
Event Magnitude (Mw): 6.2000
Source type:          LOCAL
Station Code:         ALJ
Instrument type:      SMA1
Serial number:        5734
Station Latitude:     10.0200
Station Longitude:    -84.2170
Station Elevation (m): 1120.0000
Soil type (ATC 1985): S3
Site condition:       FFD
Epicentral Dist. (km): 95.3326
Hypocentral Dist. (km): 96.7160
Azimuth (Ep.to.St):  57.2100
Delta t:              0.0050
PGA-N00E:             31.4000
PGA-UPDO:             18.1000
PGA-N90E:             34.1000
MIN. FILT. FREQ:     0.8000
MAX. FILT. FREQ:     23.0000
Number of points:    3909
S1-Rock   S2-Hard   S3-Soft   S4-Very soft
FFD-Free_field BDU-Buildng_up BDG-Buildng_down
=====DATA IN GALS=====
      N00E      UPDO      N90E
0.24400000E+02  0.18100000E+02  -.13200000E+02
0.25000000E+02  0.15000000E+02  -.13200000E+02
0.23900000E+02  0.13900000E+02  -.13000000E+02
0.22799999E+02  0.13700000E+02  -.12200000E+02

```

**Figura 18.** Archivo con extensión .lis  
Fuente: Página Web del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, UCR.

Una vez obtenidos dichos datos, se observa la desviación por efecto de la integración, lineal para el caso de la velocidad y cuadrático para el caso del desplazamiento. Este error es esperable ya que la integración lo que permite obtener es la magnitud del área bajo la curva

de aceleración, al integrarse una vez el resultado debe ser una desviación lineal y al efectuar la segunda integración esta debe ser cuadrática.

Por efecto de ese error se procede a generar una regresión lineal y parabólica de los datos obtenidos para velocidad y desplazamiento respectivamente con el fin de encontrar una línea base que represente la desviación de los datos y así restarla a los datos erróneos. Con la corrección de estos datos ya los valores de velocidad y desplazamiento se encuentran alineados.

Una vez realizados estos procesos se obtienen los gráficos de aceleración, velocidad y desplazamiento corregidos adecuadamente. Permitiendo así obtener el insumo para determinar como serán simulados los sismos seleccionados basándose en reproducir el desplazamiento obtenido de manera escalada en la mesa sísmica.

## **Construcción de la estructura**

A partir de la investigación realizada previamente, y considerándose otros modelos fabricados en otras universidades o inclusive empresas privadas, se llegó a la conclusión de tres sistemas mecánicos que pueden funcionar. Dichos sistemas se analizaron por medio de una ingeniería de valor con el fin de establecer la opción más viable a desarrollar.

Para lograr la fabricación del artefacto escogido se debió cumplir con los siguientes aspectos:

1. Se establecieron los requerimientos de peso y movimiento que debe cumplir la plataforma, cumpliendo con requisitos mínimos establecidos por el Consorcio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas (UCIST), los cuales han listado una serie de parámetros que se deben cumplir para garantizar uniformidad y reproducibilidad de los ensayos; tales como: peso de la sobrecarga, aceleración pico, rango de frecuencias operacional, velocidad pico, dimensiones de la plataforma deslizante, desplazamiento máximo y peso de la mesa vibratoria.
2. Se definieron los elementos básicos para el funcionamiento correcto del artefacto, los cuales deben cumplir con los requerimientos establecidos previamente, basados en tesis elaboradas en otros países y modelos comerciales y académicos existentes.
3. Se seleccionaron materiales adecuados para menor mantenimiento del equipo, de tal manera que se consideren distintos aspectos como facilidad constructiva, adquisición de materiales, mantenimiento, durabilidad, resistencia y funcionamiento del conjunto; con el fin de escoger el material más apto dentro de los evaluados.
4. Para seleccionar la alternativa de funcionamiento de la mesa; se realizó una matriz de valoración basado en un sistema de tres puntos para categorizar que tanto se adecua a los requerimientos deseados. Posteriormente, se le asigna un porcentaje con base 100 a cada una de las categorías, según su nivel de importancia para el desarrollo del equipo.

Es importante mencionar que la puntuación máxima representa la mejor alternativa en ese aspecto. La alternativa con más puntaje es la ganadora, y por ende la seleccionada para realizar el diseño.

5. Se diseñó el cuerpo, la base y el sistema motriz de la mesa, considerando el material escogido, por medio del método de diseño LRFD, de tal manera que el cuerpo principal pueda soportar el movimiento y vibraciones generadas por el motor, tomando en cuenta que debe tener la rigidez necesaria para no provocar vibraciones adicionales que alteren el resultado esperado. Además, contemplar la unión adecuada entre todo el sistema para que se pueda unir integralmente. Cabe destacar que para el diseño del sistema motor se realizó con la asistencia de un estudiante de Mantenimiento Industrial que se encargó de la selección del motor y los componentes necesarios para el funcionamiento de tal forma que cumpla con una lista de requerimientos brindada a su persona, según lo investigado en los objetivos anteriores.

## Funcionamiento y calibración

Para realizar esta sección fue necesario el uso de lenguajes de programación y tomas de datos en tiempo real con el fin de observar el comportamiento programado y corregirlo en caso de ser necesario. Se siguieron los siguientes pasos.

1. Se desarrolló el código en el IDE de Arduino, el cuál envía las señales que reproducen el movimiento de la computadora al arduino, de allí es enviada al "driver" que controla el accionar del motor. Además, se incorpora una herramienta gráfica que permite la visualización en tiempo real, del movimiento que se encuentra en reproducción, por medio de un acelerómetro; también muestra las gráficas del movimiento reproducido por el motor.
2. De acuerdo con la guía de usuario del motor utilizado, este posee una capacidad de 200 *rev/s*, sin embargo, cuando se utiliza el driver, este último duplica la capacidad del motor a 400 *rev/s*. Otro aspecto por considerar es que el tornillo sin fin utilizado tiene un paso de 5 mm, medido manualmente con un calibrador de precisión. Con ambos datos se puede determinar el desplazamiento generado por un paso del motor.

$$\Delta r = \frac{\text{Pasodeltornillodebola}}{\text{Pasosporrevolución}} = \frac{5}{400} = \mathbf{0,0125mm}$$

A partir de esto se realizaron tomas de datos empíricos para determinar cuánto tiempo tarda el motor en realizar distintos desplazamientos, según los datos registrados por el mismo equipo. Con dichos datos se puede obtener la velocidad del movimiento de acuerdo con la fórmula de movimiento  $v = d/t$ .

Se procedió a crear una función  $x(t)$ , en MATLAB, dónde el eje  $x$  muestra los pulsos necesarios para cierto desplazamiento y el eje  $y$  muestra la velocidad necesaria para dicha

distancia. Con ello se obtiene un gráfico base para obtener información para crear distintos movimientos.

3. Con ayuda de los foros del servidor de Arduino, se generaron 15 códigos para generar distintos movimientos armónicos simples (MAS). Se utilizaron puntos discretos a cada 0.0125 mm obtenidos de MATLAB a través de la ecuación empírica para cumplir con los períodos previamente establecidos. De tal forma se genera una lista con distintos puntos  $x$  con una velocidad distinta asociada a cada uno.

Para la programación de los MAS se da más importancia ó se toma como parámetro fijo el cumplimiento del periodo más allá de la amplitud y la aceleración. Estas últimas vienen dadas por la capacidad del motor, el cuál permite una velocidad de 25  $mm/s$  o 5  $rev/s$  y hasta 1,5g de aceleración.

4. Para la calibración de los movimientos armónicos simples se ejecutaron los códigos programados y se extrajo la información almacenada por el arduino de los datos reales reproducidos por el motor. Dichos datos fueron graficados y comparados con la tendencia que fue programada, la cuál sigue la tendencia de un MAS.

Para este proyecto se definió un error admisible de 5%. Para dicho efecto, si se observa una diferencia, entre el reproducido y el teórico, mayor a dicho porcentaje se procede con un ajuste lineal por pulsos.

El ajuste consiste en la suma o la resta de los pulsos necesarios para ajustar el tiempo. Se observa el mayor desfase y se ajusta todo el conjunto de puntos. Si el tiempo es mayor se deben restar pulsos y si es menor se deben sumar pulsos. El proceso se repite hasta obtener un error menor al admisible. Si con esta técnica no se llega al error se debe realizar el ajuste en cada punto discreto por separado.

5. Para la programación de los sismos se sigue el mismo procedimiento que para el movimiento armónico simple, se hace la salvedad que es movimiento uniforme, por lo tanto no hay ningún parámetro que se repita de tal modo que cada cambio de dirección será discreto e independiente. Por ello se debe establecer la cantidad de pasos con su respectiva dirección (positiva o negativa) y velocidad.

Los datos utilizados para establecer el movimiento de los sismos predeterminados, listados en el marco teórico, son los mismos que fueron simplificados de acuerdo al procedimiento de tratamiento de acelerogramas, explicado previamente. Cabe destacar, que debido a la gran cantidad de datos, estos fueron empaquetados en grupos de diez, como parte del tratamiento.

Los datos deben ser escalados para adaptarse a la capacidad del motor. Pare ello se siguen factores de escala obtenidos de diferentes consideraciones de similitud para cargas

sísmicas, sugeridas por Harris y Sabnis (Damcı y Şekerci, 2019). Se puede hacer de dos maneras, en específico para este proyecto:

- Manteniendo la aceleración: se reduce el desplazamiento  $1/36$  y velocidad y el tiempo  $1/6$ , de acuerdo a la capacidad máxima del sistema mecánico.
- Manteniendo el tiempo: la aceleración, la velocidad y el desplazamiento se reduce  $1/6$ .

Debido a la cantidad de datos para reproducir un sismo se debe reducir la totalidad de puntos, se agrupan en paquetes de tres datos y obtener el promedio de ellos, a excepción de los sismos de Jacó y Nicoya que están empaquetados en grupos de cinco debido a su gran tamaño. Esto para cumplir con la capacidad de procesamiento de datos del arduino.

Al programarlo, cada vez que se presente un cambio de dirección se lleva a crea una nueva posición cero para realizar el siguiente desplazamiento en la dirección contraria.

6. Una vez programados los sismos se procede a verificar que su efecto sea similar al del sismo real, por medio de espectros de respuesta. Para ello se siguieron los siguientes pasos:

- Se extraen los datos de desplazamiento y velocidad reproducidos por el motor, almacenados en el arduino.
- Se derivan los datos de desplazamiento para obtener la velocidad y se comparan con los datos de velocidad obtenidos, para verificar su similitud.
- Se derivan nuevamente para obtener la aceleración. Estos datos se comparan con el sismo teórico que fue escalado.
- Los datos deben ser tratados numéricamente en MATLAB para establecer puntos con el mismo diferencial de tiempo (0.05 s), ya que todos los diferenciales son distintos en los datos obtenidos.
- Una vez listos los datos, se deben ingresar en un programa realizado en MATLAB que obtiene los espectros de respuesta asociados a los datos ingresados, siguiendo los pasos explicados en el libro Dinámica de Estructuras de Chopra, A. (2014).

## **Acelerómetro y herramienta gráfica**

En pro de mejorar la utilidad de la mesa sísmica se incluyó un acelerómetro que era parte de los activos de la Escuela y además se realizó una herramienta gráfica.

1. Se adecuó el acelerómetro Gy-521, de tal modo que pueda medir los datos de aceleración en los tres ejes principales, no obstante solo utiliza uno al ser de un grado de libertad. Para ello se utilizó como base la programación realizada por Schoeffler (2017), con una variación para obtener los datos crudos.
2. Se creó una herramienta gráfica en Python 3.8; la cuál incluye el controlador del acelerómetro y un visor gráfico de los movimientos que puede reproducir la mesa.



## Pruebas con modelos simples

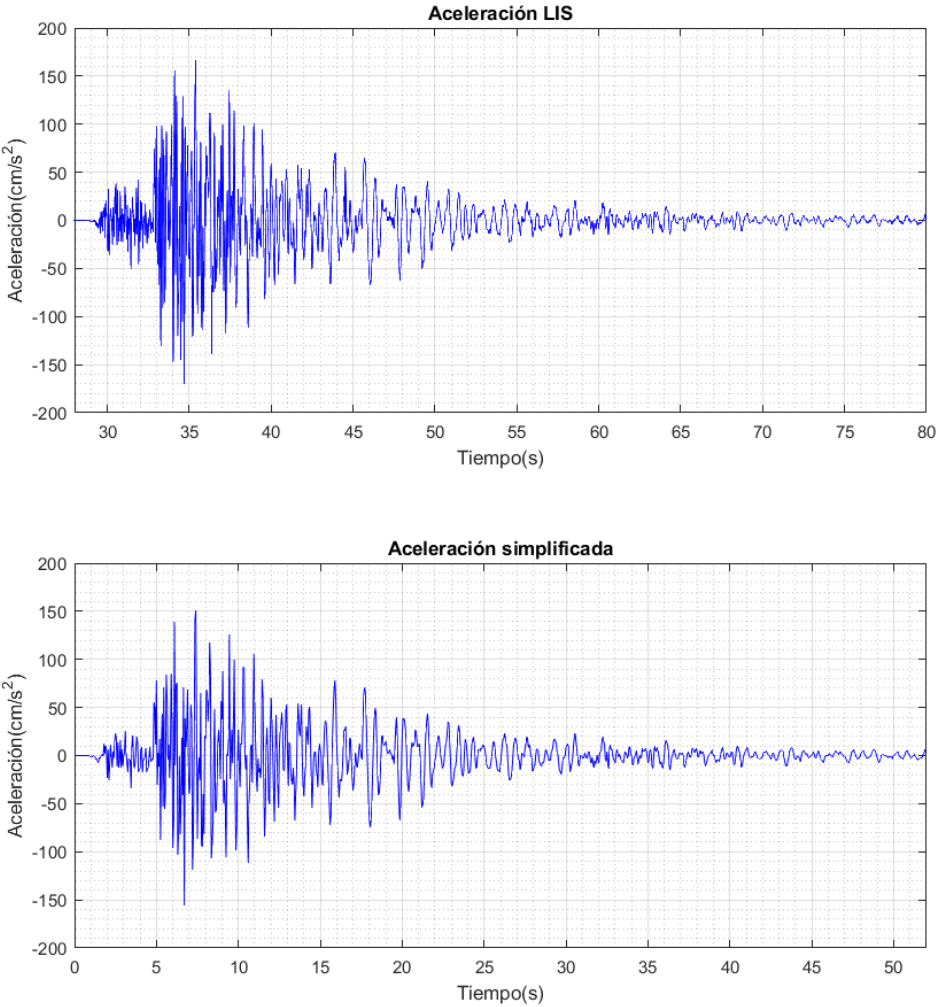
Con el fin de demostrar el funcionamiento de la mesa sísmica se efectuaron pruebas cualitativas de modelos simplificados de estructuras, considerando parámetros que los diferencian y ofrezcan comportamientos distintos de estos. Para lograrlos se realizará lo siguiente:

1. Se diseñaron modelos simplificados de estructuras con distintas características dinámicas, según lo investigado en el libro de Harris y Sabnis, 1999. Estos se modelaron inicialmente en Fusion360, un software CAD en 3D. Los modelos analizados fueron construidos con distintos materiales de uso común con distintas técnicas. Entre las características se consideran grados de libertad de los modelos, dimensiones y rigidez, de manera que los modelos presenten diferentes comportamientos al ser sometidos a determinado movimiento sísmico. Para lograr lo anterior se realizaron los siguientes pasos:
  - Definir la finalidad del modelo, que se quiere demostrar con él.
  - Decidir la escala dimensional que se aplica.
  - Escoger un material que facilite la construcción del modelo.
  - Planear los elementos involucrados en la construcción, tal como las uniones.
2. Se obtiene el período de las estructuras simples con el fin de tener una guía aproximada de los períodos que deben ser probados en las pruebas experimentales. Para ello se realizaron modelos en Robot Structural 2020.
3. Se prueba cada modelo con distintos períodos y o pesos con el fin de verificar las hipótesis planteada, según la finalidad sugerida para cada uno en la sección de resultados, comprobándolas cualitativamente entre sí.

# Resultados

## Simplificación de ondas sísmicas

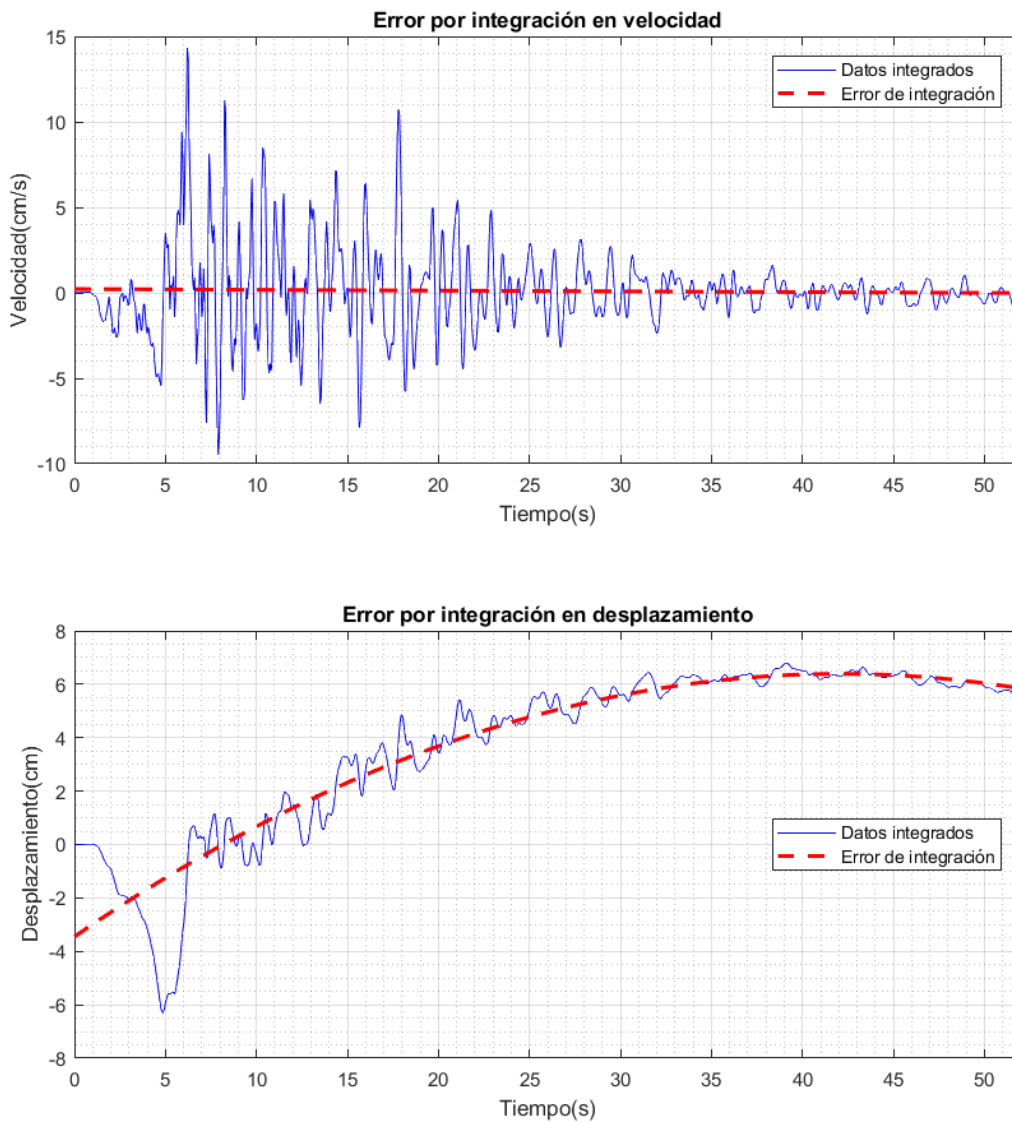
Con ayuda del programa MATLAB se obtuvieron las gráficas de aceleración, velocidad y desplazamiento tanto para el movimiento armónico simple como para los distintos sismos que fueron seleccionados. Se muestra un ejemplo de las gráficas obtenidas:



**Figura 19.** Aceleración con datos LIS y su simplificación  
Fuente: Autoría propia, MATLAB.

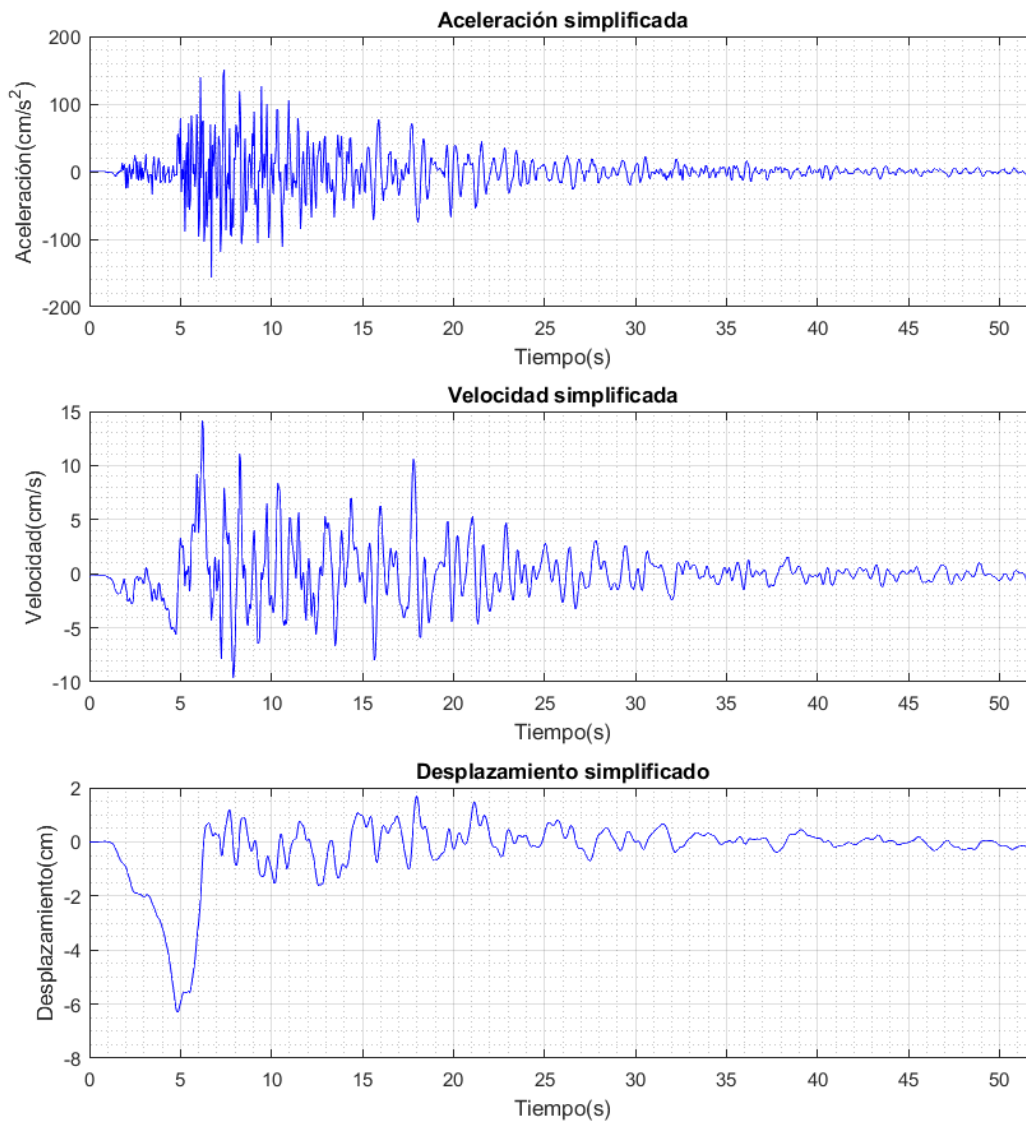
En el primer gráfico de la figura 19 se muestra el cambio de las aceleraciones a través del tiempo para el sismo de Cinchona (2009), según los datos registrados en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica. En el segundo se muestran los datos simplificados, agrupados en paquetes de 10 puntos como parte de la simplificación explicada en la sección de metodología.

Al realizar la integración numérica para obtener la velocidad y el desplazamiento se generan errores matemáticos que desfasan los datos de la línea base, como se muestran en el siguiente gráfico:



**Figura 20.** Errores de integración presentes en velocidad y desplazamiento.  
Fuente: Autoría propia, MATLAB.

Al aplicar la corrección de los errores relacionados a la integración numérica se obtiene la descripción del movimiento del sismo a través del tiempo. De esa manera se puede deducir el valor de la aceleración, velocidad y desplazamiento para un tiempo dado.



**Figura 21.** Representación de aceleración, velocidad y desplazamiento. (Cinchona, 2009)  
Fuente: Autoría propia, MATLAB.

En el apartado de apéndices se muestra ampliamente la gama de los períodos y sismos que fueron graficados.

## Selección del sistema funcional de la mesa sísmica

**Cuadro 5.** Aspectos considerados.

	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Criterio	Motor con variador de frecuencia (biela)	Servomotor y driver comercial	Motor paso a paso con arduino
Diseño			
Funcionalidad	Este es el modelo más simple, el cuál debido a su sistema mecánico solo permitiría un movimiento armónico. Si se quisiera variar la distancia en que se mueve la plataforma se puede hacer pero manualmente por medio del variador de frecuencia.	Gracias al funcionamiento del servomotor, con este sistema mecánico se podría replicar la simplificación del sismo, inclusive se podrían programar una serie de sismos, sin embargo, su funcionamiento está limitado al software brindado por la empresa fabricante.	El motor a pasos también permite una simulación más acertada de un sismo. Su ventaja es que al controlar el driver con arduino se puede crear el propio software que permita controlar la mesa con los parámetros deseados.
Adquisición de materiales	La totalidad de los materiales se puede encargar en alguna empresa nacional.	El servo motor se podría conseguir en Elvatron, empresa en Costa Rica, sin embargo, la entrega de algunos componentes podría tardar hasta 12 semanas .	Los componentes electrónicos son fácilmente adquiribles en Costa Rica. El servomotor también debería adquirirse en alguna plataforma online.
Trabajabilidad	Fácil de utilizar. Uso manual.	Uso por medio de computadora. Facilidad depende del software del fabricante.	Fácil de manejar. Interfaz intuitiva y con guía de uso. Uso por medio de computadora.
Mantenimiento	Depende del sitio donde se ubique, forma e intensidad de uso, así como el respeto de los parámetros de funcionamiento.		
Seguridad y estética	Comparten parámetros.		
Costo aprox.	\$300	\$5.400	\$770

Fuente: Autoría propia.

**Componentes básicos:** Las tres propuestas tienen en común una serie de elementos que también serán diseñados y se deben considerar en el costo. Entre esos elementos se debe contemplar los perfiles de acero que se utilizarán para construir el cuerpo de la mesa, así como los elementos involucrados en las uniones, además, de la plataforma y los rieles sobre la que se moverá. Cabe destacar que la plataforma también contará con agujeros en su área para la unión de los modelos. Además, se debe considerar un presupuesto máximo de \$1000.

**Cuadro 6.** Plantilla de evaluación

Parámetro	Puntaje
Adecuado	3
Poco adecuado	2
Inadecuado	1

Fuente: Autoría propia

**Cuadro 7.** Porcentaje para cada una de los parámetros

Parámetro	Porcentaje de importancia (%)
Funcionalidad	45
Adquisición de materiales	10
Trabajabilidad	10
Mantenimiento	5
Seguridad y estética	5
Costo	25
Total	100

Fuente: Autoría propia.

**Cuadro 8.** Evaluación de alternativas

Criterio a evaluar	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
	Puntaje	Valor (%)	Puntaje	Valor (%)	Puntaje	Valor (%)
Funcionalidad	1	14,85	2	29,7	3	45
Adquisición de materiales	3	10	2	6,6	2	6,6
Trabajabilidad	1	3,3	2	6,6	3	10
Mantenimiento	3	5	3	5	3	5
Seguridad y estética	3	5	3	5	3	5
Costo	3	25	1	8,25	3	25
Total	14	63,15	13	61,15	17	96,6

Fuente: Autoría propia.

## Selección del material del cuerpo de la mesa

Considerando los materiales comunes y de fácil acceso (concreto, madera y acero) se decidió utilizar perfiles de acero para la construcción del cuerpo de la mesa ya que este cuenta

con facilidad constructiva y es de fácil y mínimo mantenimiento; además, las posibles uniones que se pueden utilizar permiten crear una estructura que se puede desarmar y transportar por partes; en cambio, si es de concreto no se podría; la madera por su parte si lo permitiría, sin embargo, sus uniones son susceptibles a sufrir aletraciones al estar expuestas a vibraciones o movimientos sísmicos, ya que tienden a expandirse y aflojarse con el paso del tiempo.

## Características de la mesa construida

### Componentes principales

A continuación se muestra una lista de los principales componentes mecánicos utilizados en el diseño final de la mesa:

**Cuadro 9.** Componentes principales de la mesa sísmica

Componente	Especificación
Placa acero A36	60x60x0,635 cm
Motor paso a paso	Nema 34 con bucle abierto de 12 Nm
Controlador del motor	DMY860 bucle abierto de 0 a 6,0 A, 20 a 80 VAC/30 a 110 VDC
Riel de guía lineal	Modelo:SBR12. Largo: 80 cm Diámetro: 1,20 cm. Bloques de rodamiento modelo: SBR12UU
Kit de tornillo de bolas	Tornillo de bola 850 mm 16 mm W / BK12 BF12, carcasa de tuerca DSG16H, acoplador de 0.25 "x0.39RM1605 anti-retroceso para CNC. Paso de 5mm.
Fuente de poder	Capacidad ajustable: 0 - 48 V - 0 - 10 A
2 Microcontroladores	Arduino Mega 2560 REV3
Acople	Maquinado a medida entre el tornillo de bolas y el eje del motor.
Apagador	Switch doble paso 250 V y 6 A.
Entradas USB	Puerto hembra cuadrado tipo USB A/B.

Fuente: Autoría propia.

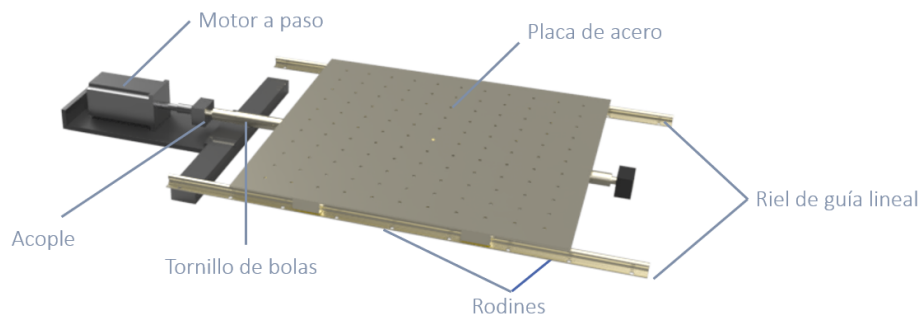


**Cuadro 10.** Función de los componentes principales de la mesa sísmica

Componente	Función en el equipo
Placa acero A36	Plataforma de movimiento y sostén de los modelos
Motor paso a paso	Encargado de proporcionar el movimiento a la plataforma
Controlador del motor	Interpretador y emisor de pulsos electrónicos
Riel de guía lineal	Medio que permite el movimiento de la plataforma
Kit de tornillo de bolas	Se encarga de transormar el movimiento rotacional del motor a un movimiento lineal
Fuente de poder	Suministra la energía eléctrica necesaria para el movimiento del motor
Microcontroladores	Envío y recepción de señales electrónicas, tanto digitales como analógicas.
Acople	Medio de unión entre el eje del motor y el tornillo de bolas
Apagador	Permite la entrada de corriente para el equipo
Entradas USB	Permite la comunicación entre una computadora y los microcontroladores

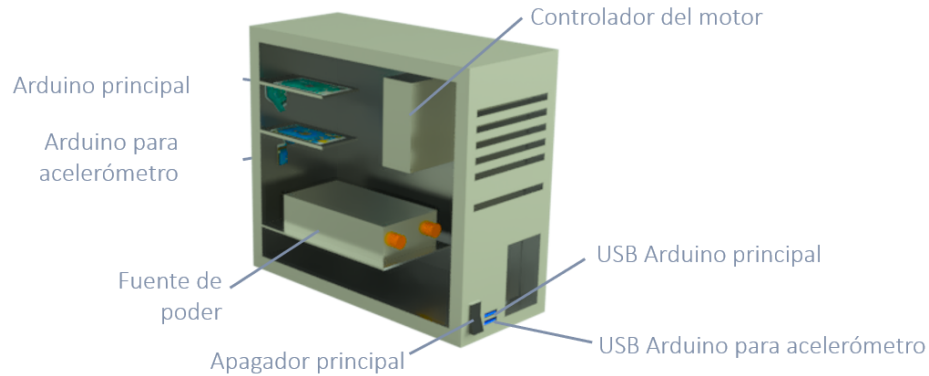
Fuente: Autoría propia.

Además, se muestra un modelo de la ubicación general de los elementos listados en el cuadro 9.



**Figura 22.** Componentes del cuerpo principal de la mesa

Fuente: Autoría propia, Autodesk Fusion 360.



**Figura 23.** Contenedor de componentes electrónicos  
Fuente: Autoría propia, Autodesk Fusion 360.

## Características mecánicas

**Cuadro 11.** Características mecánicas de la mesa construida

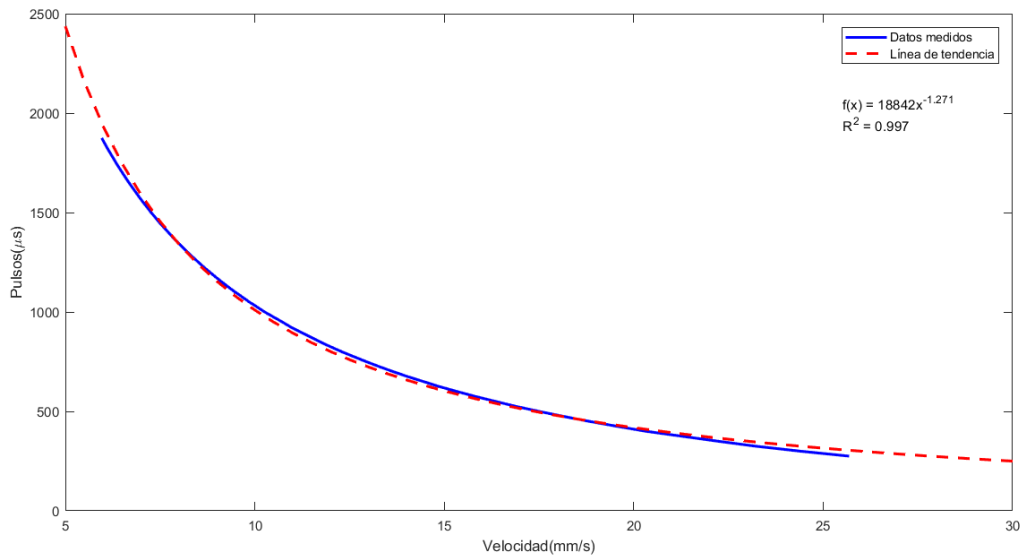
Aspecto	Valor
Sobrecarga permitida	80 kg
Aceleración pico	1 g
Rango de operación de frecuencia	0 - 20 Hz
Velocidad pico	25 mm/s
Dimensiones de la mesa deslizante	60 cm x 60 cm
Distancia recorrida	$\pm 9$ cm
Peso de la plataforma deslizante	18 kg

Fuente: Autoría propia.

## Funcionamiento de la mesa sísmica

### Función base

Mediante mediciones empíricas se obtuvo una función que muestra la cantidad de pulsos y su velocidad asociada para cumplir con distintos desplazamientos a cada 0,0125 mm, según la capacidad mecánica del equipo.



**Figura 24.** Función convertidora de velocidad a micropulsos electrónicos.  
Fuente: Autoría propia por medio de Excel.

R de la función = 0,997

### Determinación de amplitudes máximas

Como criterio principal para la selección de la amplitud máxima se toma que la velocidad máxima debe ser menor a  $25 \text{ mm/s}$ , dado por la capacidad máxima del motor. Se pueden tomar amplitudes menores a la máxima permitida, sin embargo la velocidad también disminuye, desaprovechando la capacidad del motor.

**Cuadro 12.** Selección de amplitud máxima para tres movimientos armónicos

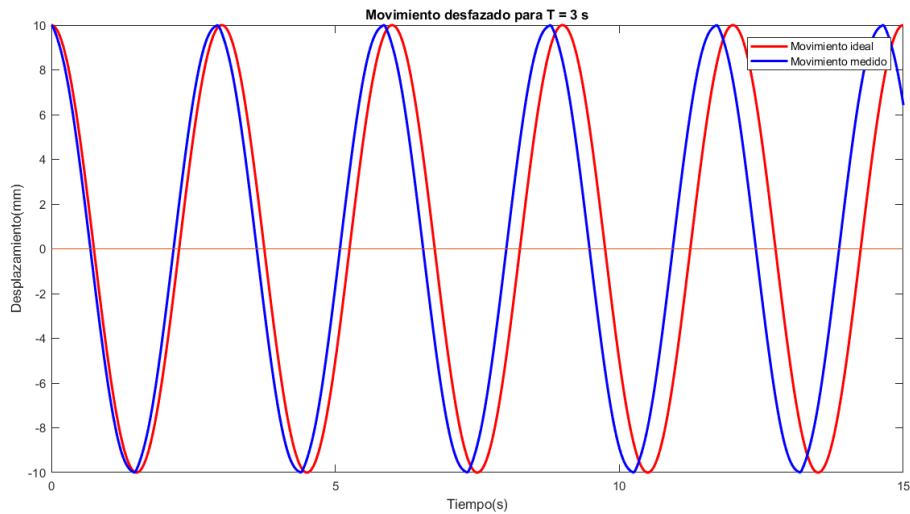
Período(s)	Amplitud(mm)	Velocidad Máxima(mm/s)	Aceleración Máxima(mm/s <sup>2</sup> )
3,00	<b>10,0</b>	<b>20,94</b>	<b>43,86</b>
	8,0	16,75	35,09
	6,0	12,57	26,32
1,00	6,0	37,69	236,87
	<b>3,5</b>	<b>21,98</b>	<b>138,17</b>
	1,0	6,28	39,48
0,10	1,0	62,49	3861,60
	0,4	25,00	1544,60
	<b>0,3</b>	<b>18,74</b>	<b>1158,50</b>

Fuente: Autoría propia.

Cabe destacar que en la tabla anterior solo muestra tres de los 15 períodos considerados, puesto que los demás presentan un comportamiento igual.

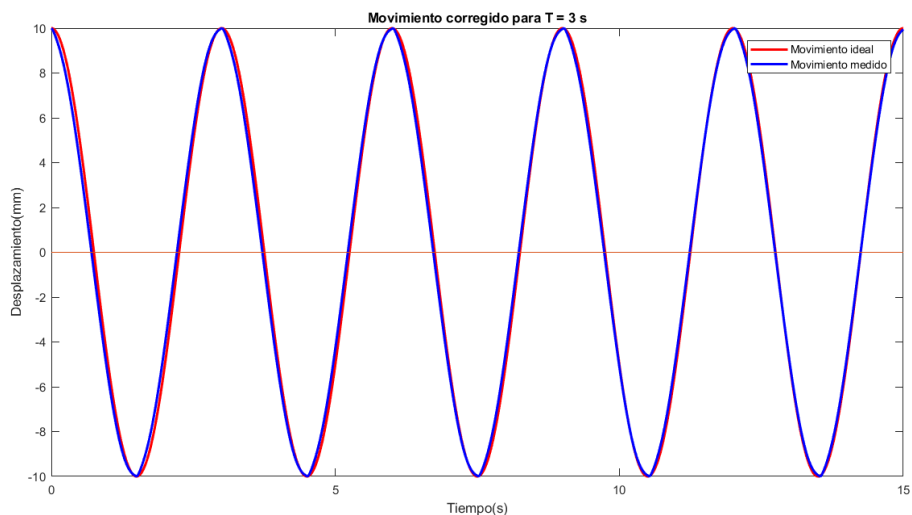
## Calibración Movimiento Armónico Simple

A partir de los movimientos programados se puede extraer una serie de puntos reproducidos en la realidad por el motor, los cuáles se comparan con el movimiento ideal con el fin de observar cuánto se debe ajustar. A continuación se muestra la primera medición realizada para un período de 3s, la cuál presenta un error de 31,5%.



**Figura 25.** Período de 3s sin calibrar  
Fuente: MATLAB.

Después de aplicar la corrección de pulsos al conjunto de puntos, se redujo el error a 3,11%, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 26.** Desfase calibrado en el MAS de 3s  
Fuente: MATLAB.

A modo de resumen, se presenta un cuadro con los errores y las correcciones aplicadas a cada período.

**Cuadro 13.** Resumen de error asociado a períodos fundamentales reproducidos

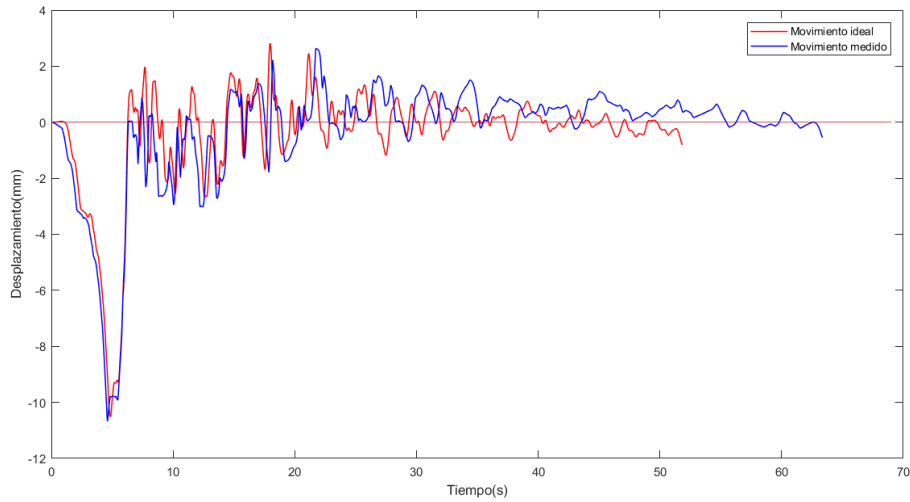
Período(s)	Amplitud(mm)	Ajuste de pulsos( $\mu$ s)	Error por ciclo(%)	Error para 30s(%)
3,00	10,0	+26	0,3115	3,1147
2,50	9,0	+22	0,2643	3,1718
2,00	7,0	+5	0,0224	0,3360
1,50	5,0	+25	0,2485	4,9707
1,00	3,5	+10	0,1484	4,4520
0,90	3,1	-8	0,2049	6,8296
0,80	2,8	+15	0,1660	6,2250
0,70	2,4	-20	0,3177	13,6163
0,60	2,1	+10	0,2300	11,5000
0,50	1,7	-50	0,0416	2,4960
0,40	1,4	-25	0,0790	5,9250
0,30	1,0	+30	0,0280	2,8000
0,20	0,7	-30	0,0400	6,0000
0,10	0,3	+28	0,0400	12,0000
0,05	0,1	+18	0,0080	4,8000

Fuente: Autoría propia.

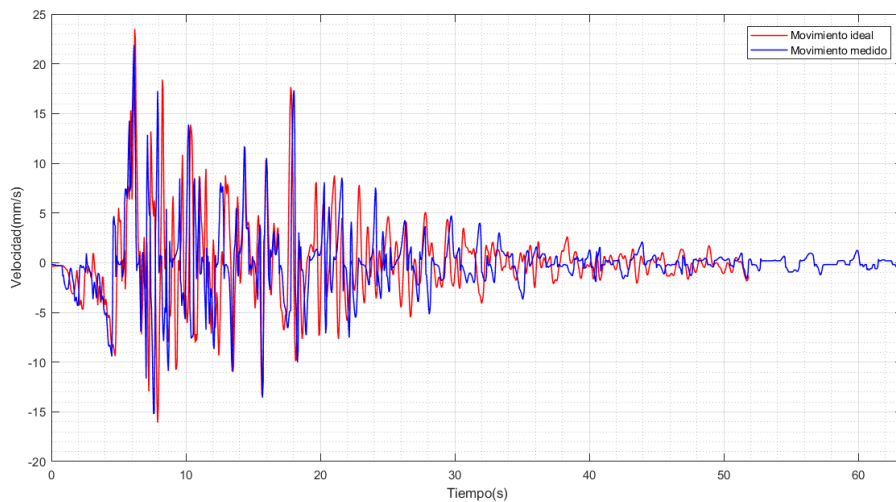
En el apéndice 2 puede observar el resultado gráfico de cada calibración.

## Programación de sismos

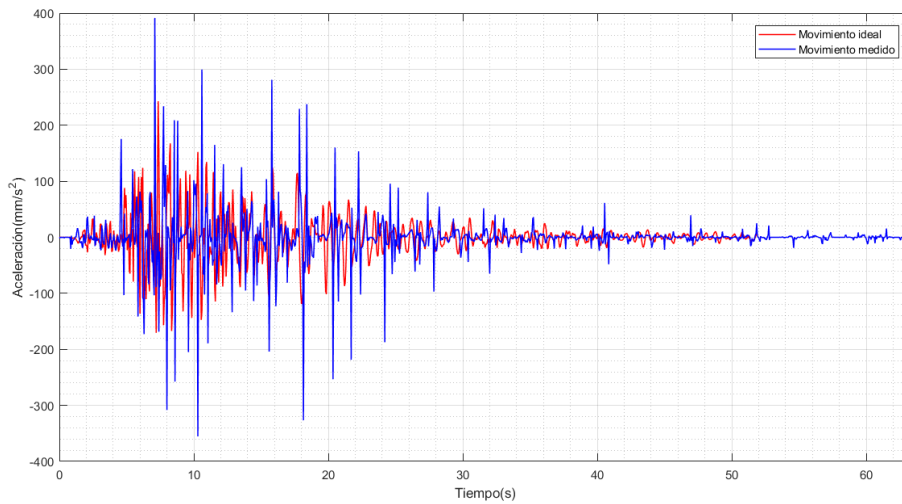
Con los datos obtenidos en la página del LIS, se programaron los puntos que debe reproducir el motor, de manera similar al MAS. De la misma manera, se compara con el sismo teórico. A continuación se muestra el error con respecto al desplazamiento y la velocidad del sismo de Cinchona (2009); los datos reales los puede observar en la figura 21:



**Figura 27.** Error de desplazamiento en Cinchona (2009)  
Fuente: MATLAB.



**Figura 28.** Error de velocidad en Cinchona (2009)  
Fuente: MATLAB.

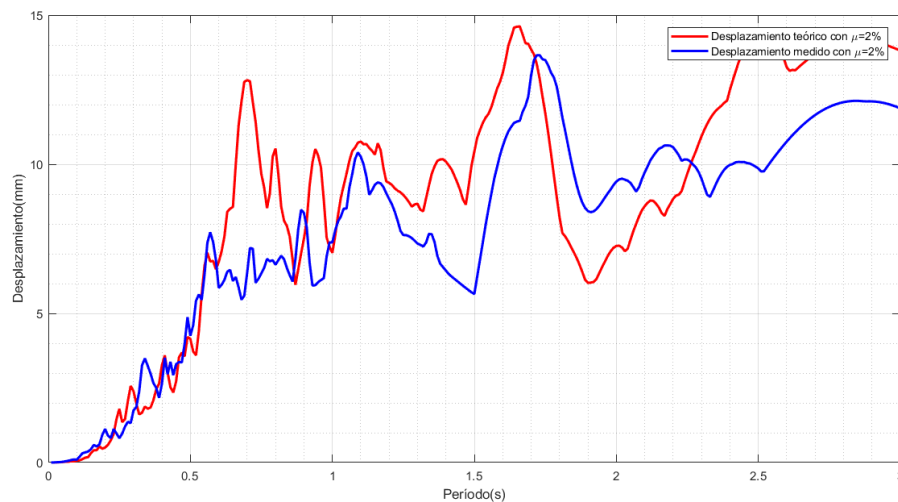


**Figura 29.** Error de aceleración en Cinchona (2009)  
Fuente: MATLAB.

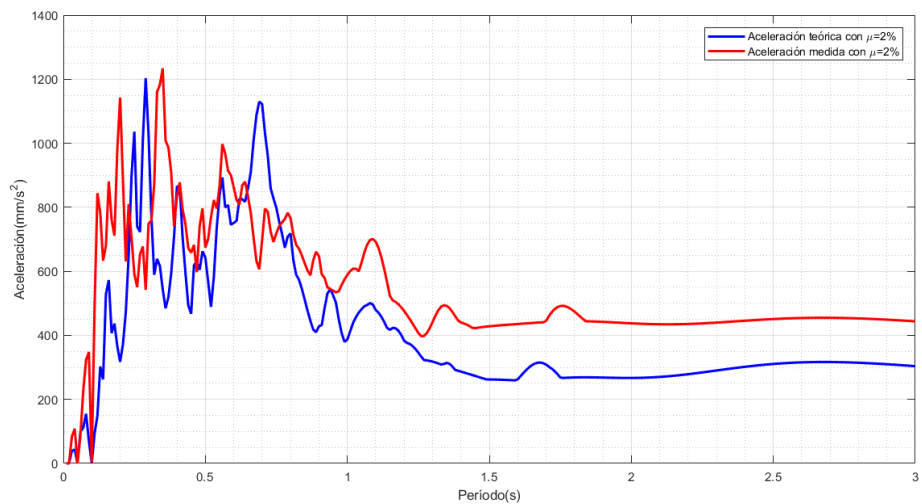
En el apéndice 3 puede observar el resultado gráfico de cada sismo programado.

### Comprobación con espectro de respuesta

Para comprobar que los sismos programados tienen un comportamiento fiel se procede con la elaboración de los espectros de respuesta de los sismos teórico y el programado, de tal manera que estos deben ser similares. A continuación se muestran los espectros mencionados:



**Figura 30.** Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo de Cinchona (2009)  
Fuente: MATLAB.



**Figura 31.** Espectro de respuesta de aceleración del sismo de Cinchona (2009)  
Fuente: MATLAB.

## Modelos estructurales

Con la mesa en un estado funcional, se procede a la comprobación por medio de modelos simples con el fin de demostrar conceptos básicos a nivel de grado, como posibles usos del artefacto. Además, de acuerdo con varios autores (Peralta, Reyes y Godínez, 2009), al ocurrir un sismo, si el período de este coincide con el de la estructura esta experimenta el fenómeno de resonancia, provocando un movimiento más abrupto.

Cabe mencionar que los modelos simples fueron diseñados como modelos educativos, los cuales deben ser lo más simple posible para demostrar los conceptos en estudio, tal y como se menciona en el libro de Harris y Sabnis (1999). También se presenta el modelo 4 que es un edificio que será construido próximamente y cuyo modelo arquitectónico fue brindado por la empresa Estructuras S.A. Para este último, solo se considera el escalado dimensional y se toma en cuenta el tamaño de la plataforma de apoyo como límite.

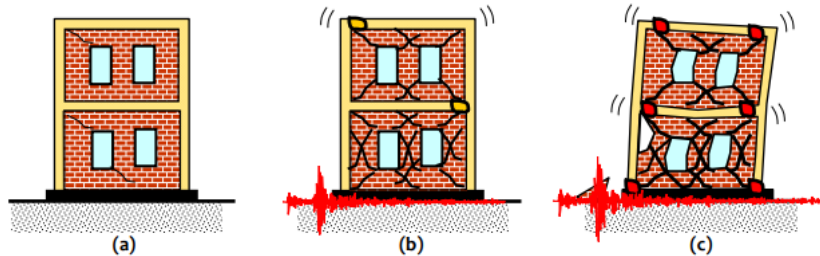
Además, para cada modelo se muestra un cuadro resumen de los movimientos observados, se exponen solamente los períodos donde el movimiento armónico presentó mayor influencia sobre el modelo; no obstante, sí se realizó pruebas con otros períodos que no presentaron afectaciones importantes.

Para describir la perturbación producida en los modelos se utilizan los términos vibración y oscilación. Estos términos físicamente son sinónimos, sin embargo, se puede apreciar diferencia entre ellos. Vibración en particular se entiende como cualquier movimiento alternativo o recíproco causado por la elasticidad sola del material; tales son los movimientos de las cuerdas y cualquier cuerpo resonante en general. Por oscilación, cualquier movimiento alternativo o



recíproco causado exclusivamente por el peso o la gravedad. (Romilly, 2016).

A modo de ejemplo, se muestra la siguiente figura, la cual corresponde a un edificio en su estado de equilibrio (a). En el caso (b) presenta vibración y en el (c) presenta oscilación, se evidencia por el desfase con el centro de equilibrio, en comparación con el modelo (a).



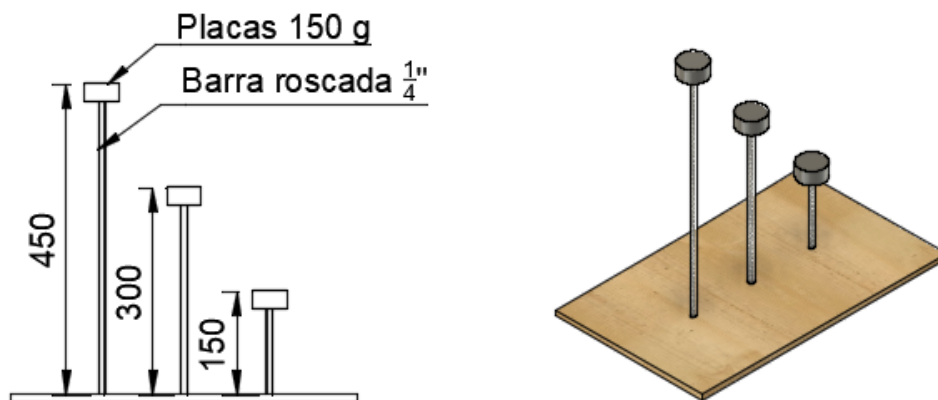
**Figura 32.** Visualización general de fenómenos observados en las pruebas  
Fuente: Murthy y col., 2012

También, se incluye la escala dimensional aplicada a cada modelo, así como el material y masas externas que lo componen. El período de cada caso fue calculado por medio del software Robot Structural de Autodesk. La rigidez fue calculada directamente a partir del período suministrado por el programa, con el siguiente despeje:

$$k = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

Donde m es igual al peso gravitacional ( $kg \cdot s^2/m$ ) y T es el periodo en segundos.

### Modelo 1



**Figura 33.** Modelo simple 1  
Fuente: Autoría propia, Autodesk. Fusion360.

**Hipótesis a comprobar:** El modelo de un grado de libertad pretende demostrar los diferentes períodos en los que se puede perturbar una estructura. Se mantiene la masa y se cambia la rigidez de cada modelo en función de la altura. Como premisa principal se supone que a mayor altura se reduce la rigidez y se aumenta el período.

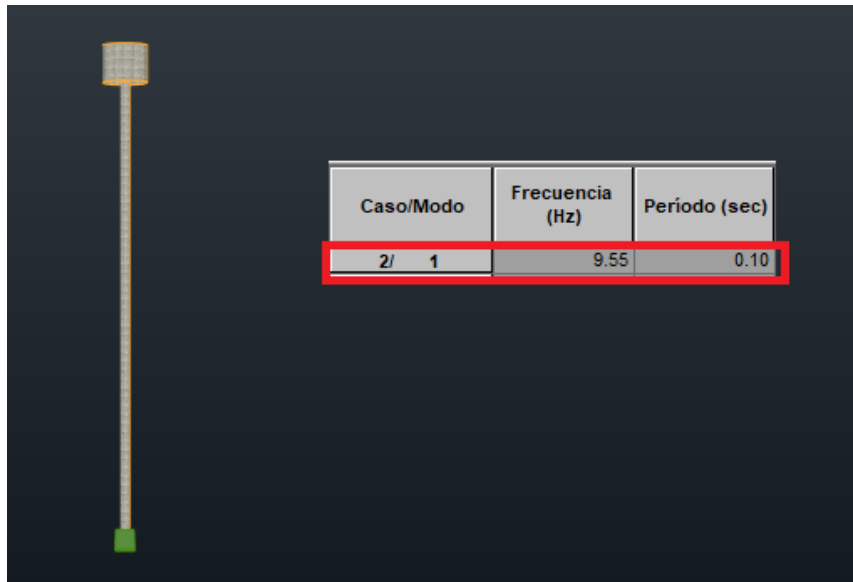
**Escala dimensional:** no aplica ya que el modelo fue diseñado en tamaño real.

**Material:** El cuerpo principal está conformado por barras roscadas de acero galvanizado de 1/4" de diámetro. Estas están ancladas a una placa de acero que permite mantenerla unida a la plataforma de la mesa. Para efecto de la demostración se utilizan tuercas de acero de 150 g, como sobrepeso, en el extremo superior para las tres barras por igual.

A continuación se muestra el período natural teórico de cada modelo obtenido por medio de Robot Structural de Autodesk:



**Figura 34.** Período de la barra de 15 cm  
Fuente: Autoría propia, Robot Structural 2020.



**Figura 35.** Período de la barra de 30 cm  
Fuente: Autoría propia, Robot Structural 2020.

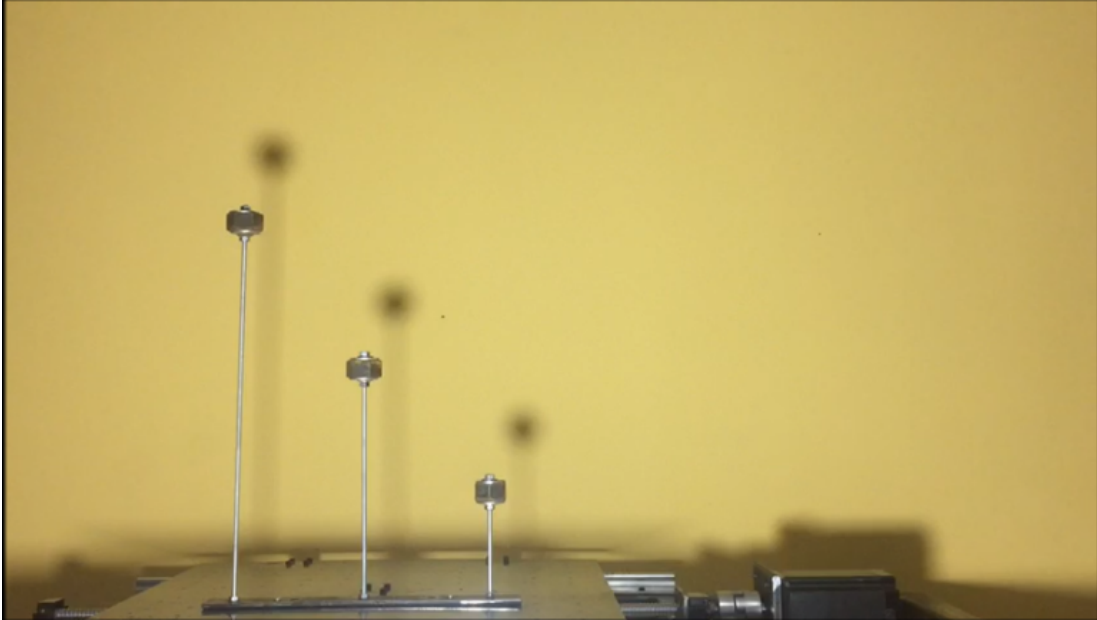


**Figura 36.** Período de la barra de 45 cm  
Fuente: Autoría propia, Robot Structural 2020.

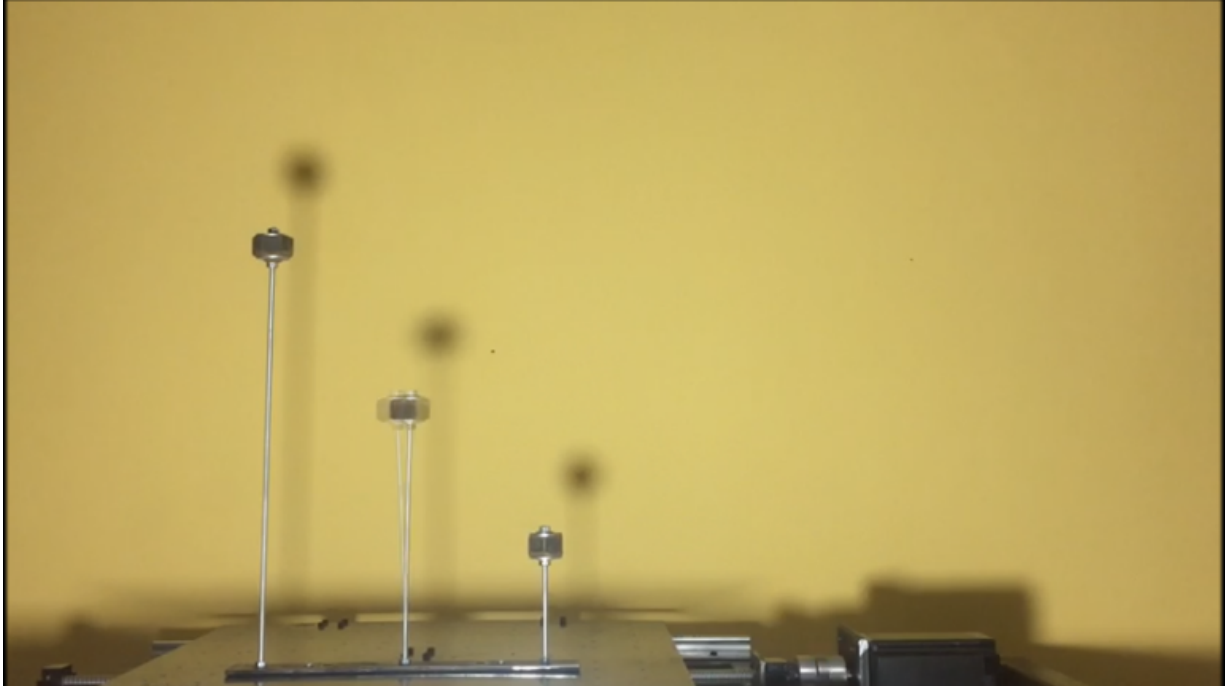
La rigidez correspondiente al modelo de 15 cm es 377,66  $kg/m$ , para el modelo de 30 cm

es  $60,43 \text{ kg/m}$  y para el de  $45 \text{ cm}$   $16,73 \text{ kg/m}$ .

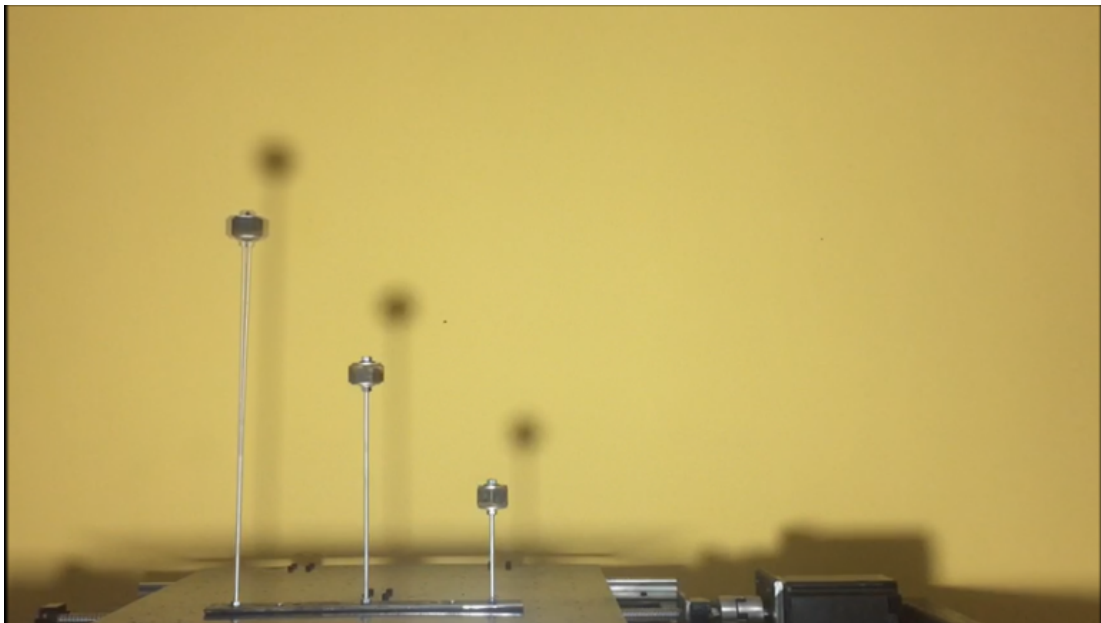
Ahora, se presenta una secuencia de imágenes dónde se puede apreciar el movimiento inducido en cada modelo, con distintos períodos, así como un cuadro resumen con los efectos observados:



**Figura 37.** Movimiento inducido en modelo de  $15 \text{ cm}$ .  
Fuente: Autoría propia.



**Figura 38.** Movimiento inducido en modelo de 30 cm.  
Fuente: Autoría propia.



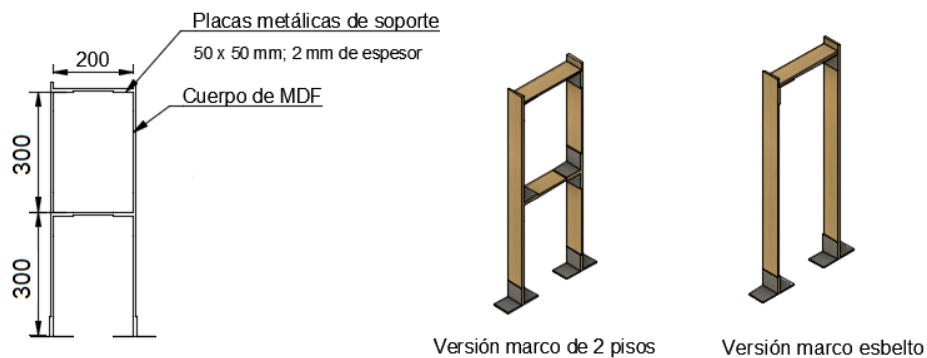
**Figura 39.** Movimiento inducido en modelo de 45 cm.  
Fuente: Autoría propia.

**Cuadro 14.** Resumen de movimientos observados en el modelo 1

Prueba	Período	Descripción del movimiento
1	0,05 s	Mientras los modelos de 45 cm y 30 cm no experimentan un fenómeno visible, el de 15 cm experimenta vibración.
2	0,1 s	En este período solo el modelo de 30 cm experimenta oscilación. Los otros dos no muestran un comportamiento apreciable a simple vista.
3	0,4 s	En este período solo el modelo de 45 cm presenta oscilación, mientras que los otros dos no muestran mayor influencia.

Fuente: Autoría propia.

## Modelo 2



**Figura 40.** Modelo simple 2

Fuente: Autoría propia, Autodesk Fusion360.

Este modelo consiste en un marco de un edificio de dos pisos con las características mostradas en la figura anterior. También se incluye un marco esbelto de un solo piso con las mismas dimensiones del primero.

**Hipótesis a comprobar:** Con los presentes modelos se pueden realizar dos pruebas distintas:

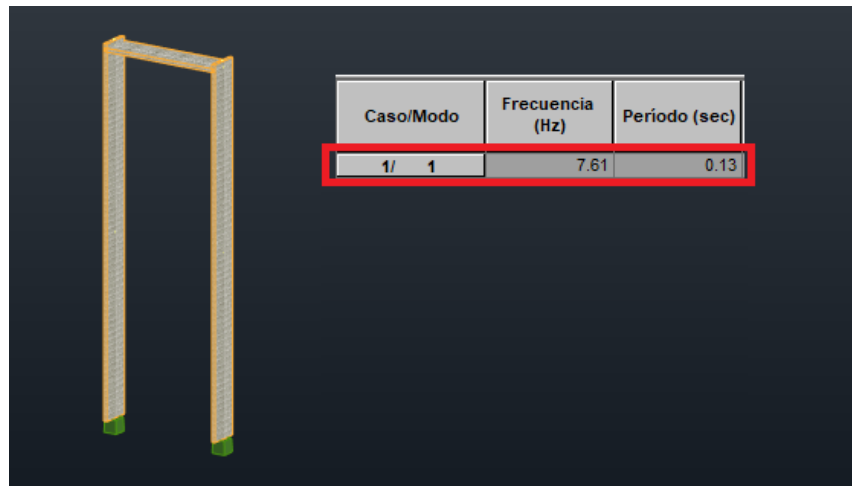
- Demostrar la diferencia del comportamiento de un marco esbelto y un marco de dos pisos con columnas cortas. Al probar ambos marcos se notará que al provocar una excitación en la base de estos, el esbelto será menos estable.

- Demostrar como al agregar peso en un marco puede provocar el aumento del período natural de la estructura.

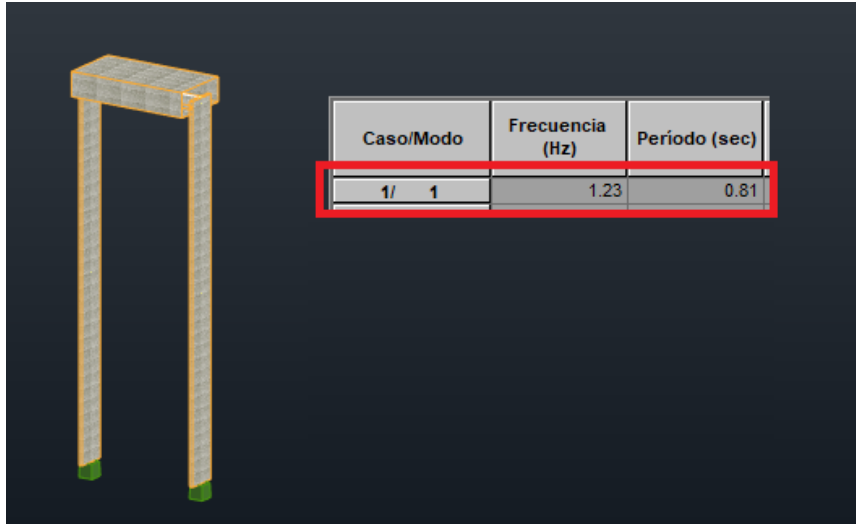
**Escala dimensional:** no aplica ya que el modelo fue diseñado en tamaño real.

**Material:** Los elementos están hechos con la unión de dos láminas de mdf de 3 mm, pegadas entre sí con cola de madera, formando elementos de 6mm. Además, los soportes están hechos con angulares metálicas de 5 cm con un espesor de 2 mm; unidas con silicón caliente. Para los sobrepesos se utilizaron placas de acero de 6 kg en ambos modelos.

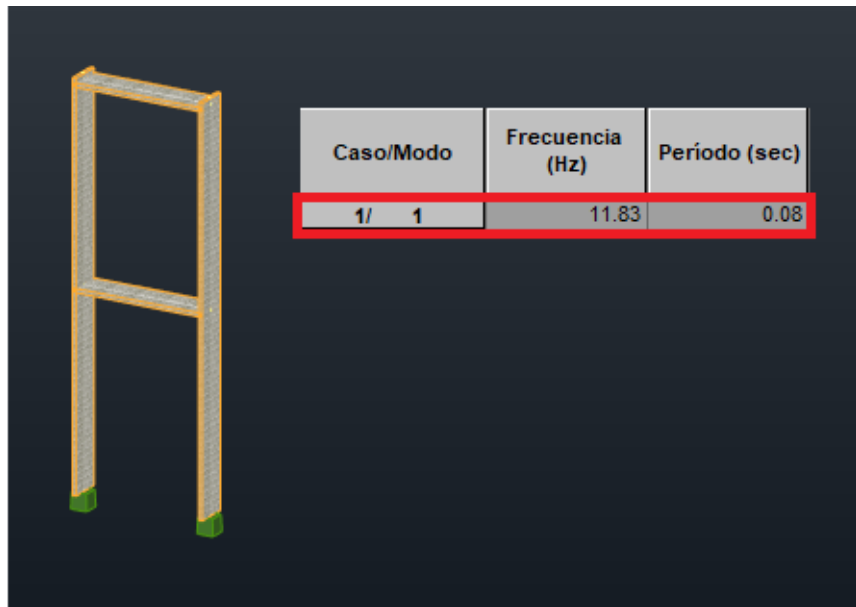
A continuación se muestra una estimación de los períodos teóricos de los marcos de rigidez obtenido por medio de Robot Structural de Autodesk, para los casos con sobrepeso y sin sobrepeso:



**Figura 41.** Período del marco esbelto, sin sobrecarga  
Fuente: Autoría propia, Robot Structural 2020.



**Figura 42.** Período del marco esbelto, con sobrecarga  
Fuente: Autoría propia, Robot Structural 2020.



**Figura 43.** Período del marco de edificio de dos pisos, sin sobrecarga  
Fuente: Autoría propia, Robot Structural 2020.





**Figura 44.** Período del marco de edificio de dos pisos, con sobrecarga  
Fuente: Autoría propia, Robot Structural 2020.

La rigidez del marco esbelto sin sobrecarga es de  $119,18 \text{ kg/m}$  y con sobrecarga es de  $39,91 \text{ kg/m}$ . Para el marco de dos pisos es de  $314,72 \text{ kg/m}$  y con sobrecarga es de  $100,67 \text{ kg/m}$ .

Ahora, se presenta una secuencia de imágenes dónde se puede apreciar el movimiento inducido en cada modelo, con distintos períodos, así como un cuadro resumen con los efectos observados:



**Figura 45.** Movimiento inducido en modelo esbelto, sin sobrecarga.  
Fuente: Autoría propia.



**Figura 46.** Movimiento inducido en modelo de dos pisos, sin sobrecarga.  
Fuente: Autoría propia.



**Figura 47.** Movimiento inducido en modelo esbelto, con sobrecarga.  
Fuente: Autoría propia.



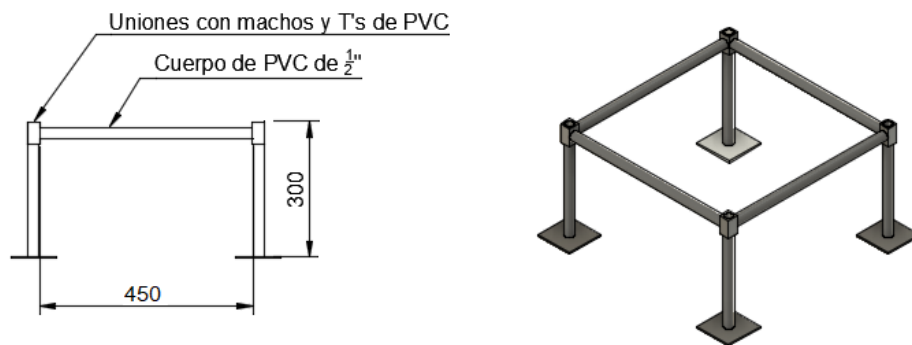
**Figura 48.** Movimiento inducido en modelo de dos pisos, con sobrecarga.  
Fuente: Autoría propia.

**Cuadro 15.** Resumen de movimientos observados en el modelo 2

Prueba	Período	Descripción del movimiento
1	0,05 s	El modelo esbelto permanece estático, sin embargo, el marco de dos pisos presenta vibración en todo el movimiento. Ambos modelos sin sobrecarga.
2	0,2 s	Mientras el marco de dos pisos permanece estático, el otro presenta oscilación. Ambos modelos sin sobrecarga.
3	0,4 s	El marco de dos pisos presenta mayor respuesta ante la excitación provocada. Caso contrario, al modelo esbelto que presenta una respuesta reducida. Adicionalmente, se observa pandeo en las columnas, inclusive antes de iniciar el movimiento en el modelo esbelto por efecto del peso colocado.
4	0,7 s	El marco de dos pisos presenta una oscilación reducida en comparación con el marco esbelto que presenta deflexión lateral debido a la excitación sísmica, muy notoria en su sección superior.

Fuente: Autoría propia.

### Modelo 3



**Figura 49.** Modelo simple 3

Fuente: Autoría propia, Autodesk Fusion360.

**Hipótesis a comprobar:** Si a este modelo se le aplican cargas en las esquinas, ya sean diferenciadas, se puede observar la torsión que se producen por el efecto de los movimientos

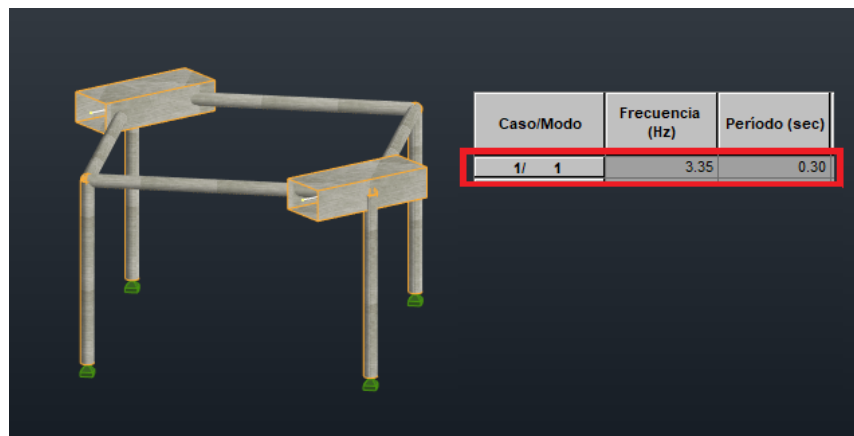
sísmicos.

**Escala dimensional:** no aplica ya que el modelo fue diseñado en tamaño real.

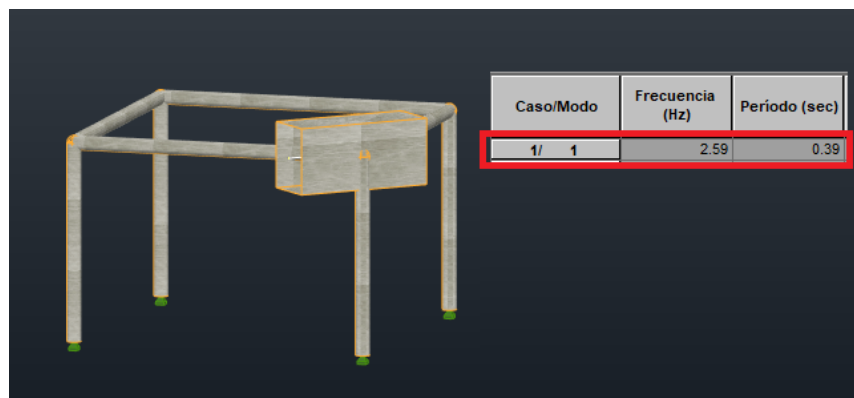
**Material:** El cuerpo principal está constituido por tubos de PVC de 1/2" unidos entre sí por T's con un macho en una de sus paredes para permitir la perpendicularidad. Además se utilizan T's cortadas y ahuecadas en las bases para unir el modelos a la plataforma. Se utilizan placas de acero de 6 kg para colocarle el sobrepeso.

La rigidez del modelo con las cargas colocadas en esquinas opuestas es de 559,50  $kg/m$  y con la carga colocada en una sola esquina es de 331,07  $kg/m$ .

A continuación se muestra el cálculo del período asociada a esta estructura obtenido por medio de Robot Structural de Autodesk, con el sobrepeso colocado en dos distribuciones distintas:

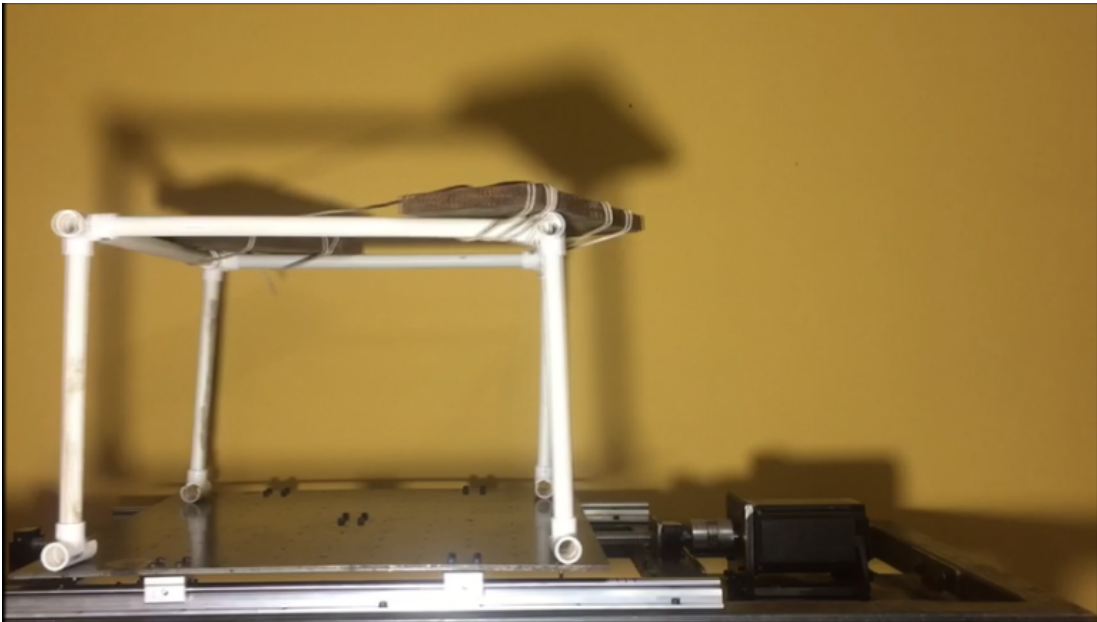


**Figura 50.** Período del modelo con el peso colocado en dos esquinas opuestas  
Fuente: Autoría propia, Robot Structural 2020.

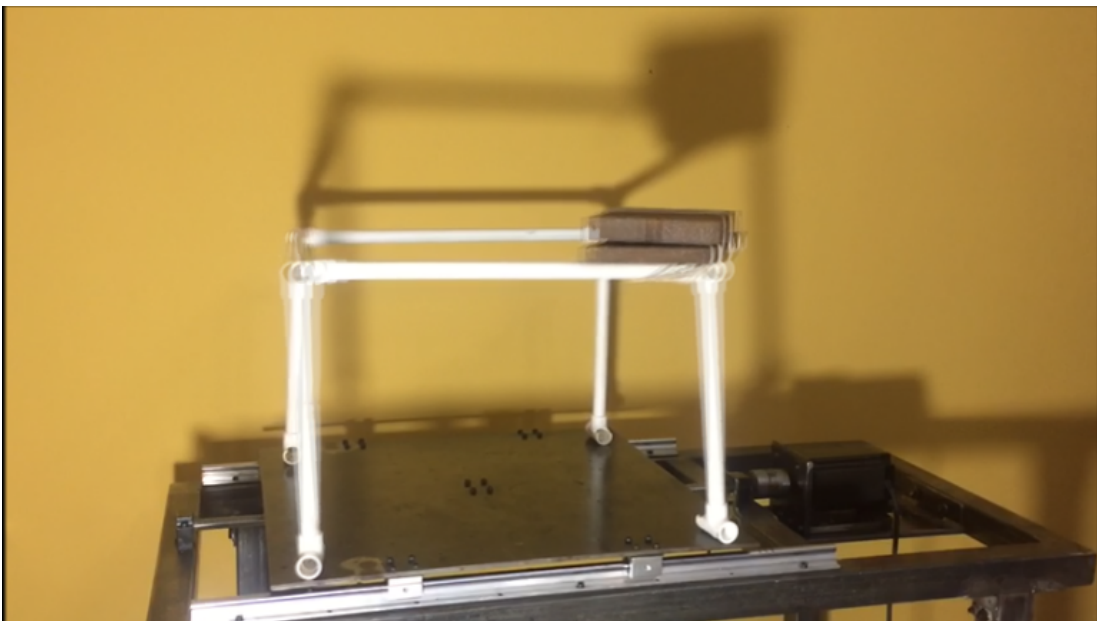


**Figura 51.** Período del modelo con el peso colocado en una sola esquina  
Fuente: Autoría propia, Robot Structural 2020.

Ahora, se presenta una secuencia de imágenes dónde se puede apreciar el movimiento inducido en cada modelo, con distintos períodos, así como un cuadro resumen con los efectos observados:



**Figura 52.** Movimiento inducido en modelo con peso igual en dos esquinas.  
Fuente: Autoría propia.



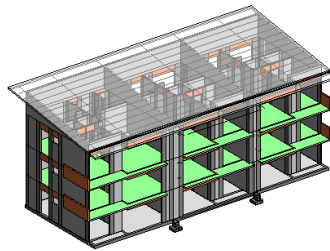
**Figura 53.** Movimiento inducido en modelo con peso en una sola esquina.  
Fuente: Autoría propia.

### Cuadro 16. Resumen de movimientos observados en el modelo 3

Prueba	Período	Descripción del movimiento
1	0,5 s	Al tener iguales cargas distribuidas en dos esquinas opuestas se observa como el modelo oscila integralmente, es decir, todo el cuerpo en el mismo sentido aparentemente.
2	0,5 s	Al cargar una sola esquina, se puede observar que el modelo experimenta una torsión hacia la izquierda, siguiendo el movimiento de la plataforma.

Fuente: Autoría propia.

### Modelo 4



**Figura 54.** Modelo simple 4

Fuente: Autoría propia, Autodesk Revit 2019.

**Hipótesis a comprobar:** Al entrar la estructura en periodo de prueba se podrán observar las deformaciones.

**Escala:** Se utiliza una escala 1:200.

**Material:** MDF con uniones de silicón y cola de madera.

Ahora, se presenta una secuencia de imágenes dónde se puede apreciar el movimiento inducido en el modelo, así como un cuadro resumen con los efectos observados:



**Figura 55.** Movimiento inducido en modelo de edificio  
Fuente: Autoría propia.

**Cuadro 17.** Resumen de movimientos observados en el modelo 4

Prueba	Período	Descripción del movimiento
1	0,05 s	Los materiales utilizados son tan rígidos que el modelo solo experimenta vibración.

Fuente: Autoría propia.

## Herramientas adicionales

Con el fin de complementar el funcionamiento de la mesa sísmica se desarrolló una herramienta visual, en Python 3.8, llamada eTectonic. Dicha herramienta permite observar los gráficos de los movimientos reproducidos por el aparato, incluyendo los movimientos armónicos simples y los nueve sismos predeterminados. Adicionalmente, en la herramienta se puede observar el manual de uso de la mesa sísmica, el origen del proyecto y sus creadores.

Además, se incorporó otro Arduino Mega que procesa los datos recibidos por un acelerómetro externo, de tipo Gy-521 que se tenía disponible en la Escuela, el cuál registra las aceleraciones de la plataforma o del modelo, según su ubicación. A continuación se muestra una foto del sensor dentro de su carcasa:



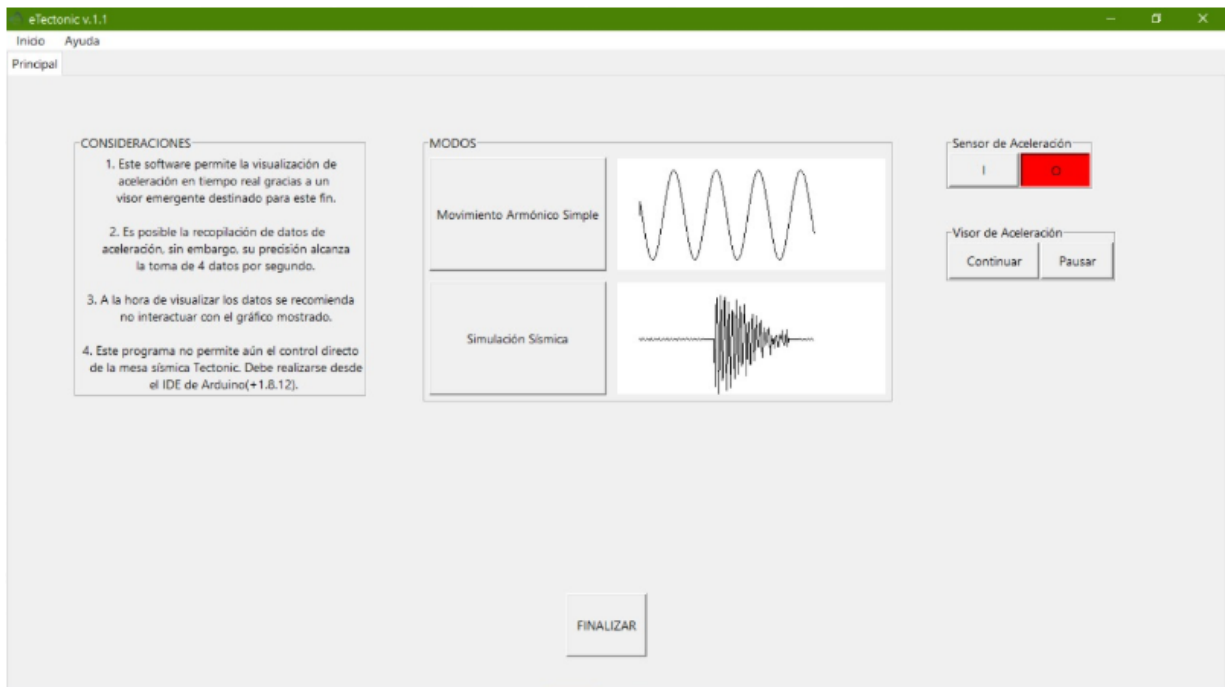


**Figura 56.** Sensor utilizado para el acelerómetro  
Fuente: Obando, 2018

Con el sensor se puede observar en tiempo real el movimiento producido gráficamente. Cabe mencionar que el sensor se debe clocar como se indica en el case, respetando el eje x y el eje y, ya que este es capaz de medir el desplazamiento en los tres ejes (x, y y z) y también funciona como giroscopio, midiendo dos direcciones de giro. Esto es posible con referencia al código elaborado por Schoeffler (2017).

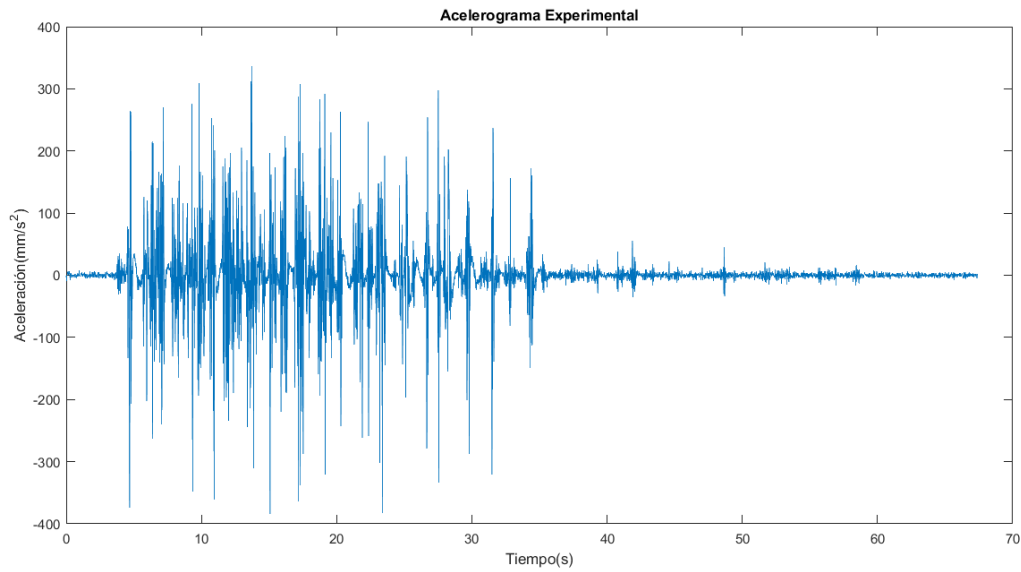
Adicionalmente, la herramienta permite guardar los datos para utilizarlos en otro momento, si así se necesita. Igualmente, si no se desea utilizar el acelerómetro se puede desactivar en la interfaz o bien, no conectarlo.

A continuación se muestra una vista general de las funciones de la herramienta:



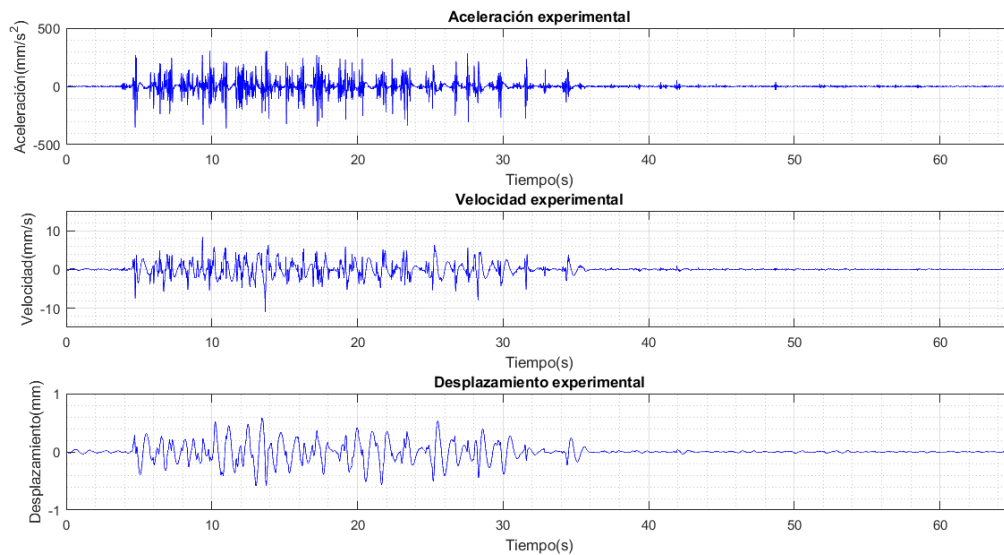
**Figura 57.** Vista general de la herramienta gráfica.  
Fuente: Autoría propia.

A continuación se muestra un gráfico generado con los datos obtenidos a partir de la medición del sismo de Cinchona:

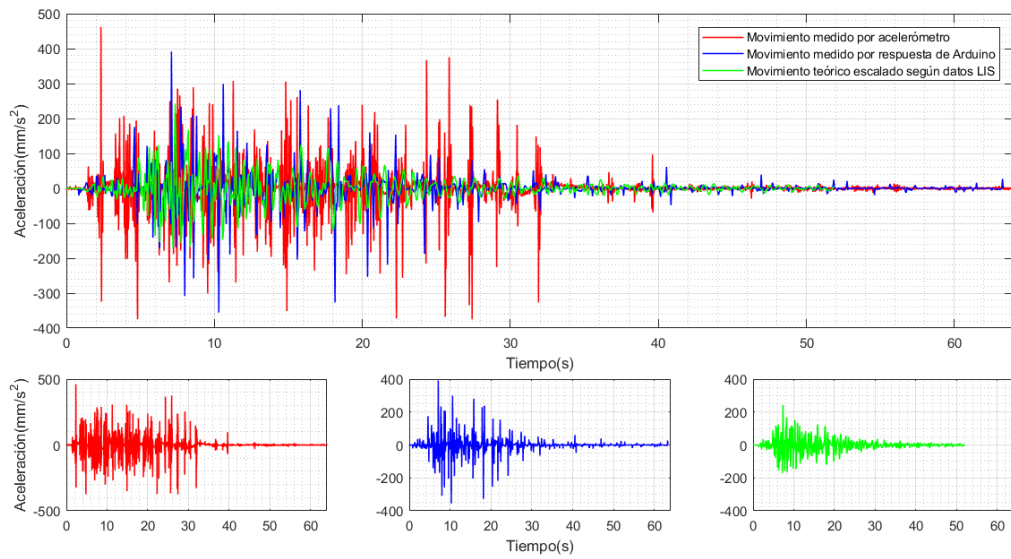


**Figura 58.** Acelerograma generado a partir de los datos de aceleración del sensor instalado  
Fuente: Autoría propia, MATLAB.

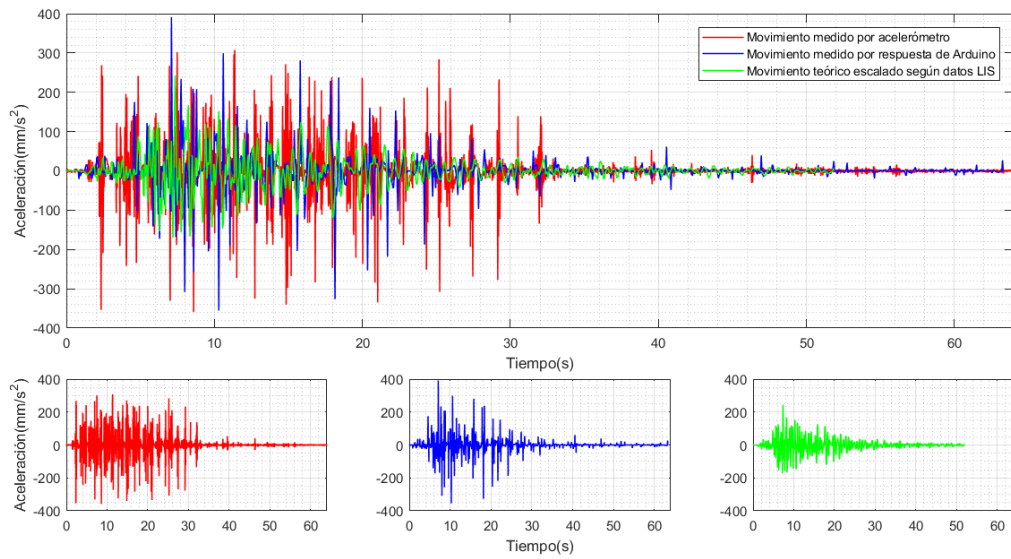
A partir de dichos datos, se genera la línea de fenómenos a través del tiempo para compararlo con la figura 21, referente al sismo teórico de Cinchona.



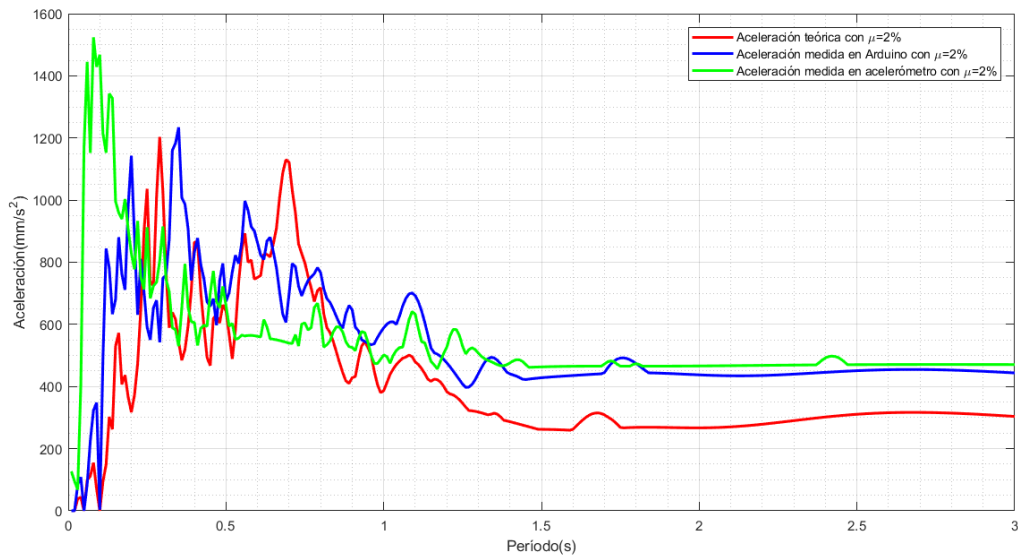
**Figura 59.** Aceleración, velocidad y desplazamiento según datos obtenidos del sensor.  
Fuente: Autoría propia, MATLAB.



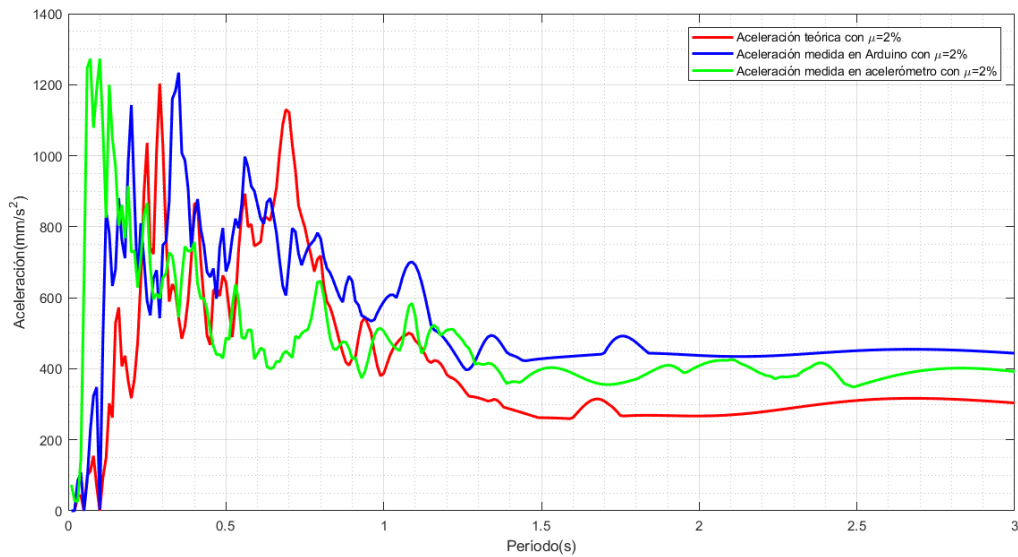
**Figura 60.** Comparación entre datos de aceleración medidos e ideal  
 Fuente: Autoría propia, MATLAB.



**Figura 61.** Comparación entre datos luego de ejecutar un filtro del rango (0,1-20 Hz)  
 Fuente: Autoría propia, MATLAB.



**Figura 62.** Espectro de respuesta de aceleración sin filtro aplicado  
Fuente: Autoría propia, MATLAB.



**Figura 63.** Espectro de respuesta de aceleración con filtro de rango (0,1-20) Hz  
Fuente: Autoría propia, MATLAB.

# Análisis de los resultados

Para el diseño y construcción de una mesa sísmica se deben considerar diversos factores, para que esta funcione de una manera similar a la realidad, de tal manera que pueda ser utilizada fielmente para demostrar fenómenos a nivel de enseñanza de grado, o bien, para ser utilizada en investigación.

Lo primero que se debe considerar es que la estructura principal sea lo suficientemente rígida para que al ejercer algún peso externo la estructura no sufra deformaciones importantes, lo cual no es un problema gracias a la resistencia del material seleccionado. Por su densidad, estabilidad y a la necesidad de soldar algunas de sus uniones, se decidió utilizar tubo cuadrado estructural de 5x5x0,3 cm.

Como se puede observar en el apéndice 1, el período natural de la estructura diseñada es de 0,049 segundos, sin considerar los refuerzos que unen las patas de la mesa, los cuales aumentan la rigidez por consecuente disminuye el período natural de la estructura. Se decidió reforzar la estructura para aumentar su rigidez, al modelar y aplicar un análisis modal de esta nueva configuración de estructura en el programa Robot Structural se obtuvo el nuevo período de la mesa, el cual es de 0,03 s. Esto es importante, ya que, el menor período reproducido es de 0,05 s y si el período de la estructura coincide con un período externo, esta puede entrar en resonancia generando vibraciones según lo indicado en el artículo de Peralta (2009).

Para evitar efectos indeseados se hace uso de un sistema de control de vibraciones, en caso de que el motor provoque alguna. Dicho control se obtiene al colocar una cama de un material visco elástico, en este caso un elastómero para disipar las vibraciones únicas del motor. Sin embargo según lo observado en las pruebas es estable y no genera alteraciones elevadas que puedan inducir algún movimiento a los modelos a escala probados. Además de acuerdo con su fabricante (StepperOnline, 2019b) el driver que controla el motor podría dañarse si recibe vibraciones de entre 10 y 50 Hz (0,1-0,02 s), por lo tanto para evitar algún inconveniente se decidió colocarlo contiguo a la mesa dentro de un case de computadora restaurado, junto a los demás componentes electrónicos. De acuerdo con lo ilustrado en un curso de prevención y control de la contaminación acústica (Universidad de Vigo, s.f.) se tomaron medidas preventivas como separar el motor de la estructura sujetándolo a una placa mediante tornillos, en voladizo; además, se colocaron cuadros de hule en todas las uniones posibles que podrían afectar el correcto desempeño de la mesa sísmica, dentro de estas zonas se incluyen: la unión entre los rieles y el cuerpo de la mesa, entre el patín y la plataforma de movimiento y la unión entre placa de soporte del motor y este mismo. Esto se efectuó con el afán de evitar la propagación de ondas.

Ahora bien, los 15 períodos que se reproducen como movimiento armónico simple (que se encuentran en un rango de 0,05 s a 3,0 s de período fundamental) fueron dados según las indicaciones en el marco teórico, según el UCIST, dónde se señala que las mesas sísmicas

deben tener un funcionamiento entre 0 y 20 Hz. Además, según el Código Sísmico de Costa Rica (2010) los factores espectrales dinámicos son dados típicamente para períodos entre 0,01 s y 10,0 s, de tal forma que los escogidos se encuentran dentro de dicho rango. También se debe considerar la cantidad de ciclos que se pueden reproducir en 30 segundos (duración del movimiento programado), de tal manera que se puedan repetir varias veces para observar el comportamiento de los elementos puestos a prueba.

Al querer reproducir diversos períodos armónicos o sismos, que es un conjunto de MAS, se necesita un sistema mecánico que lo permita sin costo alguno. Este criterio le da mayor ventaja a la alternativa seleccionada, que consiste en el uso de un motor a pasos con un driver controlador y un microcontrolador. Esta opción es útil porque mediante Arduino, como microcontrolador, se puede reproducir cualquier movimiento, limitado a la capacidad del motor; específicamente por la velocidad máxima que este pueda entregar. Con la función definida en la figura 24, se obtienen los pulsos electrónicos que deben ser enviados al driver para ser reproducido por el motor. A su vez, se puede observar que es una ecuación confiable ya que tiene un coeficiente de correlación R igual a 0,99.

Las acciones mencionadas anteriormente no se cumplen con las otras alternativas, por eso se descartan. Si bien es cierto estas son funcionales, no presentan la capacidad de la alternativa que fue desarrollada y permitió de manera acertada la reproducción de los movimientos. El sistema biela es simple de utilizar, sin embargo, si se quieren realizar cambios de periodo debe ser ajustado manualmente con el variador de frecuencias, pero lo limita a solo reproducir movimientos armónicos y no movimientos sísmicos. El servomotor, por su lado, sí permite reproducir los movimientos mencionados, sin embargo, queda limitado al software brindado por la empresa fabricante y no puede ser modificado. Esto demuestra que el uso de fuentes de código abierto, permite el desarrollo de proyectos específicos y que en parte fue un aspecto que durante el tiempo del proyecto llegó a facilitar su ejecución.

Existen factores que pueden generar discrepancias entre lo programado en el Arduino y lo reproducido por el motor, se obtiene como resultado la necesidad de las calibraciones mostradas en la figura 26 y en el cuadro 13. Entre ellas se puede mencionar la conversión de pulsos generados a nivel computadora, ya que las señales enviadas pueden desajustarse en el trayecto al Arduino, al haber un retorno más lento. Además, cabe destacar que los datos fueron obtenidos directamente de los reproducidos realmente por el motor, registrados en el Arduino. En esta transferencia de datos pueden interferir errores asociados a la incertidumbre del equipo.

Se utiliza un driver DM860Y para motores de bucle abierto, los cuales resultan más económicos respecto a motores de paso híbridos o de bucle cerrado. De acuerdo con StepperOnline (2019b), su fabricante, el driver tiene una capacidad de recepción de tres microsegundos y en el procesamiento de datos se envían mínimo 250  $\mu$ s por lo que podría existir una diferencia de aproximadamente 1 % de retraso. Además, al tener bucle abierto también posee una precisión de paso de  $\pm 5$  % o bien  $\pm 2$  pasos (StepperOnline, 2019a), pudiendo afectar el resultado. Cabe mencionar que según la configuración del sistema motriz de la mesa se tiene una precisión del

desplazamiento en su paso de  $0,0125 \text{ mm}$ , lo cual debe incidir en que los posibles desfases por efecto de la precisión propia del motor y de su driver sean pequeños y estos no afecten en gran medida el movimiento establecido a reproducir.

Otro aspecto que cabe mencionar es que las amplitudes seleccionadas se obtienen por la capacidad mecánica del motor. Según gráficos de eficiencia de la propia empresa fabricante, el motor seleccionado posee una velocidad máxima de  $25 \text{ rev/s}$ , lo cual significaría que linealmente sería posible alcanzar una velocidad de  $125 \text{ mm/s}$ . Por efecto del voltaje entregado, el motor permite una velocidad máxima de  $25 \text{ mm/s}$  o  $5 \text{ rev/s}$  con  $1g$  de aceleración. Es una velocidad relativamente baja, ya que el potencial del motor no se pudo utilizar en toda su capacidad.

Como se puede observar en el anexo 1, el torque entregado es alto al utilizar una velocidad baja, el cuál depende, entre varias cuestiones, del voltaje disponible y las señales enviadas por el microcontrolador y el driver. Entre menor sea el torque generado menor eficiencia se estará desarrollando por el motor, por lo tanto este pierde parte de su capacidad. Como se muestra en el anexo 2, para mover  $60 \text{ kg}$  se necesitan aproximadamente  $0,16 \text{ Nm}$ . El motor tiene capacidad de  $12 \text{ Nm}$  por lo que se está utilizando tan solo  $1.33 \%$  de su capacidad máxima. Se debe comprender que conforme se aumenta la velocidad de operación del motor, el torque entregado irá disminuyendo, por lo que no existe manera de que toda la capacidad del motor sea aprovechada durante los movimientos de la mesa sísmica, ya que las velocidades son variables en cada paso dado por el motor prácticamente.

Otro aspecto externo que puede afectar en el funcionamiento es la capacidad del equipo eléctrico. Según StepperOnline (2019b), el motor necesita operar con  $6 \text{ A}$  y  $80 \text{ V}$  en corriente directa o  $12 \text{ A}$  y  $60 \text{ V}$  en corriente alterna, sin embargo, en el país no es posible adquirir una fuente de poder con dichas características. Actualmente se está trabajando con máximo  $1,7 \text{ A}$  y  $48 \text{ V}$  que si bien es cierto permite el funcionamiento del equipo, no admite explotar su capacidad.

A pesar de las fuentes de error mencionadas anteriormente, al aplicar la corrección lineal a cada uno de los conjuntos de datos (ver cuadro 13) se puede observar que todos los movimientos armónicos simples programados y reproducidos son confiables al cumplir con un error admisible de menos de  $5 \%$  por ciclo.

Ahora bien, en la figura 27 y figura 29 se pueden observar los datos obtenidos de la programación del sismo de Cinchona (puede observar los demás sismos en el apéndice 3), los cuáles aparentemente tienen la misma forma que el sismo teórico. Sin embargo, se observa diferencia en las amplitudes de los desplazamientos en el tiempo de su duración.

Las diferencias observadas pueden tener diversas fuentes de error; entre ellas las mencionadas anteriormente, relacionadas al equipo, para la calibración de los movimientos armónicos simples. Además de esto, se deben considerar errores asociados a los tratamientos matemáticos necesarios para llegar al movimiento del sismo. Los registros del acelerógrafo para cada sismo tienen una gran cantidad de puntos de aceleración medida, ya que estos evidencian; al menos



en los registros obtenidos del LIS, 200 muestras por segundo. En un proceso de simplificación, verificando de manera gráfica solamente, que no se perdiera la amplitud y frecuencia de las aceleraciones se decidió empaquetar en grupos de diez muestras. Dichos paquetes fueron promediados y se simplificó en un orden de magnitud los datos, sin que se perdiera la forma de ningún registro. Por ejemplo, para el registro de aceleraciones del sismo de Cinchona se tenían alrededor de 25 000, al realizar la simplificación en el tratamiento del acelerograma se redujo a 2500 muestras. Por otro lado, en el momento de enviar los datos a Arduino, estos sobrepasaban la capacidad de su memoria por lo que fue necesario empaquetar nuevamente los datos en grupos de tres, a excepción de Jacó y Nicoya que fue en grupos de cinco. Dichos factores provocan la suavización en las curvas y los desfases observados. Las reducciones eran necesarias ya que se necesitan entre 1500 y 3000 ordenadas para describir el movimiento de un sismo (Chopra, 2014). A pesar de las distintas manipulaciones efectuadas a los datos sí se cumple con estos parámetros mínimos indicados por el autor.

Para verificar que el sismo programado tenga un efecto similar al real se deben comparar cualitativamente ambos espectros de respuesta como se muestra en la figura 30 y la figura 31. Si bien es cierto, se observa un desfase entre ellos, lo cual es esperable porque existe un desfase también en los movimientos crudos de los sismos (real y reproducido por el motor), no obstante se observa el mismo patrón pero con mayor o menor amplitud, según el caso.

Otro punto a destacar es que de acuerdo con Crisafulli, F. y Villafane, E. (2020) al realizar un espectro de respuesta se involucra una gran cantidad de cálculos para resolver el equilibrio dinámico de la historia (variación en el tiempo) del sismo. En dichos cálculos se debe incluir una serie de parámetros que pueden afectar el resultado, entre ellas, las mismas características de los registros como: los valores máximos del movimiento (aceleración, velocidad y desplazamiento), contenido de frecuencias del sismo, duración del movimiento fuerte, mecanismo de generación del sismo, magnitud, tipo de suelo, entre otras.

Como se indica anteriormente, según la literatura, factores como la duración del movimiento fuerte pueden alterar el resultado del espectro de respuesta y al observar la figura 27, se nota una ampliación en el tiempo de duración del sismo, se obtiene como resultado la alteración del espectro. No obstante, se observa el mismo efecto provocado por lo que se pueden clasificar los sismos como acertados.

Según los espectros obtenidos, para el sismo de Cinchona se tiene un desplazamiento máximo teórico de aproximadamente 13,8 mm y en el resultante de 14,7 mm, lo cual es un error de 6,1 % aproximado. Por parte de la aceleración máxima, el sismo real presenta una aceleración de  $1200 \text{ mm/s}^2$  y el resultante de  $1240 \text{ mm/s}^2$ , lo cual representa un error aproximado de 3,33 %.

Ahora bien, con la mesa sísmica en un estado funcional se procedió con la verificación de las hipótesis planteadas para cada modelo estructural, de manera cualitativa, como se había planteado inicialmente. Al ser una etapa inicial se plantean modelos simples destinados a la explicación de comportamientos básicos de las estructuras a nivel educativo. De acuerdo con



Harris y Sabnis, 1999, este tipo de modelos educativos deben ser muy simples. Por esto, se decide trabajar con las características establecidas para los modelos elásticos, los cuales son los más simples y se realizan semejando propiedades geométricas pero no de material, en su lugar, se utilizan materiales sencillos de trabajar y de fácil acceso.

Debido a lo anterior se plantearon los primeros tres modelos simples en tamaño real, los cuales funcionan para demostrar principios básicos relacionados a rigidez (en función de la altura) y peso. Adicionalmente, se planteó la construcción de un modelo de un edificio real, ya que solo comparte las características geométricas con respecto al modelo estructural, con escala 1:200 para respetar el espacio máximo disponible en la plataforma, el cual es de 55 cm x 55 cm. El modelo corresponde a un edificio que se construirá próximamente en el país y se encuentra en etapa de diseño. El diseño original fue brindado por la empresa Estructuras S.A.

Cuando un modelo de un grado de libertad con una masa concentrada  $m$  y rigidez  $k$  es perturbado de su posición de equilibrio, oscila frecuentemente en su período natural (Chopra, 2014). Para obtener el período fundamental de las estructuras propuestas se realizó un análisis modal en el programa Robot Structural. De forma general se puede mencionar que entre más esbelto sea un modelo más alto será el período, como en el caso del modelo 1. Por otro lado, en el modelo 2, al comparar un marco esbelto con un marco de un edificio de dos pisos con columnas cortas la estructura gana rigidez en comparación con la primera, al tiempo que ve disminuido así su período. Es en esta dirección en que apuntan las pruebas realizadas, el de comprobar o demostrar cómo se ven afectadas las estructuras por sus propiedades y por el movimiento al que son sometidas.

Al ser mediciones cualitativas estas se registraron en videos donde observa claramente el movimiento provocado por cada excitación. Al no ser posible plasmarlos se utilizan las regeneraciones de imágenes, donde se pretende demostrar la excitación presentada por los modelos, acompañadas de los cuadros 14, 15, 16 y 17, dónde se describen los movimientos observados. Cabe destacar que solo se muestran los períodos en los que se observo mayor perturbación en el modelo.

En el modelo 1, se realizaron las pruebas utilizando el mismo peso, de tal manera que la única variable influyente sea la rigidez, de tal modo que cuando existe mayor altura la rigidez disminuye. En el cuadro 14 se observa que conforme se aumenta el período, un elemento más alto entra en perturbación. En el Código Sísmico de Costa Rica (2010), en su sección 7.4.5, se sugiere que el período de una estructura depende de la cantidad de pisos que la compone, o sea de su altura. En general, la cantidad de pisos es directamente proporcional al período por lo que entre más alto sea el modelo, y se mantenga su masa, mayor debe ser su período natural tal. El único que no presenta oscilación es el modelo de 15 cm, solo vibración, esto debido a su alta rigidez (en comparación con los otros), lo cuál disminuye el período, sin embargo, no se puede probar con un período más bajo puesto que supera las capacidad mínima de la mesa sísmica. Además de ello, se comprueba que mientras un elemento presenta una considerable alteración de su estado natural, los otros se mantienen mucho menos sensibles al movimiento,

debido a que su período no coincide con el de la fuente provocadora (Peralta, Reyes y Godínez, 2009).

Con respecto a la prueba del modelo 2, se utilizan modelos con las mismas características. Uno representa un marco de un piso de un edificio esbelto y el otro un marco de un edificio de dos pisos. El segundo marco presenta mayor estabilidad, ya que cuando se agrega el mismo peso a los dos modelos, el marco esbelto presenta pandeo lateral, mientras que el marco de dos pisos mantiene su estado de equilibrio. (Ver figura 46 y 48). El marco de dos pisos, por su naturaleza, está más reforzado que el esbelto, lo cual aumenta significativamente la rigidez y refleja una disminución en su período natural (ver figuras 41 y 43).

Otro fenómeno predominante en el modelo 2 es el aumento del período con la masa, ya que al probarlos sin sobrecarga los modelos presentaban alteración con períodos más bajos que cuando se agregó peso (ver cuadro 15). Teóricamente, el período es inversamente proporcional a la frecuencia, la cual es inversa (en una raíz) a la masa sobre el modelo, provoca un aumento en el período natural al aumentar la masa. Además, el modelo reforzado sin el peso solo presentaba vibración, en cambio, al agregarle el peso de 6 *kg* se pudo observar una mayor oscilación cuando se reprodujo un período mayor. Cabe resaltar que al probar el período natural en el cual vibraba sin peso, ya la estructura no presentaba un efecto significativo al no coincidir su período nuevo con el reproducido.

En cuanto al modelo 3, se realizaron pruebas con el mismo período pero utilizando cargas en dos distintas ubicaciones. Al colocar dos cargas puntuales iguales en esquinas opuestas la carga se distribuye, y permite que el marco se desplace en la misma dirección en sus cuatro esquinas (figura 52). Sin embargo, al colocar toda la carga en una sola esquina se presenta una clara torsión en el modelo, en dirección del movimiento de la mesa (ver figura 53), tal y como se esperaba. Es importante aclarar que la posición de la carga sobrepuesta no afectó considerablemente el período de la estructura, no obstante, la respuesta de la estructura ante la carga si fue diferente como se mencionó líneas atrás.

Adicional a los modelos simples se construyó un modelo de un edificio, como se mencionó anteriormente. Sin embargo se utilizó MDF para su construcción, una madera comprimida similar al cartón que cumplía con el espesor escalado y puede ser cortado en cualquier forma; además, se utilizó cola de madera para las uniones. Asimismo, el modelo real consiste en un modelo muro-columna unido entre sí con un entrepiso, todo de concreto, lo cuál incrementa la rigidez del modelo. Como se muestra en el cuadro 17, el modelo solo experimentó un poco de vibración en el período de 0.05 s (el más bajo posible reproducido por la mesa).

La estructura del modelo está conformada por muros principalmente, por lo tanto tendrá un período fundamental cercano a 0,15 s, esto según el apartado 7.4.5 del Código Sísmico de Costa Rica (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010); con la salvedad de que esta primera estimación puede aproximarse o no a la verdadera, sin embargo, como se mencionó líneas atrás, solo presentó una fuerte vibración con dicho período y conforme se

aumentaba el período reproducido en la prueba, menos intensidad se notaba en su vibración. A pesar de que esta condición no era la esperada, se puede atribuir que la estructura presenta una rigidez bastante alta para su tamaño, además de que el pegamento utilizado para unir las piezas del modelo fue cola para madera que cuando puede adquirir una alta resistencia. Lo mencionado induce a pensar que la estructura tuviera en la realidad un período natural bajo y que por esto su desplazamiento relativo fuera prácticamente nulo debido a que no hay deformaciones internas por la rigidez de la estructura (Crisafulli, F and Villafañe, 2020).

Ahora bien, respecto a la inclusión del sensor de aceleración este se utilizó para cuantificar el movimiento del sismo de Cinchona, el cual ha sido el sismo modelo durante la ejecución del proyecto. Como se observa en la figura 58, donde se muestra el acelerograma obtenido se puede decir que los datos de aceleración máxima en contraste con el acelerograma esperado son relativamente los mismos, no obstante, al efectuar el tratamiento de este, integrando los valores para obtener los datos de velocidad y desplazamiento se nota que el comportamiento no es el mismo, ni siquiera cercano a los datos que se utilizaron para reproducir el sismo.

Profundizando aún más en su análisis se compara con el acelerograma obtenido por la toma de datos de respuesta entre el motor y el Arduino, y se notan magnitudes similares mas no una forma fiel entre ambas. Estas diferencias se pueden atribuir a la manera de adquisición de los datos, también a que la mesa no reproduzca perfectamente las ondas e incluso a que la vibración generada por el motor presente alta variabilidad de frecuencias. Ya que si se compara su amplitud en ciertas zonas parecen ser similares, pero, en otras no. Ahora bien, al derivar los datos de respuesta obtenidos, el gráfico de velocidad es prácticamente el mismo en comparación con los datos suministrados al motor, sin embargo, para los datos de velocidad integrados de los datos del sensor, no existe cercanía alguna con los datos originales. De esta forma se puede decir que, si bien existen datos recibidos por el sensor de aceleración estos no parecen representar el movimiento efectuado en la mesa sísmica, existe una posibilidad de que al utilizar un sensor de mayor calidad se logren mejores resultados.

El inicio de las pruebas con acelerómetro se atribuyó las inconsistencias a vibración ocasionada por el motor, con un ajuste e inclusión de mayor disipación en las ondas se logró percibir menor ruido, sin embargo, su eliminación completa no parece posible. Como una forma de mitigar los efectos no esperados se filtraron los datos mediante una transformada rápida de Fourier y filtro tipo 'bandpass' en el programa MATLAB, permite solamente el paso de frecuencias del rango de 0,1 Hz - 25 Hz, típico del tratamiento de acelerogramas de movimientos sísmicos (E. Carreño, 1999). Con esto se logró reducir el ruido, no obstante, su forma no llegó a ser la esperada, ya que el filtrado no cambiara su geometría de forma general, solo en las frecuencias especificadas.

Debido al escenario obtenido, se procedió a ejecutar dos filtrados adicionales: uno fijando el límite superior en 20 Hz y el otro en 15 Hz, esto se observa en la figura 63. Estos valores se determinaron arbitrariamente para observar el efecto en el espectro de respuesta conforme se reducía el impacto de frecuencias mayores. Como se observa en las figuras mencionadas existe

una reducción absoluta de por lo menos  $400 \text{ mm/s}^2$  para la primera variación y de  $500 \text{ mm/s}^2$  en la segunda. Con esto se tiene que la eliminación de datos de mayor frecuencia disminuye el efecto del sismo reproducido en la mesa sísmica para estructuras de período natural bajo, del rango de 0,1 s a 0,25 s aproximadamente. El hecho de que exista un mayor pico al considerar mayores frecuencias se puede relacionar directamente con la vibración que es extendida a la plataforma por medio del tornillo de bolas que se encuentra unido al motor, de esta forma se explicaría al menos el porqué de ese fuerte efecto en períodos de vibración bajos. Como se mencionó, con las modificaciones realizadas en la unión del motor con el cuerpo estructural sí se redujo la vibración, mas, se reitera que la eliminación completa de estas ondas indeseadas no parece ser posible, al menos con el material utilizado.

De manera inmediata la diferencia de estos gráficos de espectros de respuesta podría estar ligada más bien a la naturaleza de la obtención de los datos, ya que específicamente el sensor registra cualquier vibración que perciba y si dichas vibraciones llegaran incluso a superar en frecuencia la aceleración causada por el movimiento o ser muy similares, estas podrían encontrarse combinadas o superpuestas. De ser así, a pesar de haber aplicado los filtros en los rangos típicos, el error podría estar perfectamente dentro de los valores considerados; a pesar de no ser frecuencias tan altas, puede impactar en lo obtenido por el espectro de respuesta sísmica.

Otra variable que podría afectar el resultado obtenido puede relacionarse con el registro de los datos, específicamente con un desfase en el momento de inicio de la toma de datos. Por la manera en que se incluyó el sensor de aceleración, en el cual los datos son procesados por un microcontrolador distinto del que controla el motor, la toma de registros de aceleración inicia antes del movimiento del motor; de manera que no exista una pérdida de datos si el sensor empieza a registrar valores luego de que la simulación ya ha iniciado. Con el fin de solo considerar dentro del rango de datos a analizar los registros que sí representan el movimiento, la determinación del inicio de la simulación se realizó numéricamente, esto con el fin de mitigar un posible desfase.

Se debe mencionar que el sensor siempre que se encuentre conectado emite datos de aceleración incluso si este se encuentra inmóvil. Estos datos poseen valores cercanos a cero. Cuando estos datos comienzan a aumentar su magnitud abruptamente es que se considera que el sensor está tomando mediciones propias de la simulación. Esto se realiza de manera analítica en MATLAB al reconocer ese aumento de los valores de aceleración y no de una manera gráfica observando los datos en un acelerograma, por ejemplo. Con esto se busca eliminar cualquier forma de selección subjetiva por parte de una persona y definir de manera concreta las aceleraciones que si interesan.

A partir de recomendaciones de Contreras y Clavijo (2011), el autor indica que lo adecuado es utilizar sensores del tipo de transductores de desplazamiento lineal, esto con el fin de medir desplazamiento en la plataforma y obtener datos precisos.

Como una reiteración del último comentario, Damci y Sekerci (2019), utilizan en su prototi-

po de mesa sísmica un potenciómetro lineal para la medida de desplazamientos y de aceleración, lo cual reafirma que el sensor idóneo para medir al menos el movimiento de la plataforma debe ser del tipo ya mencionado y no exactamente un acelerómetro. Con esto no se quiere decir que se elimine por completo su uso, sino, que puede considerarse para la cuantificación de aceleración en estructuras por desarrollar y de interés para la docencia e investigación, como lo muestran estos mismos autores.

# Conclusiones

En respuesta al problema planteado inicialmente se desarrolló la mesa sísmica Tectonic, para la Escuela de Ingeniería en Construcción. El equipo está compuesto por un cuerpo de acero estructural que soporta el peso ejercido por los demás componentes. Dentro de los más importantes puede mencionarse una placa de acero A36 de 60x60 cm, la cual se desliza a través de rieles de guía lineal por la acción de un motor paso a paso que genera desplazamientos, a velocidades dadas, a través de un tornillo de bolas; todo el sistema controlado con un microcontrolador que envía el código del movimiento deseado al driver del motor, que a su vez es alimentado por una fuente de poder externa. Además se incorporó otro microcontrolador que recibe los datos de un acelerómetro que puede tomar los datos en tiempo real.

Tectonic es capaz de reproducir 15 movimientos armónicos simples de distinto período en el rango de 0,05 s a 3,0 s; con un error máximo de 0,32 % por ciclo. Asimismo, puede reproducir nueve de los sismos históricos ocurridos en Costa Rica, los cuales fueron comprobados a través de la comparación de los espectros de respuesta del sismo real y el programado, y se obtienen errores de desplazamiento y aceleración máxima de 3,33 % y 6,1 % aproximadamente.

Entre las características mecánicas más importantes se alude a una sobrecarga permitida de 80 kg, con una aceleración pico de  $9,8 \text{ m/s}^2$  y una velocidad pico de 25 mm/s, dadas por las capacidades del motor, además de un desplazamiento de  $\pm 9 \text{ cm}$ .

Los errores presentados en el resultado de los movimientos reproducidos tienen que ver con la transformación de datos a pulsos electrónicos generados a nivel computadora. También, los errores matemáticos inducidos pueden atribuirse a los tratamientos realizados a los datos para cumplir con la capacidad del arduino y del motor.

Un aspecto externo que puede afectar en el funcionamiento es la capacidad del equipo eléctrico. Actualmente, el equipo no está trabajando con una alimentación óptima. El motor necesita operar con 6 A y 80 V en corriente directa, sin embargo lo está haciendo con 1,5 A y 48 V que permite su funcionamiento pero no aprovecha su máximo potencial.

Se realizó un estudio con modelos simples de un grado de libertad para comprobar la ocurrencia de comportamientos básicos de las estructuras. Se demuestra que puede perturbarse el estado natural de un modelo cuando su período natural coincide o es similar, como en la mayoría de las pruebas realizadas, al de la fuente que le provoca una excitación.

Se comprobó que cuando se disminuye la rigidez de un modelo, al aumentar su altura, este aumentará también su período natural. Asimismo, un marco de un piso esbelto presenta menor estabilidad que un marco de dos pisos de la misma altura, este último aumenta su rigidez, y por consiguiente disminuye su período. Por otro lado, fue evidente que cuando se agrega peso

sobre un modelo, su período tiende a aumentar.

También se comprueba que un marco en tres dimensiones puede presentar torsión al conservar la carga en un solo punto, sin embargo, si la carga es distribuida sus cuatro esquinas se deformarán en la misma dirección. Reforzando el hecho de que la posición de las masas en una estructura afecta su respuesta ante un movimiento sísmico.

Fue verificado que los modelos a escala reducida de sistemas muro-columna presentan una rigidez muy elevada que, a su vez, disminuye su período. Este será cercano a cero con un desplazamiento relativo casi nulo, y queda por fuera de las capacidad de la mesa.

Por último, la utilización de un acelerómetro para la medida de aceleración inducida por el desplazamiento de la mesa sísmica no parece ser el más adecuado, ya que, según los resultados obtenidos no representa de manera precisa los parámetros de aceleración, velocidad o desplazamiento para un movimiento específico. Es posible que un sensor de desplazamiento lineal permita resultados más certeros.

## Recomendaciones

Finalmente el trabajo desarrollado en este proyecto permite enumerar las siguientes recomendaciones:

1. Garantizar el correcto anclaje de la mesa para evitar desplazamientos y reducir el riesgo de las vibraciones indeseadas en el movimiento.
2. Cambiar el microcontrolador principal por uno con mayor memoria SRAM disponible para un mayor procesamiento de datos. Se podrían considerar microprocesadores del tipo Teensy o incluso aspirar a Arduino PRO Familia Portenta que se utilizan en procesos industriales automatizados.
3. Adquirir una fuente de poder de corriente directa, en el extranjero, de 80 V y 6 A para mejorar el funcionamiento óptimo del motor, o producir una fuente de corriente alterna a nivel nacional de 60 V y de 6 A por fase.
4. Considerar el cambio del tornillo de bolas por otro con mayor paso, migrar de 5 mm a 10 mm o más, de tal forma que se puedan reproducir velocidades mayores.
5. Si se desea aumentar el número de grados de libertad de la mesa, es imperante duplicar el sistema mecánico en otra dirección, debe colocarse un sistema sobre otro, la estructura rígida construida como base tiene la capacidad estructural para soportar otro.

6. Cambiar los tornillos que unen la plataforma al tornillo de bolas por tornillos avellanados de 5 mm para que estos no interfieran al colocar un modelo que abarque el centro de la plataforma.
7. Realizar estudios cuantitativos con modelos reales a escala reducida que tengan un período mayor a 0,05 s, necesaria para poder observar algún efecto con los movimientos reproducidos por la mesa sísmica.
8. Incorporar un sensor del tipo transductor lineal de desplazamiento para la medición certera del desplazamiento, velocidad y aceleración de la plataforma, tal como un potenciómetro lineal. Es posible también agregar un 'encoder' rotacional, adaptado al tornillo de bolas para medir el movimiento rotacional del motor, el cual es convertido a lineal por medio de este sensor.
9. Como un afán de alcanzar movimientos sumamente exactos y obtención de datos de mucha mayor calidad, es fundamental la inclusión de profesionales en áreas como computación o electrónica, que faciliten la creación de un software de control y obtención de datos más intuitivo y automatizado. Esto permitiría proyectar la mesa sísmica no solo como un instrumento para enseñanza, sino, como un aliado en la investigación y el desarrollo de proyectos de mayor escala.



# Referencias

- Bernal, Mauricio, Jorge Aponte y Julián Carrillo (2015). «Sistemas de control para mesas vibratorias: una revisión crítica». En: *Ingeniería y Desarrollo*.
- Chopra, Anil K. (2014). *DINÁMICA DE ESTRUCTURAS*. ISBN: 9788578110796. DOI: 10.1017/CB09781107415324.004. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- Climent, Álvaro y col. (2008). *Proyecto Resis II: Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica*. Inf. téc.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (2010). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Ed. por Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. 4ª. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica. ISBN: 978-9977-66-234-3.
- Contreras, L. y J. Clavijo (2011). «Diseño, modelamiento y simulación de una mesa sísmica unidireccional hidráulica». Tesis doct.
- Crisafulli, F and Villafañe, E (2020). *ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO*. URL: <http://fing.uncu.edu.ar/catedras/sismoresistente/archivos/isr-espectros.pdf>.
- Damcı, E. y Şekerci (2019). «Development of a Low-Cost Single-Axis Shake Table Based on Arduino». En: *Experimental Techniques* 43.2, págs. 179-198. ISSN: 17471567. DOI: 10.1007/s40799-018-0287-5.
- DBcover (s.f.). *Soluciones antivibración*. URL: <https://dbcover.com/es/soluciones-acusticas/antivibracion/>.
- De Buen López, Oscar (s.f.). *Diseño de estructuras de acero, placas*. Inf. téc. Universidad Nacional Autónoma de México. URL: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12608/DISE%7B%5C~%7BN%7D%7D0%20DE%20ESTRUCTURAS%20DE%20ACERO%7B%5C%7D2C%20PLACAS.pdf?sequence=1>.
- Dyke, Shirley J (2000). «Current Directions in Earthquake Engineering Education». En: *Proceedings of the ASCE Engineering Mechanics Conference*. URL: [https://engineering.purdue.edu/UCIST/publications/publications/emd00\\_educ\\_web.pdf](https://engineering.purdue.edu/UCIST/publications/publications/emd00_educ_web.pdf).
- E. Carreño B. Bravo, A. Suarez y J.M. ¿Tordesillas (1999). «Registro y Tratamiento de Acelerogramas». En: *Física de la tierra*. ISSN: 0214-4557.
- Fernández, José (s.f.). *Ecuaciones y Gráficas del Movimiento Armónico Simple*. URL: <https://www.fisicalab.com/apartado/ecuaciones-graficas-mas>.
- García, Vicente (1999). *Lección-2 Las señales patrón*. URL: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/leccion-2-las-senales-patron>.
- Harris, H y G Sabnis (1999). *Structural Modeling and Experimental Techniques, Second Edition*. DOI: 10.1201/9781420049589.
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica (2015). *Cuadro explicativo de la Intensidad JMA*. URL: <http://www.lis.ucr.ac.cr/2254>.
- (2020). *Descargas de registros sísmicos en formato lis*. URL: <http://www.lis.ucr.ac.cr/Descargas>.
- Lozano, Pedro (2013). «Diseño de un simulador sísmico». Tesis doct. Universidad de Almería.

- Montanaro, María (2002). «SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS DE GRAN ALTURA». En: *Informes de la Construcción*, Vol. 53, nO 477, Argentina.
- Murthy, C. V. R. y col. (2012). «Some Concepts in Earthquake Behavior of Buildings». En: *IITK-GSDMA Project on Review of Seismic Codes, & Preparation of Commentary and Handbooks*.
- Obando, Gilbert (2018). «Propuesta de actualización d un sistema embebido para lograr mediciones remotas de vibraciones en estructuras de puentes». Tesis doct. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Peralta, José, Porfirio Reyes y Alfredo Godínez (2009). «El fenómeno de la resonancia». México D.F.
- Pin, Johan (2017). *Escala de Mercalli*. URL: <https://sites.ipleiria.pt/seismicknowledge/tag/escala-de-mercalli/>.
- Póveda, Alonso (2017). *Geodinámica y Amenazas Naturales*.
- Quanser (2016). *Bench-scale Shake Tables*.
- Red Sismológica Nacional (2019a). *¿Cuál es la diferencia entre magnitud momento y magnitud Richter?* URL: <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/2326-cual-es-la-diferencia-entre-magnitud-momento-y-magnitud-richter>.
- (2019b). *Sismología*. URL: <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia?start=15>.
- (2019c). *Sismos históricos*. URL: <https://rsn.ucr.ac.cr/actividad-sismica/sismos-historicos/26-sismologia/sismos-historicos>.
- Renda, Vito y col. (1999). «Ensayo Sísmico de Estructuras». En: *Física de la tierra*. ISSN: 0214-4557. DOI: 10.5209/rev\_FITE.1999.n11.12954.
- Romilly, Jean-Edme (2016). «Vibration or Oscillation». En: *The Encyclopedia of Diderot & d'Alembert Collaborative Translation Project* 17, págs. 850-855. URL: <https://artflsrv03.uchicago.edu/philologic4/encyclopedie1117/navigate/17/3207/>.
- Schmidt, V y C Quirós (2007). «CARACTERIZACIÓN DE LOS REGISTROS ACELEROGRÁFICOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA SÍSMICA DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA». En: *Revista Ingeniería*.
- Schoeffler, Michael (2017). *Tutorial: How to use the GY-521 module (MPU-6050 breakout board) with the Arduino Uno*. URL: <http://www.mschoeffler.de/2017/10/05/tutorial-how-to-use-the-gy-521-module-mpu-6050-breakout-board-with-the-arduino-uno/>.
- Sears, W. y Mark. W. Zemansky (2009). «Física Universitaria con física moderna». En: *PEARSON EDUCACIÓN*.
- Servicio Geológico Mexicano (2017). *SISMOS: Causas, características e impactos*. URL: <https://www.gob.mx/sgm/es/articulos/sismos-causas-caracteristicas-e-impactos?idiom=es>.
- StepperOnline (2019a). *Full Datasheet E Series Nema 34 Stepper Motor Bipolar 1.8deg 12.0 Nm*. URL: <https://www.omc-stepperonline.com/download/34HE59-6004S.pdf>.
- (2019b). *User Manual for Full Digital Stepper Driver*. URL: <https://www.omc-stepperonline.com/download/Y-series-open-loop-stepper-driver.pdf>.

- (s.f.). *Pull out torque curve of 34HE59-6004S*. URL: [https://www.omc-stepperonline.com/download/34HE59-6004S%7B%5C\\_%7DTorque%7B%5C\\_%7DCurve.pdf](https://www.omc-stepperonline.com/download/34HE59-6004S%7B%5C_%7DTorque%7B%5C_%7DCurve.pdf).
- Universidad de Vigo (s.f.). *CAPÍTULO 2 EL AISLAMIENTO ACÚSTICO*. URL: [http://gcastro.webs.uvigo.es/PFC/Capitulo%7B%5C\\_%7Ddos%7B%5C\\_%7Dd.htm](http://gcastro.webs.uvigo.es/PFC/Capitulo%7B%5C_%7Ddos%7B%5C_%7Dd.htm).
- University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST) (s.f.). *A Cooperative Effort in Earthquake Engineering Education*. URL: <https://engineering.purdue.edu/UCIST/default.html>.
- Veloso, Cristian (2018). *ARDUINO MEGA 2560 CARACTERÍSTICAS*. URL: <https://www.electrontools.com/Home/WP/arduino-mega-2560-caracteristicas/>.

# Apéndices

En la presente sección se adjuntan 4 apéndices que permiten tener una mejor visión de lo presentado anteriormente. En el apéndice 1 se muestra el diseño estructural realizado para el cuerpo de la mesa sísmica. En el apéndice 2 se muestran los resultados gráficos de la calibración de los movimientos armónicos simples programados. En el apéndice 3 se muestra el comportamiento a través del tiempo de los sismos programados, así como su error y la comparación de los espectros de respuesta correspondientes. El apéndice 4 muestra el costo final aproximado de los materiales utilizados en la construcción de la mesa sísmica.

## Apéndice 1. Diseño estructural del cuerpo principal

### Diseño de la placa principal

La placa consiste en un elemento rectangular de 60x60 cm, con apoyos en los laterales en sus tercios, es decir, a cada 20 cm, como se muestra en los planos de taller. De acuerdo con De Buen López, s.f., esta placa, cuyas cargas se ejercerían tangencialmente es un elemento a compresión atiesado.

Proponiendo un espesor ( $t$ ) de  $\frac{1}{4}$ " se procede a comprobar la carga crítica de pandeo que esta puede soportar antes de comenzar el proceso de fluencia, y posteriormente obtener el momento que soportaría que debe ser mayor al obtenido en el modelo realizado.

Datos iniciales:

- Acero A36
- $F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$
- $E = 2038901,8 \text{ kg/cm}^2$
- $t = 1/4" = 0,635 \text{ cm}$
- $b = 60 \text{ cm}$
- $L = 20 \text{ cm}$

## Estimación de ancho efectivo

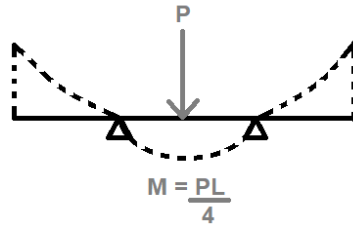
$$b_e = \frac{2713t}{\sqrt{f_y}} \left[ 1 - \frac{593}{(b/t)\sqrt{f_y}} \right] \leq b$$
$$\frac{b}{t} = \frac{60}{0,635} = 94,49$$
$$b_e = \frac{2713t}{\sqrt{f_y}} - \frac{17026,24t}{f_y} \leq b$$
$$b_e = \frac{2713 \cdot 0,635}{\sqrt{2530}} - \frac{17026,24 \cdot 0,635}{2530} \leq b$$
$$b_e = 29,98cm \cong 30cm \leq b$$

## Esfuerzo critico de pandeo

$$\sigma_{(cr)} = \frac{4\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$
$$\sigma_{(cr)} = \frac{4\pi^2 \cdot 2038901,8}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,635}{60}\right)^2$$
$$\frac{f_y}{2} = 1265kg/cm^2 \gg \sigma_{cr} = 825,61kg/cm^2$$
$$P_{(cr)} = A_e \sigma_{(cr)}$$
$$P_{(cr)} = b_e \cdot t \cdot \sigma_{(cr)}$$
$$P_{(cr)} = 30cm \cdot 0,635cm \cdot 825,61kg/cm^2$$
$$P_{(cr)} = 15727,87kg$$

## Determinación del momento

Se obtiene el caso del sector central:



**Figura 1.** Diagrama de momentos  
Fuente: Autoría propia.

$$M_n = 8,42 \text{ kg-cm}$$

Fuente: Robot structural.

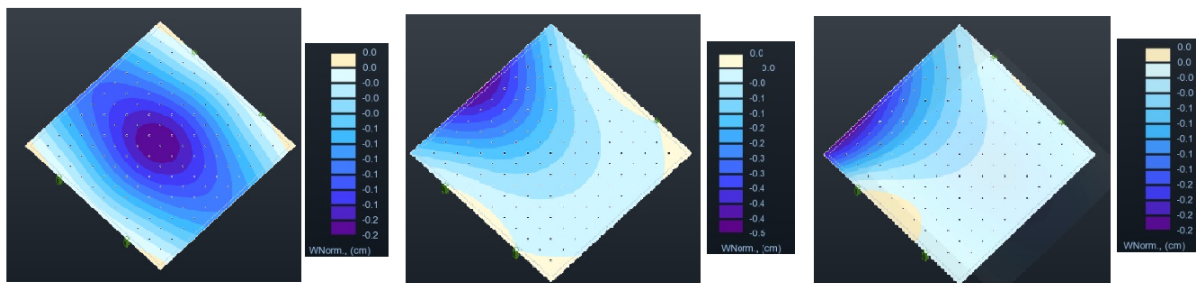
$$M_u = \frac{15725,84 \cdot 20}{4}$$

$$M_u = \frac{15725,84 \cdot 20}{4}$$

$$M_u = 786393,5 \text{ kg} - m = 7,86 \times 10^5 \text{ kg} - m \geq M_n$$

## Revisión de deformaciones

Para verificar que cuando se coloquen cargas de 85 kg sobre la placa esta no presente deformaciones importantes que puedan intervenir en la respuesta de los modelos, se realizó un modelo estructural en Robot Structural de Autodesk, dónde se observa que la deformación máxima (ante cargas puntuales) varía entre 2 mm en el centro, hasta 5mm en los bordes, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2.** Deformaciones en la placa.  
Fuente: Autoría propia.

## Diseño de los elementos estructurales

En este caso se considera que la estructura, que se puede observar en los planos de taller, se asemeja a una mesa que cuando soporta cargas importantes es un elemento estructural, sin embargo no se considera como sismoresistente, ya que básicamente es un equipo y no una edificación.

### Asignación de cargas y combinaciones de carga

Según la sección 6.2.1 del *Código Sísmico de Costa Rica 2010* los factores de seguridad que se le deben aplicar a las estructuras se encuentran en las siguientes combinaciones de carga:

$$CU = 1,4CP \quad (1)$$

$$CU = 1,2CP + 1,6 \cdot f_R CT + 1,6CE \quad (2)$$

Donde:

CU = carga última de diseño.

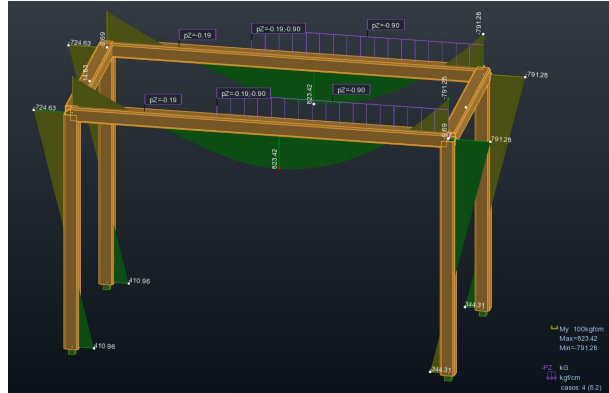
CP = carga permanente.

CT = carga temporal

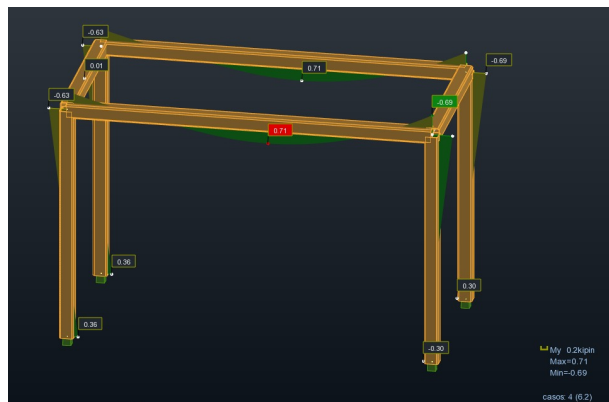
En las cargas anteriores se contemplan como cargas permanentes el peso propio de los elementos además de sobrecargas muertas como el peso de los rieles, la placa, el tornillo de bolas y el motor; además, como cargas temporales se contemplan 85 kg como máximo de los modelos que se quieran probar.

### Diseño de elementos

Para ello se realizó un modelo de la estructura en Robot Structural para obtener las cargas máximas a las cuales está sometido.



**Figura 3.** Modelo con cargas aplicadas y reacciones axiales de los elementos  
Fuente: Robot Structural.



**Figura 4.** Modelo con momentos en los elementos  
Fuente: Robot Structural.

### Columnas

Para el diseño de columnas se utiliza un análisis por flexocompresión, el cual contempla tanto la cargas axiales como los momentos a los que se ve sometido el elemento. Para ello lo que se hace es asegurar que las sumatorias de las cargas son inferiores a lo que resiste la columna. Lo anterior se presenta con la siguiente ecuación:

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \leq 1,0 \quad (3)$$

Donde:

$P_u$ : carga axial

$M_{u_{x/y}}$ : momentos flexionantes

$P_n$ : resistencia nominal axial

$M_{n_{x/y}}$ : resistencias nominales a flexión



A continuación se mostrará el procedimiento paso a paso de una de las columnas diseñadas. Cabe destacar que las las fuerzas actuantes fueron obtenidas del modelo de Robot Structural, como se muestra en las figuras 3 y 4. Además, las secciones elegidas fueron seleccionadas por medio de un proceso de iteración hasta encontrar la más pequeña del mercado que cumpla las condiciones.

Primeramente, se establecieron los parámetros generales de la columnas:

**Cuadro 1.** Parámetros generales de la columna 4

Sección	HSS - 2"x2"x0.125"
fy de la sección	A36
Claro de columna (ft)	2,62
k	1
k*L (ft)	2,62
Pu (kips)	0,15
Mu-x (kip-ft)	0,0125
Mu-y (kip-ft)	0
E	29000 ksi
$\phi$	0,9

Fuente: Autoría propia.

**Cuadro 2.** Datos generales de la sección

Ag (in <sup>2</sup> )	0,84
rx (in)	0,76
ry (in)	0,76
Zy (in <sup>3</sup> )	0,58
Zx (in <sup>3</sup> )	0,58

Fuente: Autoría propia.

Posteriormente se calcula la resistencia básica de la columna en ambos ejes, basándose en la relación de esbeltez:

$$\text{Relación de esbeltez} = \frac{k \cdot L}{r_{(xoy)}^2} \quad (4)$$

$$Pe = \frac{\pi^2 \cdot E}{\frac{kL}{r_{(xoy)}}^2} \quad (5)$$

**Cuadro 3.** Resultados de resistencia básica

kL/rx	41,37
kL/ry	41,37
Pe x (kips)	167,25
Pe y (kips)	167,25

Fuente: Autoría propia.

Rige la mayor por lo que la relación de esbeltez, pero en este caso ambas son iguales. Luego

se calcula la carga critica de pandeo.

$$F_{cr} = 0,658 \frac{kL}{r\pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} \cdot F_y = 32,90 \text{ksi}$$

Ahora se calculan lo momentos amplificados debido al pandeo de las columnas. Los momentos de la columna en estudio son  $M_1 = 101,89 \text{ kip-ft}$  y  $M_2 = 152,93 \text{ kip-ft}$ .

$$cm = 0,6 - 0,4 \cdot \frac{M_{(menor)}}{M_{(mayor)}} = 0,6$$

Los coeficientes amplificadores son:

$$\beta = \frac{cm}{1 - Pu/Pe} \quad (6)$$

$$\beta_{1x} = \frac{0,6}{1 - 0,15/167,25} = 0,60$$

$$\beta_{1y} = \frac{0,6}{1 - 0,15/167,25} = 0,60$$

Como ambos dan menores a 1, se deja 1 como valor amplificador. Por lo anterior, los momentos amplificados serán los mismos que los Mu. Por último se verifica la ecuación de interacción.

Los momentos nominales son:

$$\phi Mn = 0,9 \cdot fy \cdot Z/12 \quad (7)$$

$$\phi Mnx = 0,9 \cdot 36 \cdot 0,58/12 = 1,57 \text{kip-ft}$$

$$\phi Mny = 0$$

Como la relación entre  $Pu/\phi Pn$  da menor a 0,2 se usa la siguiente ecuación, para la ecuación de interacción:

$$\frac{Pu}{2\phi Pn} + \left[ \frac{Mux}{\phi Mnx} + \frac{Muy}{\phi Mny} \right] \leq 1 \quad (8)$$

$$\frac{0,15}{2\phi 24,87} + \left[ \frac{0,0125}{\phi 0,0125} + 0 \right] \leq 1 \quad (9)$$

$$E.I = 0,008 \quad (10)$$

De esta manera, basándose en el resultado de la ecuación de interacción se dice que la sección propuesta cumple con todas las condiciones.

## Vigas

Para realizar el diseño óptimo correspondiente a las vigas del marco superior, se analizó la viga que se encuentra sometida al mayor momento. Para esto se analizaron todos los momentos en Robot Structural con el fin de obtener el mayor.

Ahora se busca una sección que soporte las cargas a las que se encuentra sometida la viga más crítica. Para esto se utiliza acero A36 con un  $F_y = 36$  ksi y se realiza un proceso de iteración para determinar la sección más óptima. Dicha sección resultó ser HSS - 2" x 2" x 0.125" a continuación se muestra el cálculo para verificar que este perfil de acero logra cumplir la función deseada:

$$\phi M_n = \phi \cdot F_y \cdot Z_x \quad (11)$$

Donde:

Factor de reducción ( $\phi$ ) = 0,9.

Módulo de sección plástico de la sección: ( $Z_x$ ) = 0,58 in<sup>3</sup>.

Por lo tanto, se tiene:

$$\phi M_n = \phi \cdot 36 \text{ ksi} \cdot 0,58$$

$$\phi M_n = 18,79 \text{ kip-in}$$

$$M_u \leq \phi M_n$$

$$0,74 \text{ kip-in} \leq 18,79 \text{ kip-in}$$

Como se puede observar, la sección propuesta logra satisfacer su función al cumplir con la condición mencionada. Cabe destacar, que la sección realmente soporta mucho más de lo que debería soportar, sin embargo no se puede reducir su espesor o sección, puesto que son los más pequeños del mercado aceptados por el CSCR-10.

## Determinación del período natural de la estructura de la mesa

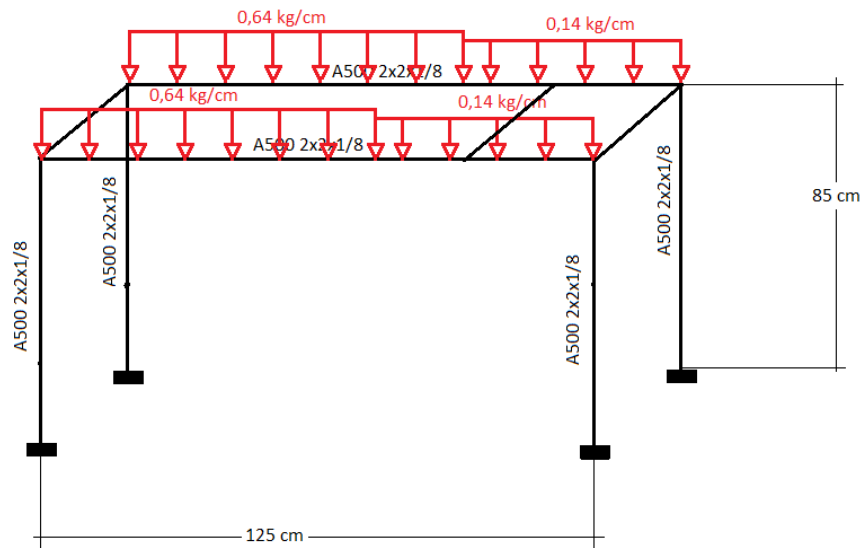
Partiendo del hecho de que se conoce la siguiente ecuación es posible encontrar la frecuencia de la estructura, conociendo la masa que soportará y la rigidez de esta.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Y a partir de conocer el valor anterior determinar el período fundamental de la estructura según la siguiente fórmula:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$$

## Características de la estructura



**Figura 5.** Representación de la mesa con cargas y medidas  
Fuente: Autoría propia

**Cuadro 4.** Propiedades de la sección de la estructura

Propiedad	Valor
Alto	2"
Ancho	2"
Espesor de pared	1/8"
Módulo de Young	29 000 ksi
Segundo momento de área	0,3034 in <sup>4</sup>

Fuente: Autoría propia.

**Cuadro 5.** Cargas a las que se somete la estructura

Tipo	Fuente de carga	Valor
Carga temporal	Modelos a escala	85 kg
Carga permanente	Sistema motriz	24 kg
Carga permanente	Motor y componentes	11 kg
Total de carga		120 kg (0,2645 kip)

Fuente: Autoría propia.

## Rigidez

Se obtiene la rigidez para una columna, la cual posee una longitud de 85 cm (33,4646 in).

$$k_0 = \frac{12EI}{L^3}$$

$$k_0 = \frac{12 \cdot 29000 \text{ ksi} \cdot 0,3034 \text{ in}^4}{33,4646^3 \text{ in}^3}$$

$$k_0 = 2,7856 \text{ kip/in}$$

Por simetría de las columnas y poseer el mismo perfil se tiene que:

$$k = 4 \cdot k_0$$

$$k = 4 \cdot 2,7856 \text{ kip/in}$$

$$k = 11,1424 \text{ kip/in}$$

## Masa

Se obtiene la masa de acuerdo con:

$$m = \frac{W}{g}$$

$$m = \frac{0,2645 \text{ kip}}{386,4 \text{ in/s}^2}$$

$$m = 6,8 \times 10^{-4} \text{ kip/(in/s}^2)$$

## Frecuencia y período

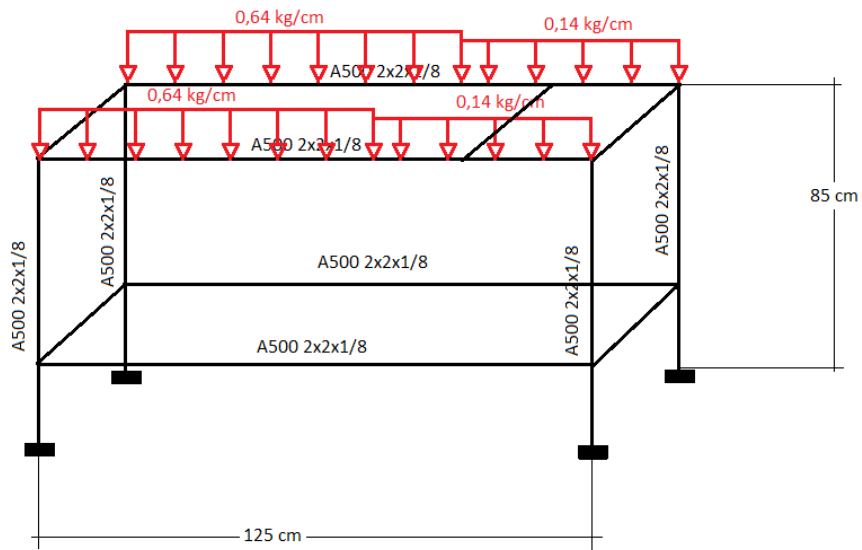
Se obtienen los valores de frecuencia angular, frecuencia y período fundamental de la estructura:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$\omega = \sqrt{\frac{11,1424 \text{ kip/in}}{6,8 \times 10^{-4} \text{ kip/(in/s}^2)}}}$$
$$\omega = 128 \text{ rad/s}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$
$$f = \frac{128 \text{ rad/s}}{2\pi}$$
$$f = 20,373 \text{ Hz}$$

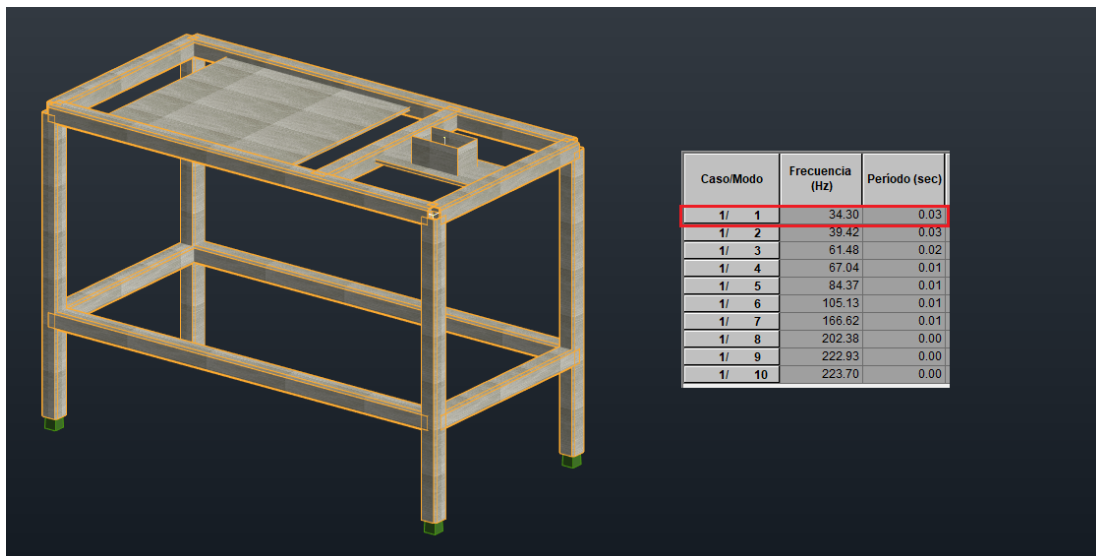
$$T = \frac{1}{f}$$
$$T = \frac{1}{20,373 \text{ Hz}}$$
$$T = 0,049 \text{ s}$$

Debido a las vibraciones ocasionadas por el movimiento de la mesa se decidió aumentar su rigidez, de manera que el período natural de la estructura lograra disminuir y verse menos afectado por el movimiento. De esta forma como se muestra en la siguiente figura se agregaron refuerzos que conectarán las columnas de la mesa:



**Figura 6.** Representación de la mesa con nuevos refuerzos  
Fuente: Autoría propia

Al modelar y aplicar un análisis modal de esta nueva configuración de estructura en el programa Robot Structural se obtuvo el nuevo período de la mesa, el cual es de 0,03 s. Menor al anterior de 0,049 s, calculado.



**Figura 7.** Representación de la mesa con su período natural final  
Fuente: Autoría propia



## Control de vibraciones

Como parte del diseño deben considerarse las vibraciones que se puedan generar en las estructuras debido al movimiento interno del motor. Este problema se puede solucionar con medidas preventivas en la fase de diseño o con medidas correctivas en la fase de funcionamiento. (DBcover, s.f.)

De acuerdo con la Ing. Montanaro (2002), existen dos clasificaciones generales para los sistemas de reducción de vibraciones, ellos son:

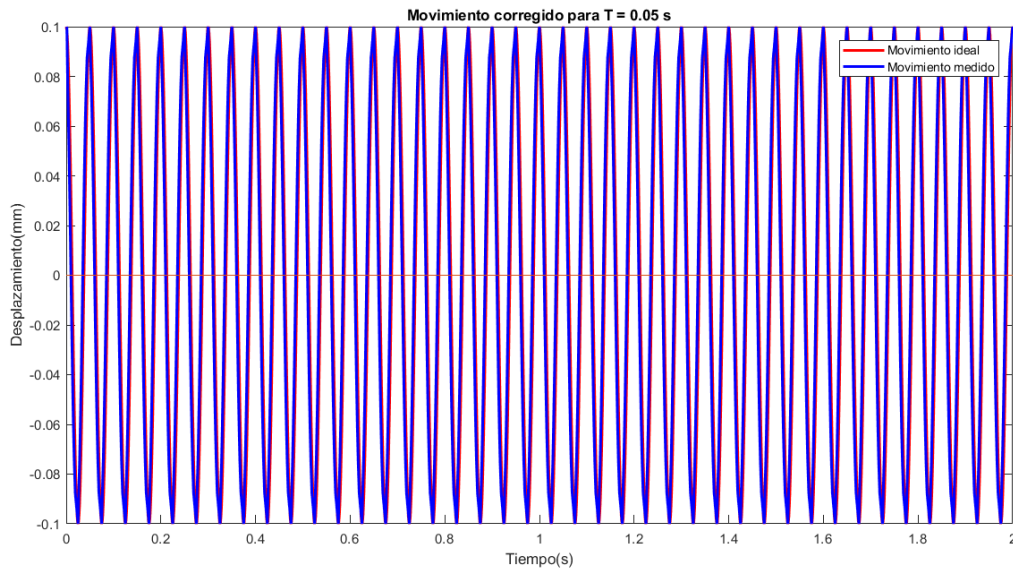
- Sistema de aislación: por lo general se colocan en la base de cada columna, ya sea como parte de la base o aislando a esta, rodeándola con materiales que generen fricción y con ello resistencia al movimiento que disipe la energía.
- Sistema de control de vibraciones: se colocan en el cuerpo de la estructura y no en la base, como el caso anterior. Los más sencillos de ellos son los amortiguadores viscoelásticos conformados por polímeros o sustancias vidriosas que disipan la energía cuando está sujeto a deformación de corte.

Siguiendo la línea de lo mencionado, el sitio dBcover menciona que la mejor forma de aislar las vibraciones es el aislar la fuente generadora de la estructura en este caso el motor. De la misma manera, en el Curso de Prevención y Control de la Contaminación Acústica (Universidad de Vigo, s.f.) se recomienda el uso de sistemas de control de vibradores de caucho, los cuales tienen una menor capacidad de deformación que los metálicos, además brindan una mejor amortiguación interna por la absorción de impacto. A raíz de esto se dan una serie de recomendaciones:

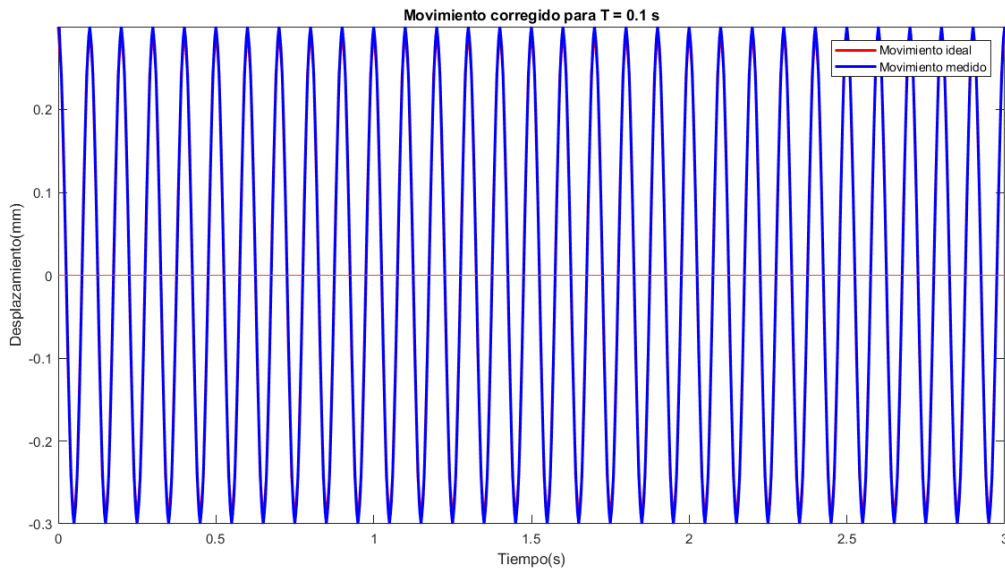
- Reducir las vibraciones de la fuente por medio de suelos flotantes o evitando el contacto directo con la estructura.
- Introducir elementos antivibratorios en la estructura para evitar la propagación de ondas longitudinales.
- Además, se puede cubrir el suelo con materiales elásticos para aislar efectos externos.

Considerando todo lo anterior se propone hacer uso de hule por debajo del motor para eliminar el contacto directo con la estructura y aislar las vibraciones, también por debajo de los rieles que soportan la placa, ya que allí es donde se reflejarían alteraciones por vibración al realizar las medidas (si se diera el caso), así como utilizar hule en las uniones atornilladas para evitar la propagación de ondas longitudinales.

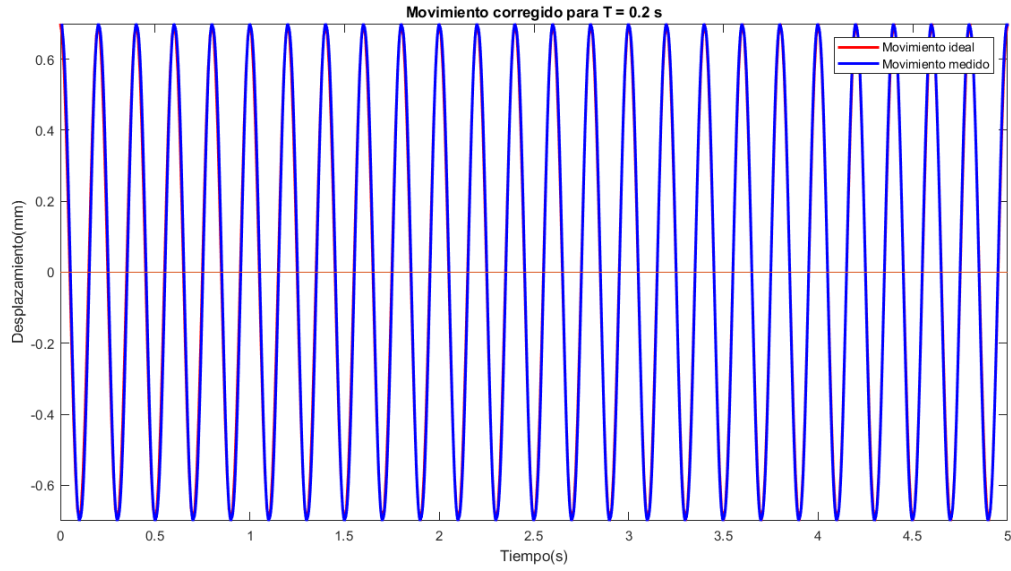
## Apéndice 2. Resultado gráfico de las calibraciones de MAS



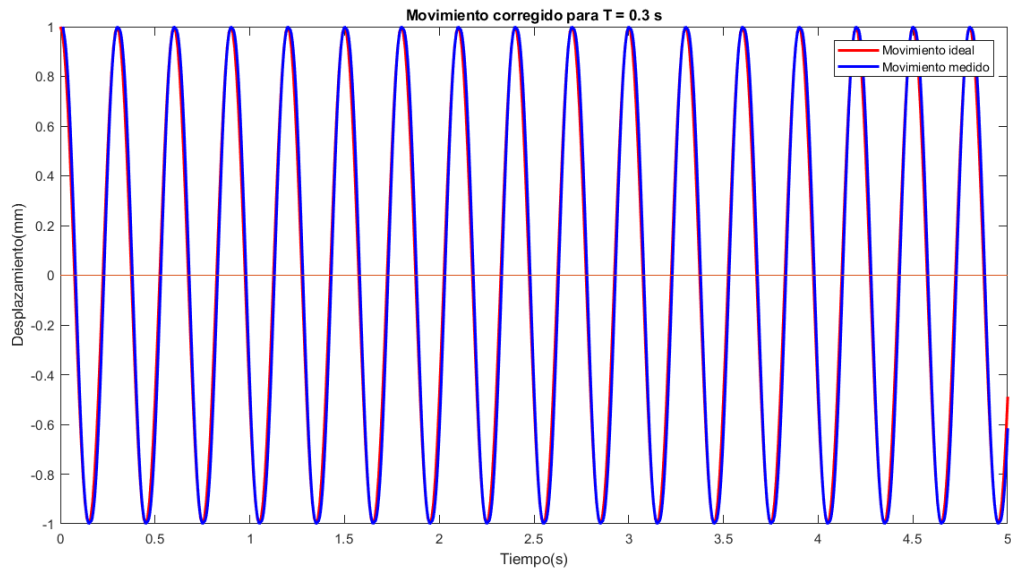
**Figura 8.** Desfase calibrado en el MAS de 0,05s  
Fuente: MATLAB.



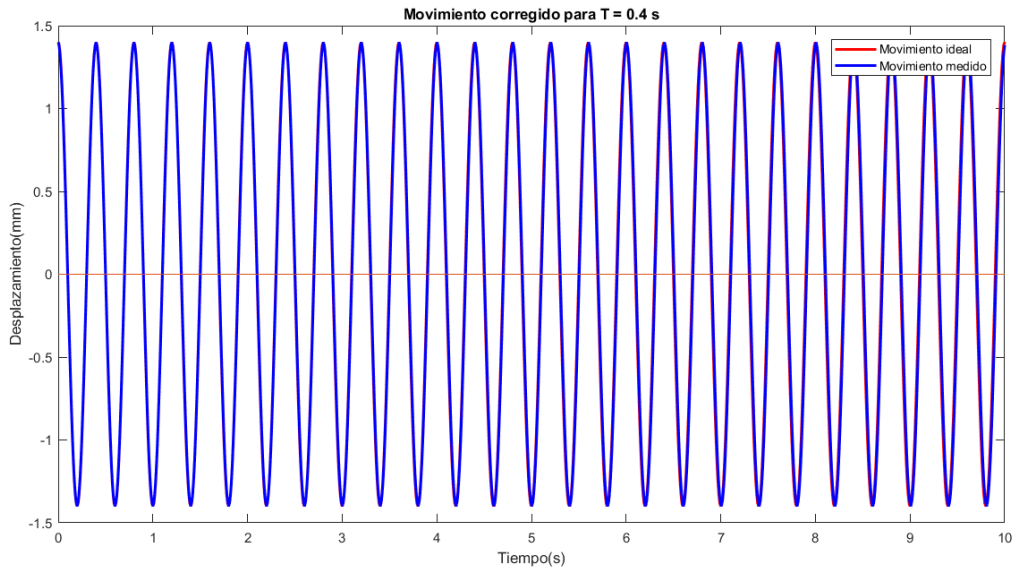
**Figura 9.** Desfase calibrado en el MAS de 0,1s  
Fuente: MATLAB.



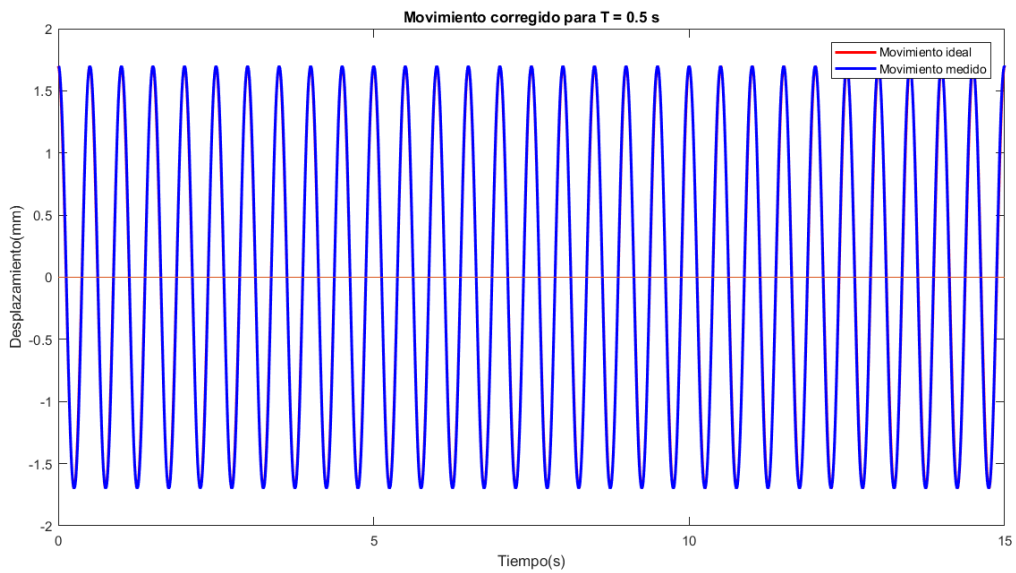
**Figura 10.** Desfase calibrado en el MAS de 0,2s  
Fuente: MATLAB.



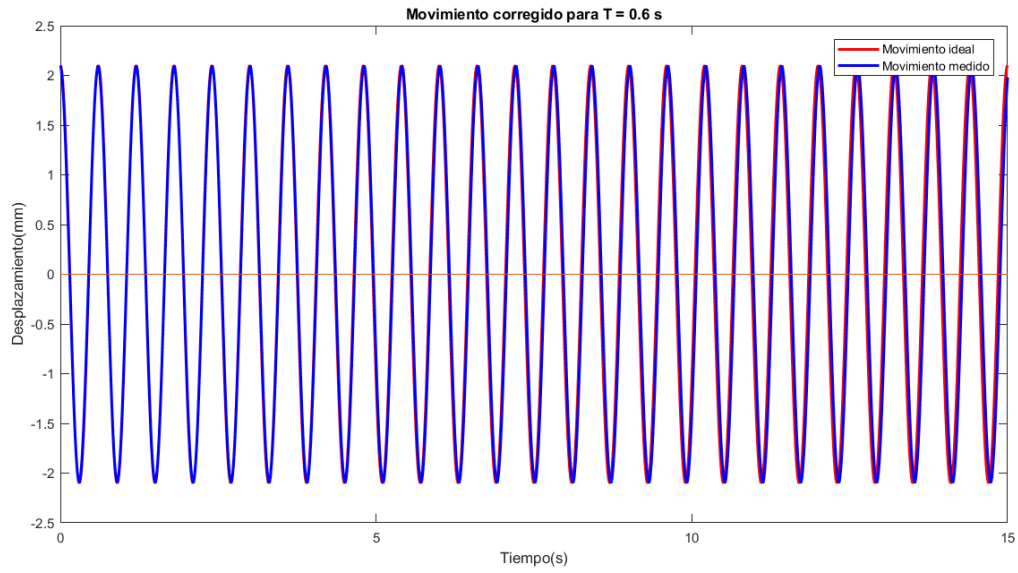
**Figura 11.** Desfase calibrado en el MAS de 0,3s  
Fuente: MATLAB.



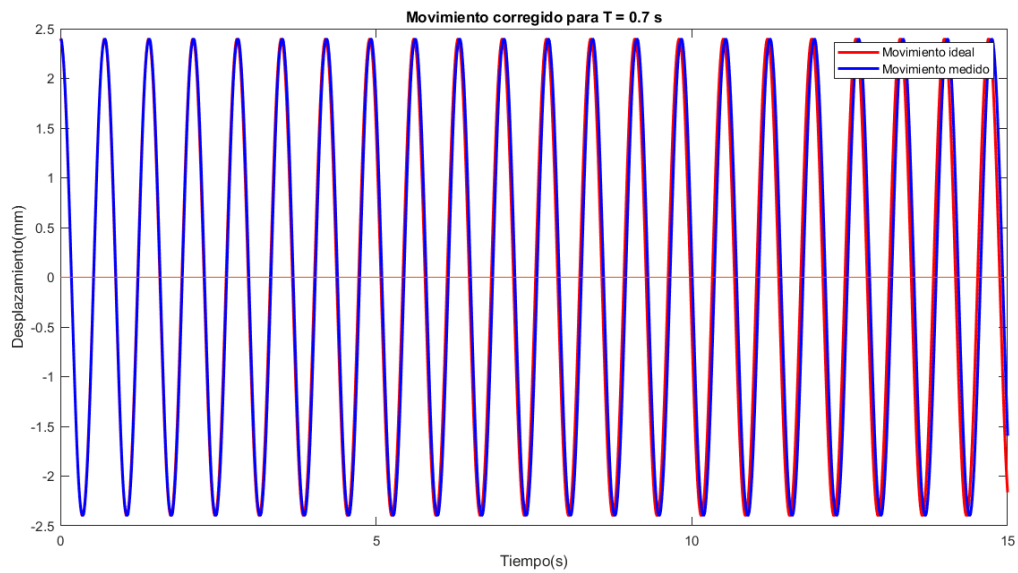
**Figura 12.** Desfase calibrado en el MAS de 0,4s  
Fuente: MATLAB.



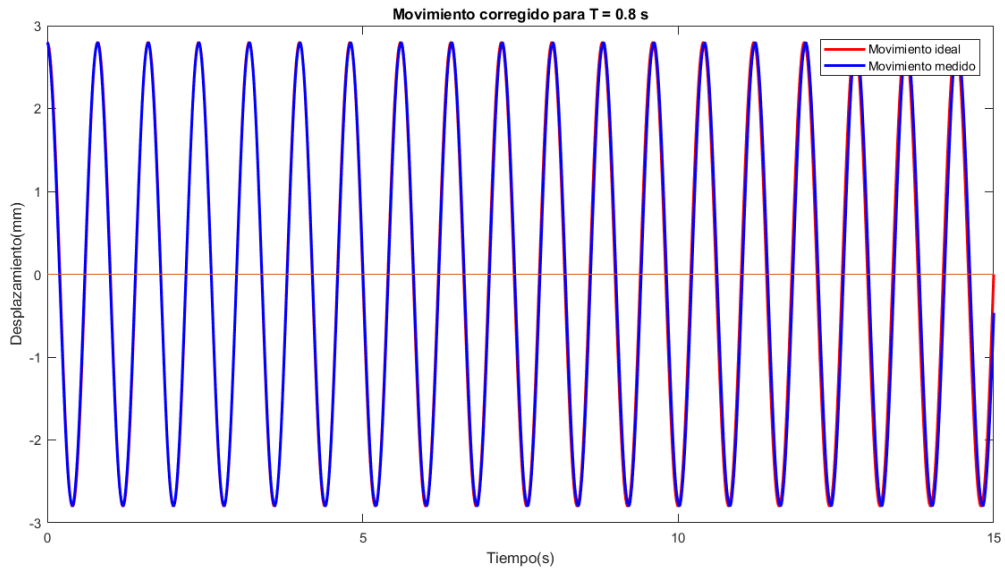
**Figura 13.** Desfase calibrado en el MAS de 0,5s  
Fuente: MATLAB.



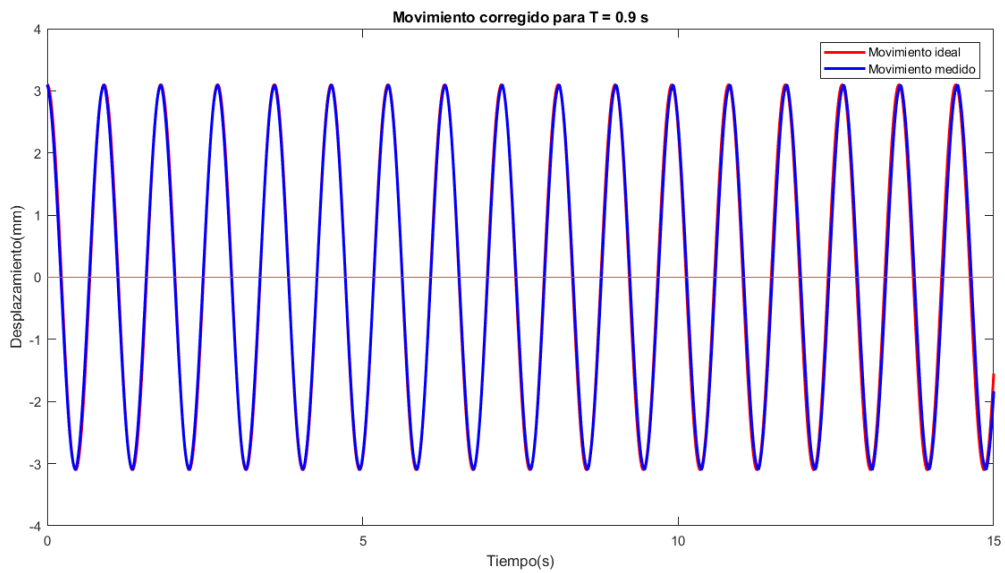
**Figura 14.** Desfase calibrado en el MAS de 0,6s  
Fuente: MATLAB.



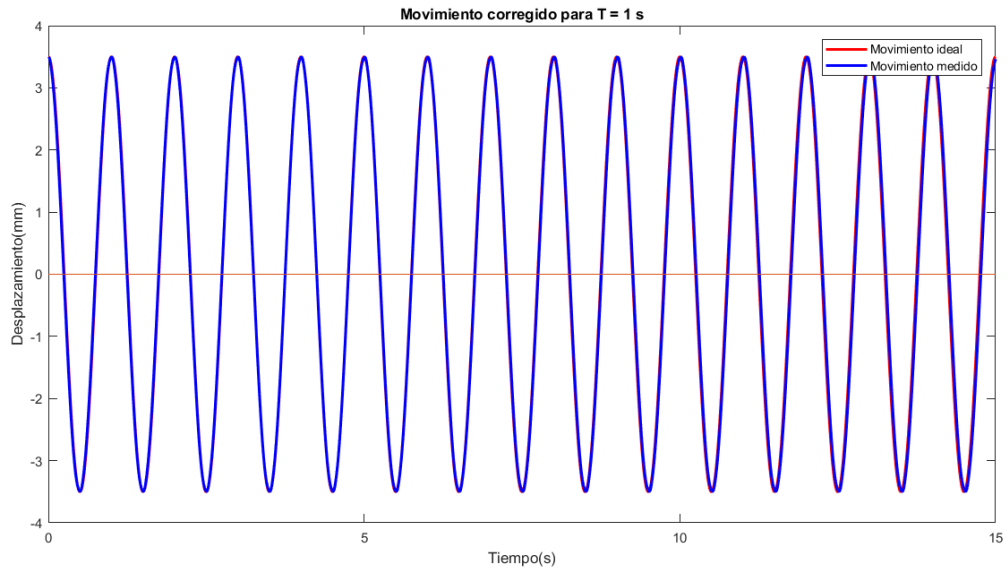
**Figura 15.** Desfase calibrado en el MAS de 0,7s  
Fuente: MATLAB.



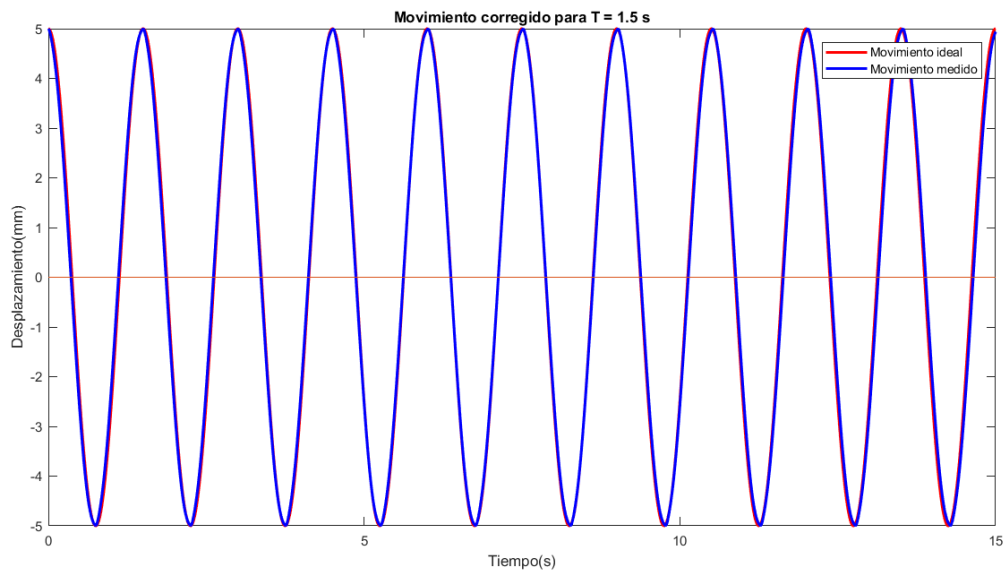
**Figura 16.** Desfase calibrado en el MAS de 0,8s  
Fuente: MATLAB.



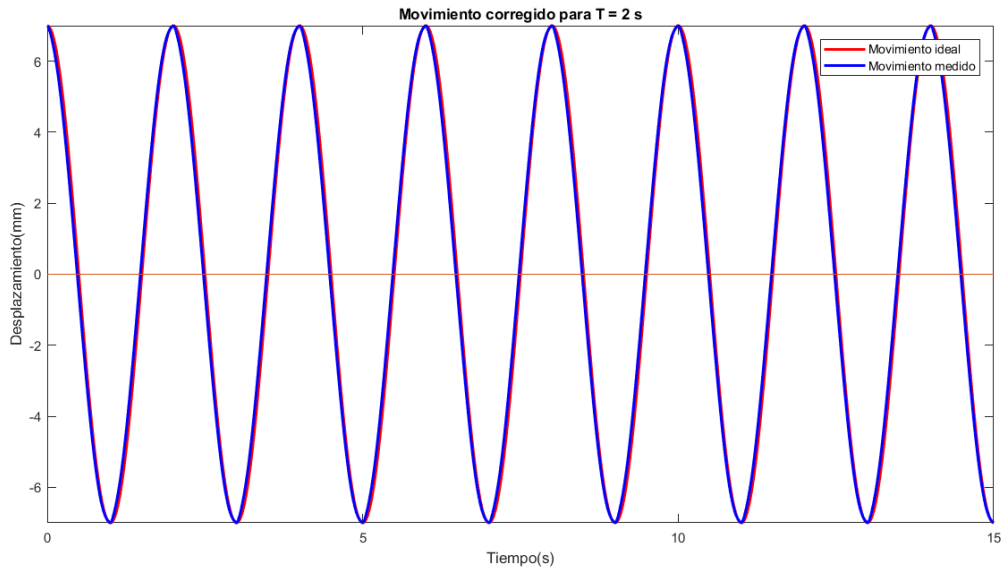
**Figura 17.** Desfase calibrado en el MAS de 0,9s  
Fuente: MATLAB.



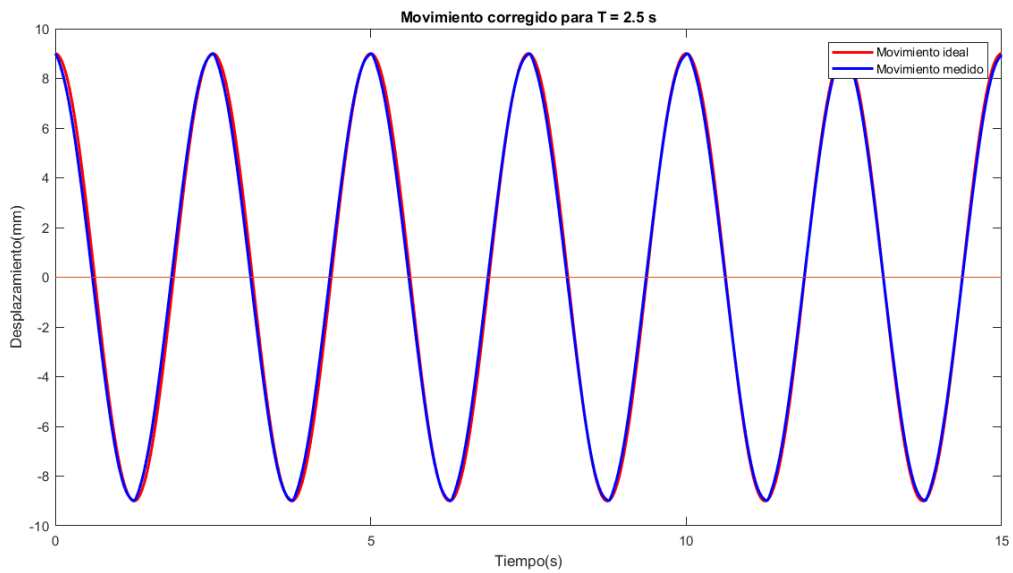
**Figura 18.** Desfase calibrado en el MAS de 1s  
Fuente: MATLAB.



**Figura 19.** Desfase calibrado en el MAS de 1.5s  
Fuente: MATLAB.



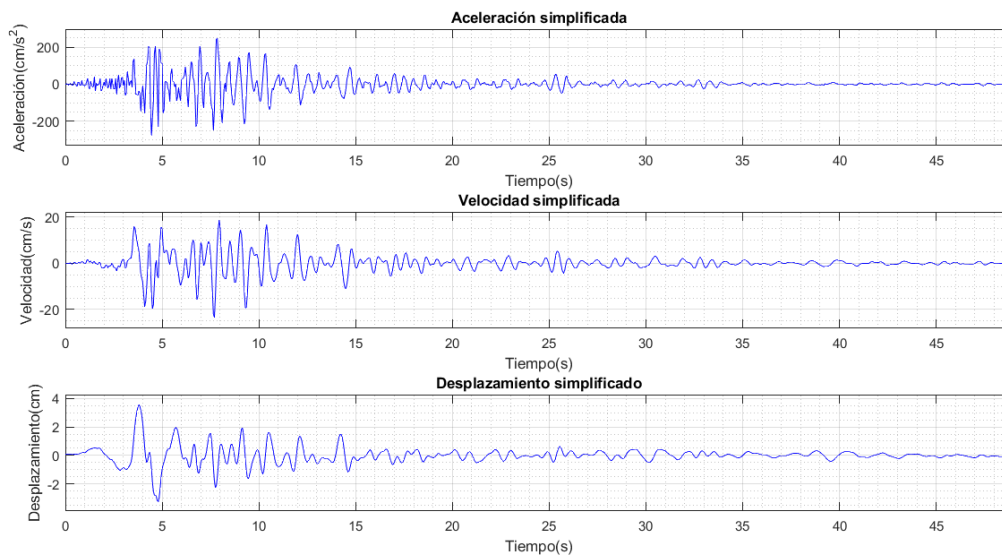
**Figura 20.** Desfase calibrado en el MAS de 2s  
Fuente: MATLAB.



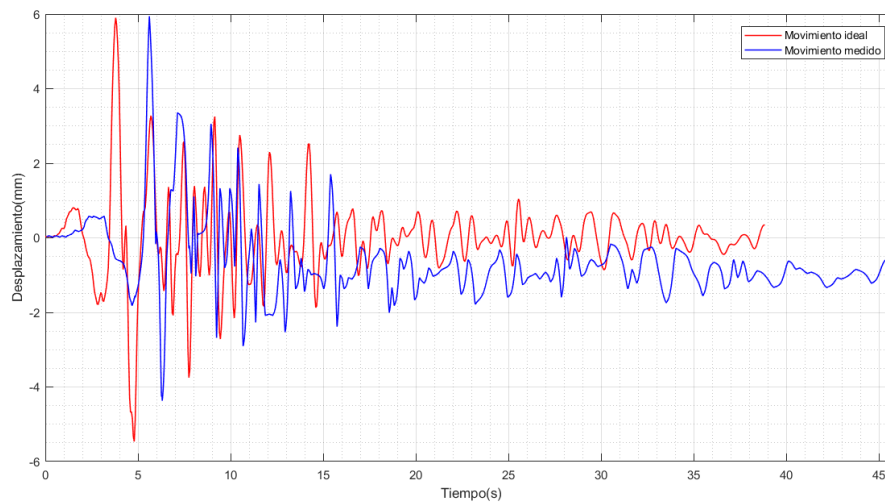
**Figura 21.** Desfase calibrado en el MAS de 2.5s  
Fuente: MATLAB.



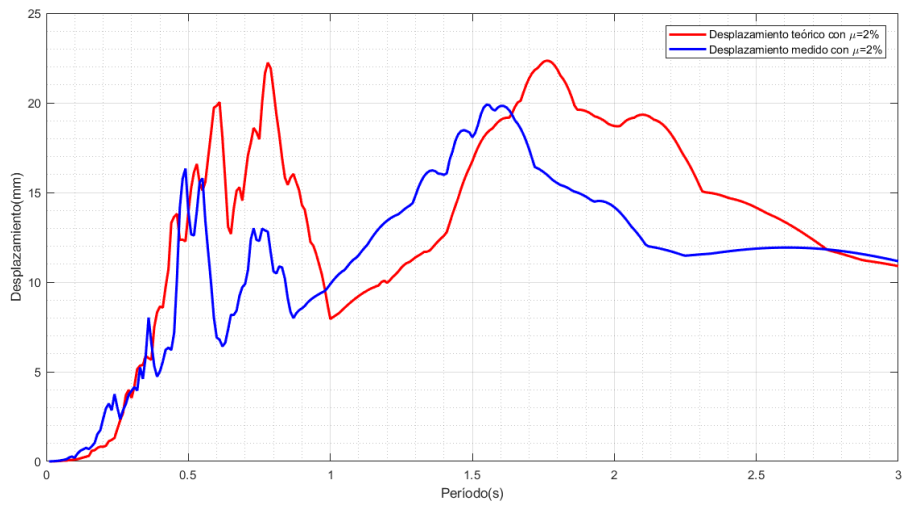
### Apéndice 3. Resultado de la programación de sismos



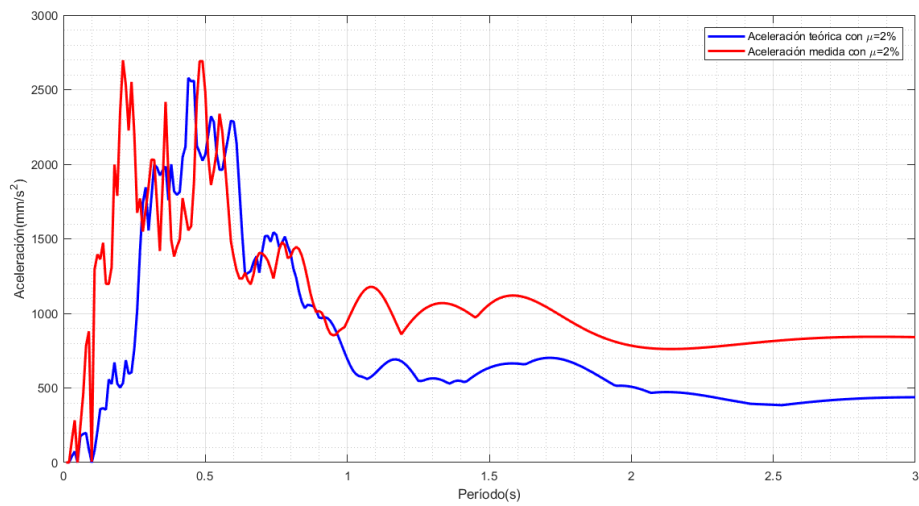
**Figura 22.** Comportamiento del sismo de Alajuela (1990) a través del tiempo  
Fuente: MATLAB.



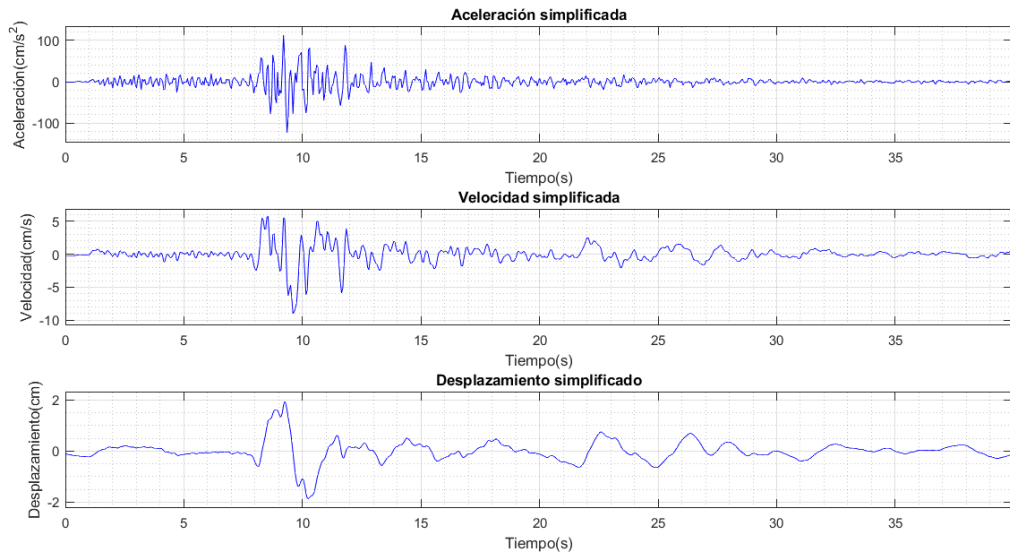
**Figura 23.** Error de desplazamiento en Alajuela (1990)  
Fuente: MATLAB.



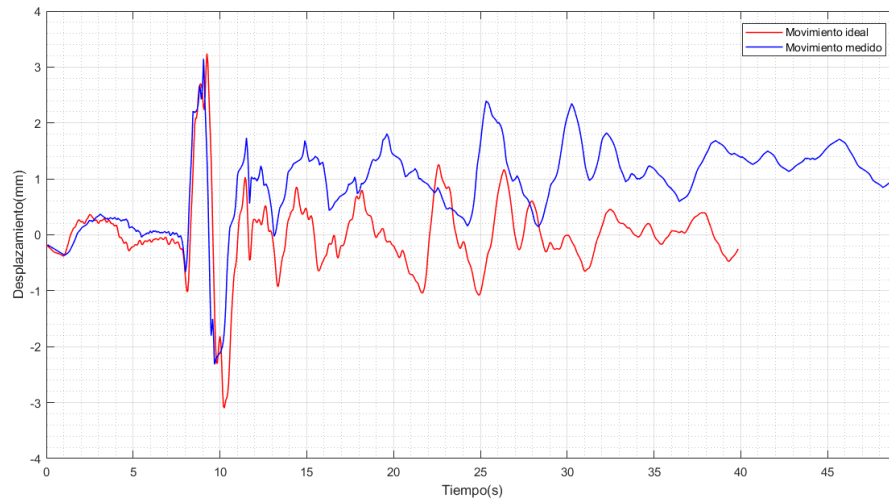
**Figura 24.** Comparación de espectros de respuesta desplazamiento del sismo de Alajuela (1990)  
Fuente: MATLAB.



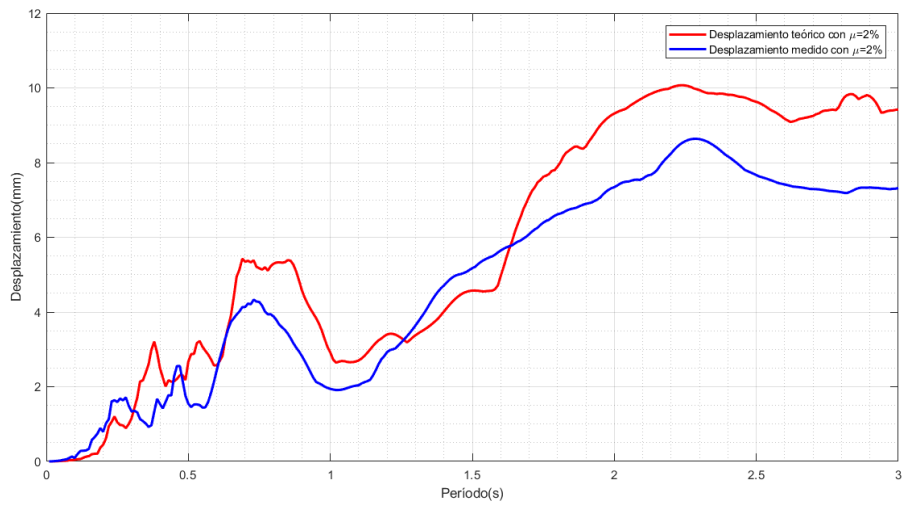
**Figura 25.** Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Alajuela (1990)  
Fuente: MATLAB.



**Figura 26.** Comportamiento del sismo de Armuelles (2003) a través del tiempo  
Fuente: MATLAB.

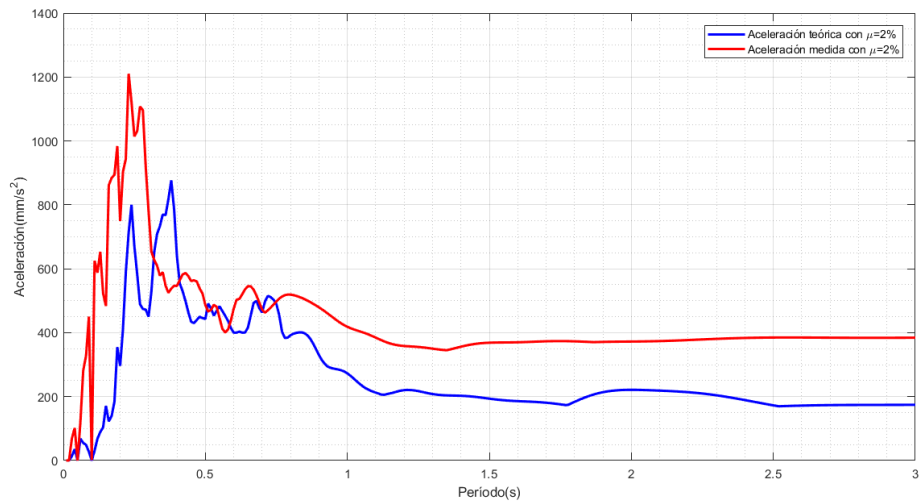


**Figura 27.** Error de desplazamiento en Armuelles (2003)  
Fuente: MATLAB.



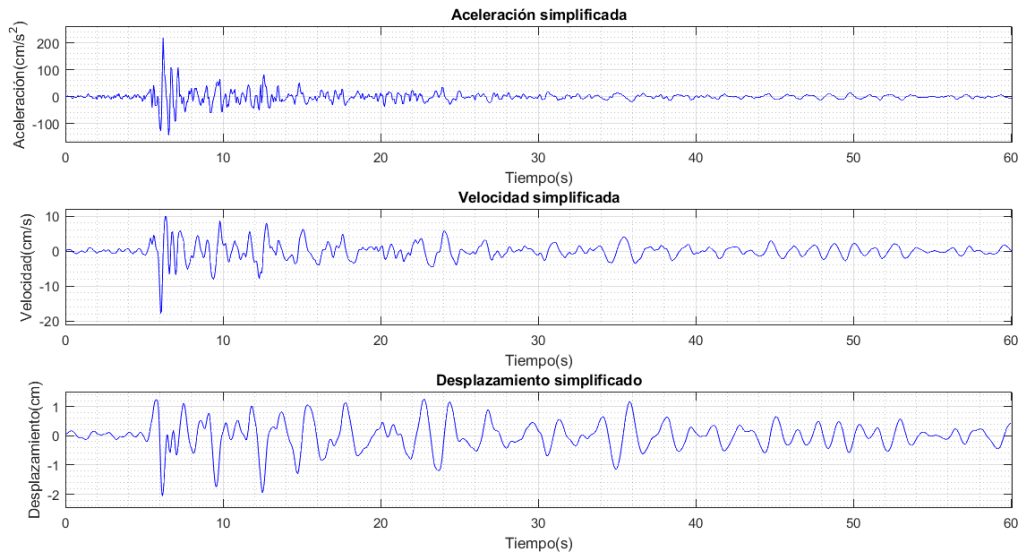
**Figura 28.** Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Armuelles (2003)

Fuente: MATLAB.

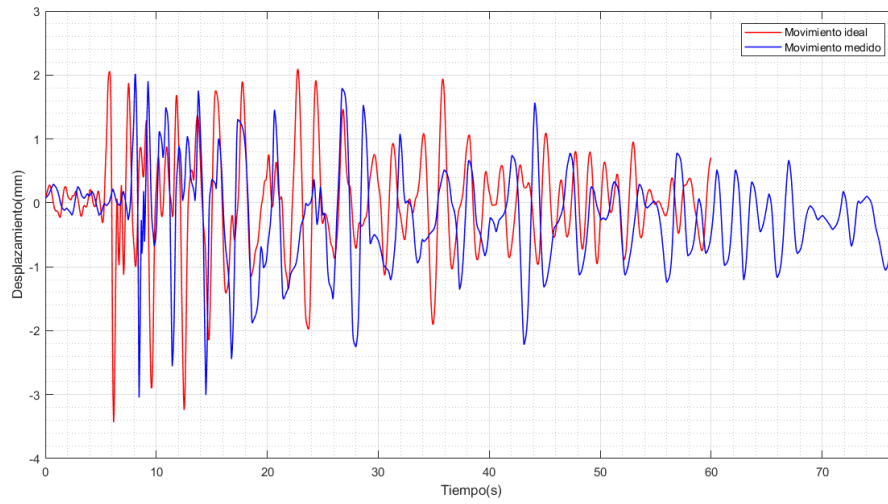


**Figura 29.** Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Armuelles (2003)

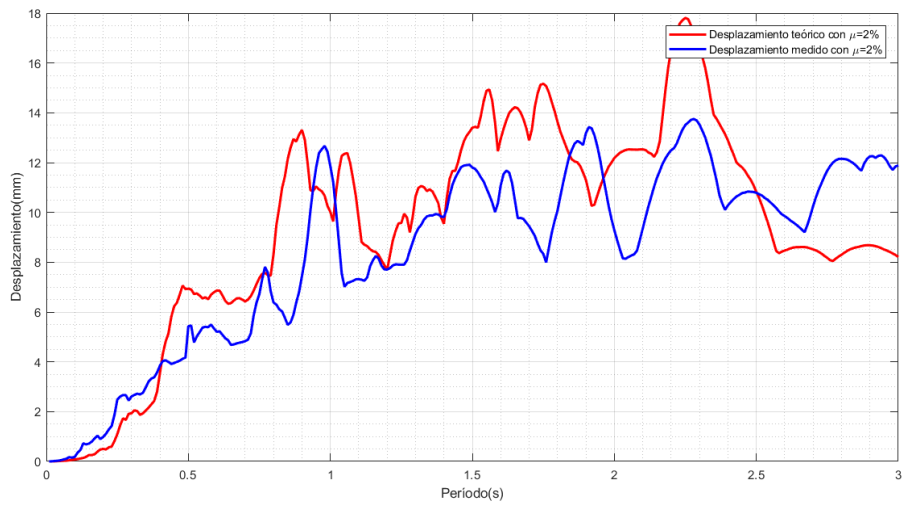
Fuente: MATLAB.



**Figura 30.** Comportamiento del sismo de Cóbano (1990) a través del tiempo  
Fuente: MATLAB.

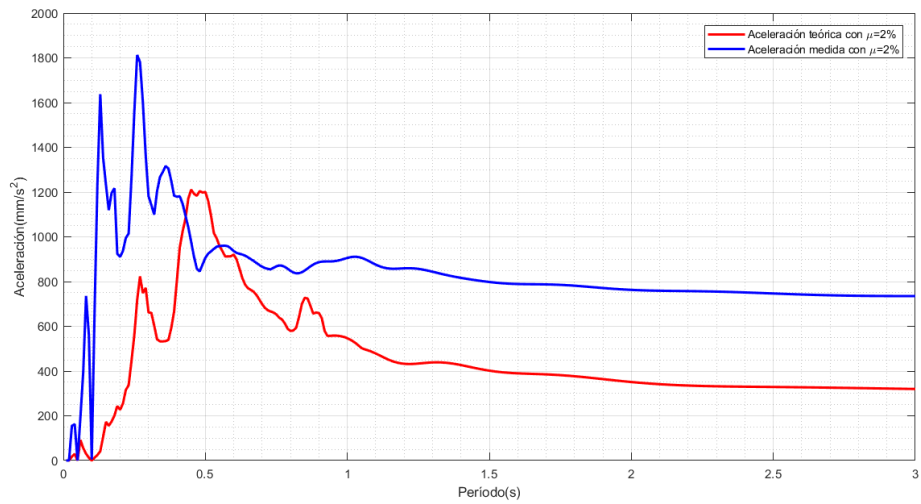


**Figura 31.** Error de desplazamiento en Cóbano (1990)  
Fuente: MATLAB.



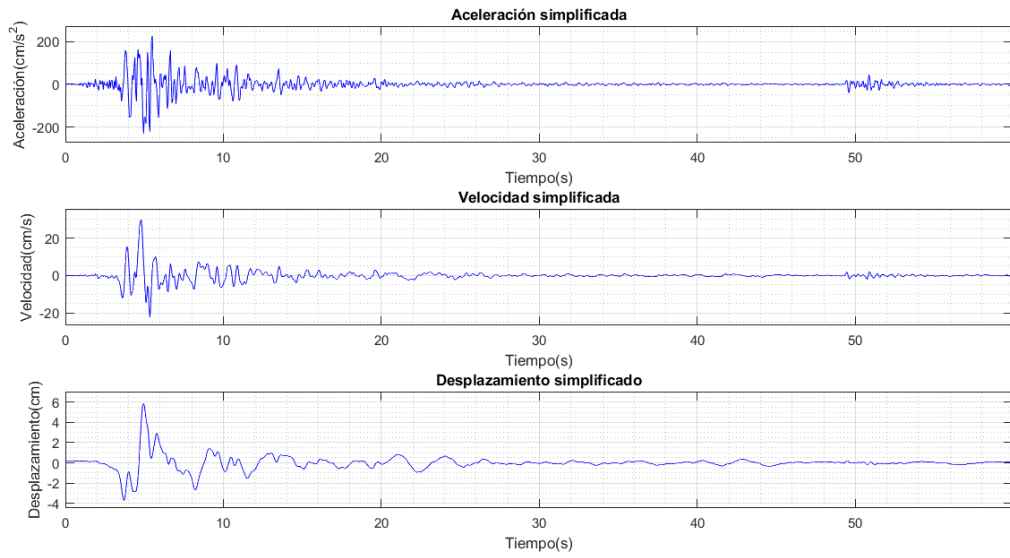
**Figura 32.** Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Cóbano (1990)

Fuente: MATLAB.

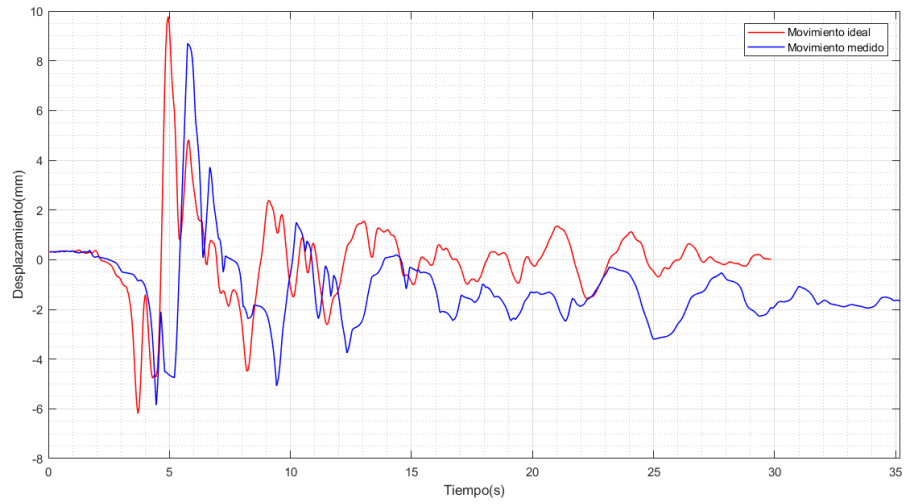


**Figura 33.** Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Cóbano (1990)

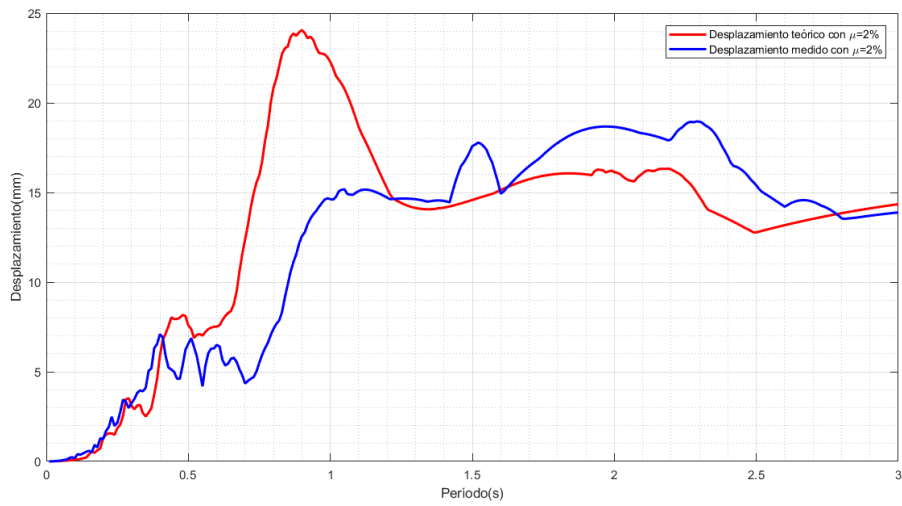
Fuente: MATLAB.



**Figura 34.** Comportamiento del sismo de Damas (2004) a través del tiempo  
Fuente: MATLAB.

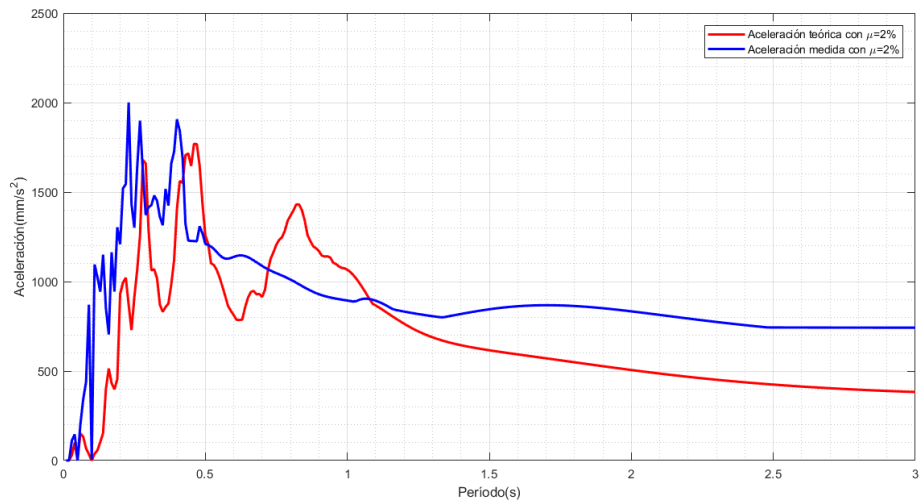


**Figura 35.** Error de desplazamiento en Damas (2004)  
Fuente: MATLAB.



**Figura 36.** Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Damas (2004)

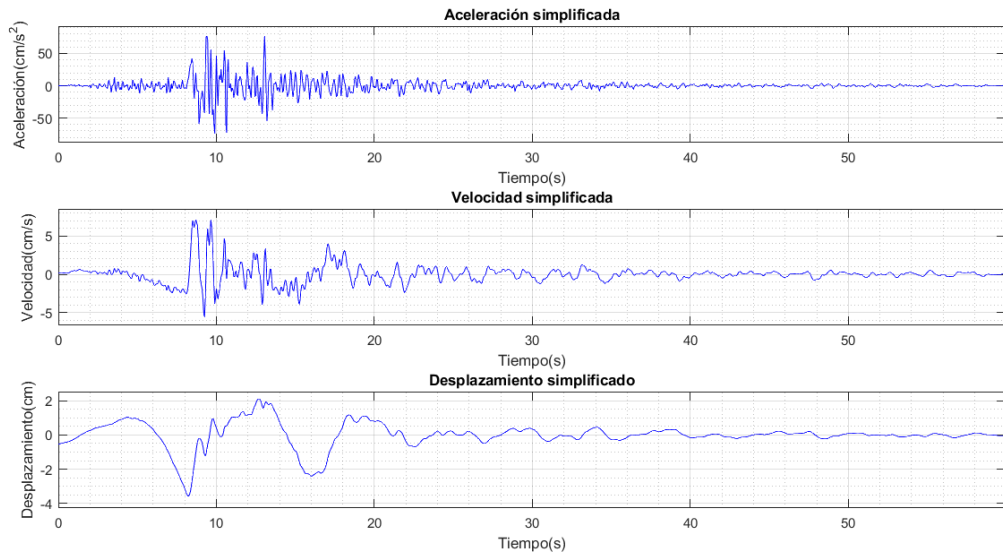
Fuente: MATLAB.



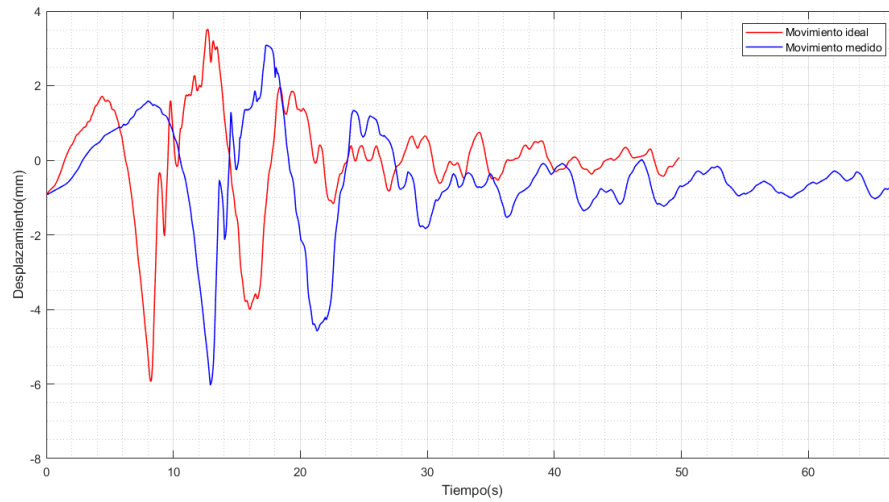
**Figura 37.** Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Damas (2004)

Fuente: MATLAB.

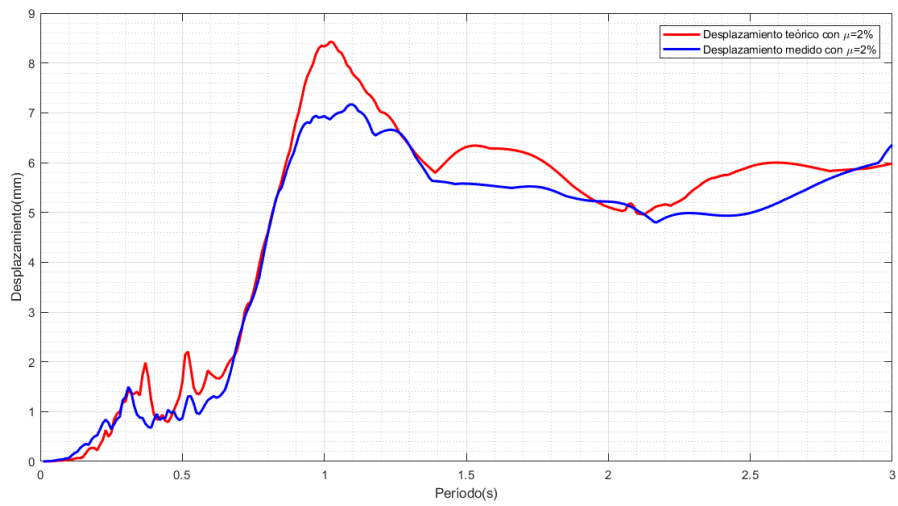




**Figura 38.** Comportamiento del sismo de Dominical (1999) a través del tiempo  
Fuente: MATLAB.

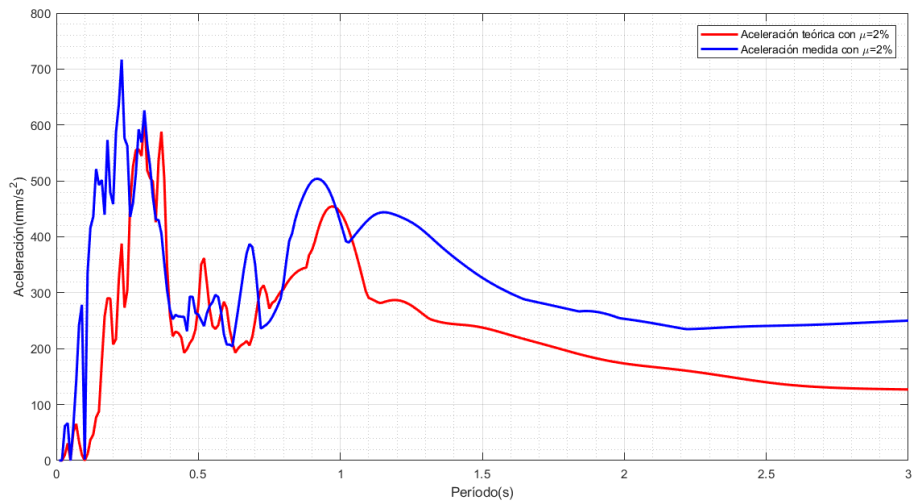


**Figura 39.** Error de desplazamiento en Dominical (1999)  
Fuente: MATLAB.



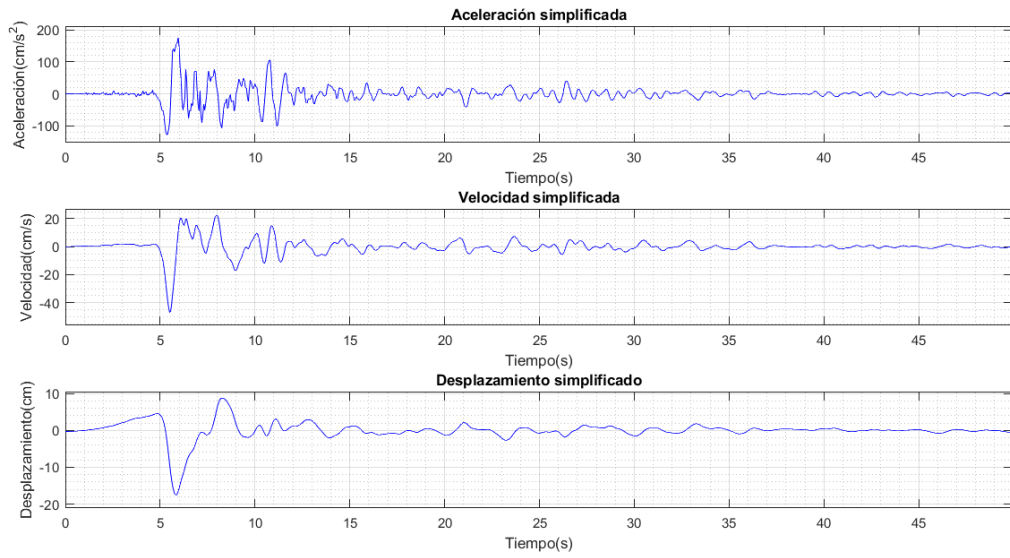
**Figura 40.** Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Dominical (1999)

Fuente: MATLAB.

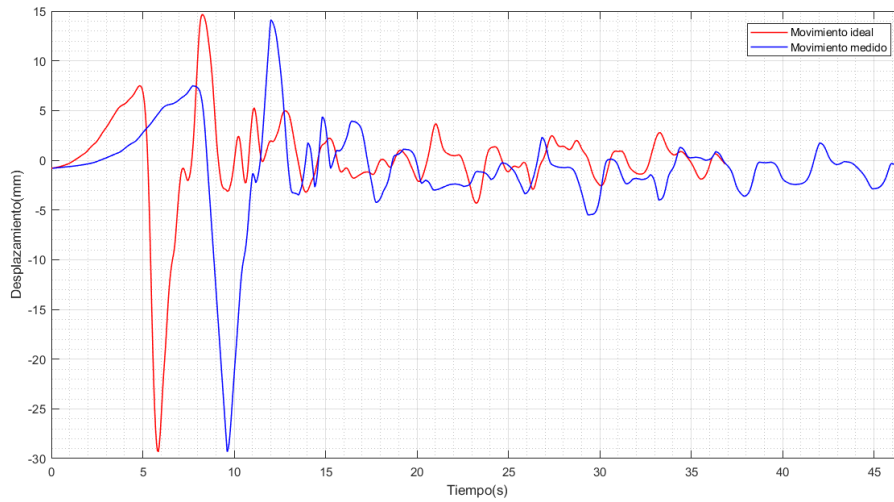


**Figura 41.** Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Dominical (1999)

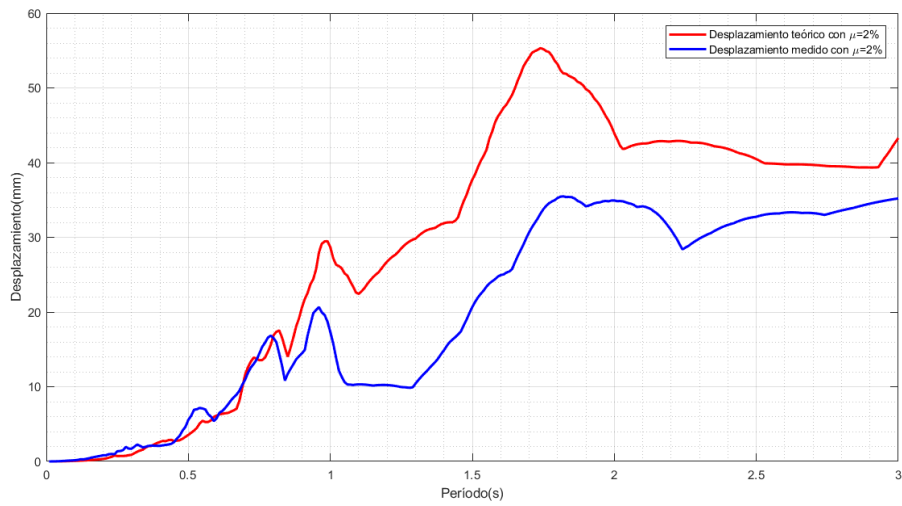
Fuente: MATLAB.



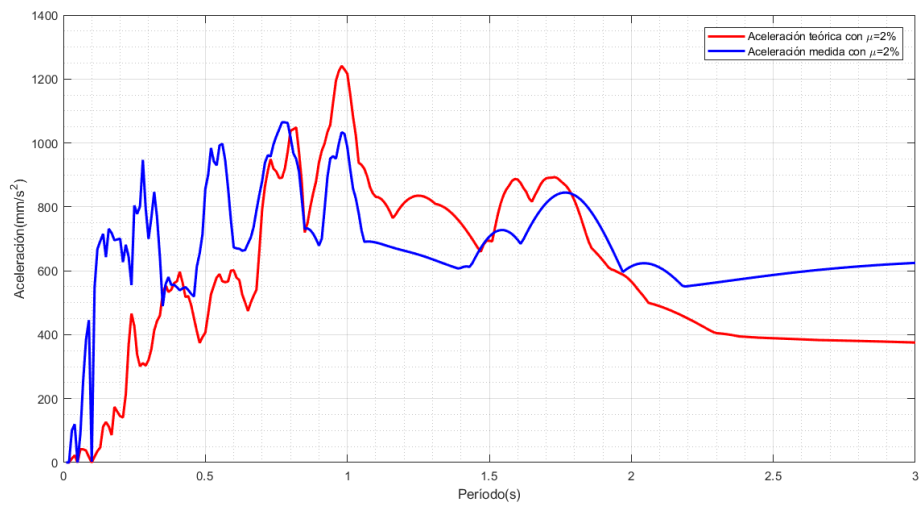
**Figura 42.** Comportamiento del sismo de Jacó (2017) a través del tiempo  
Fuente: MATLAB.



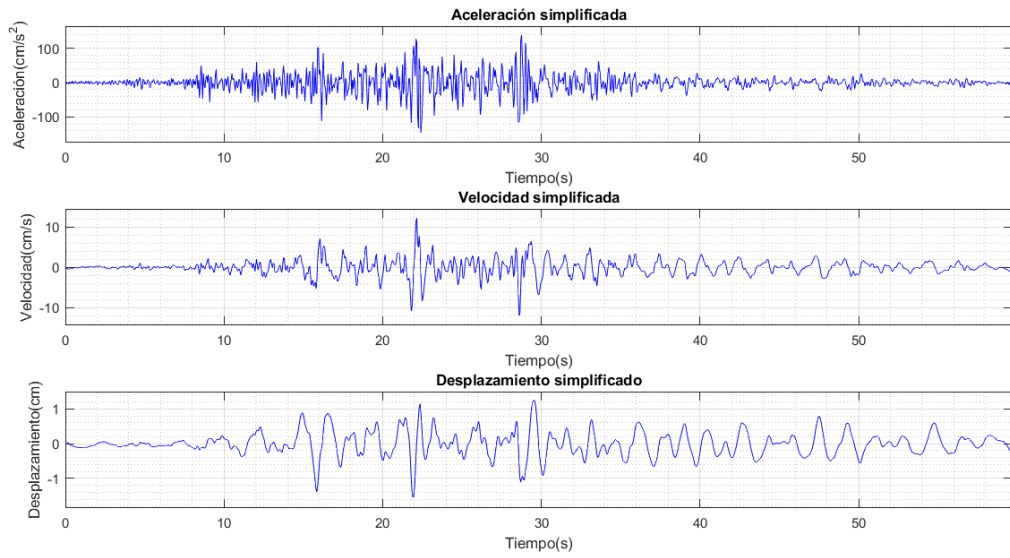
**Figura 43.** Error de desplazamiento en Jacó (2017)  
Fuente: MATLAB.



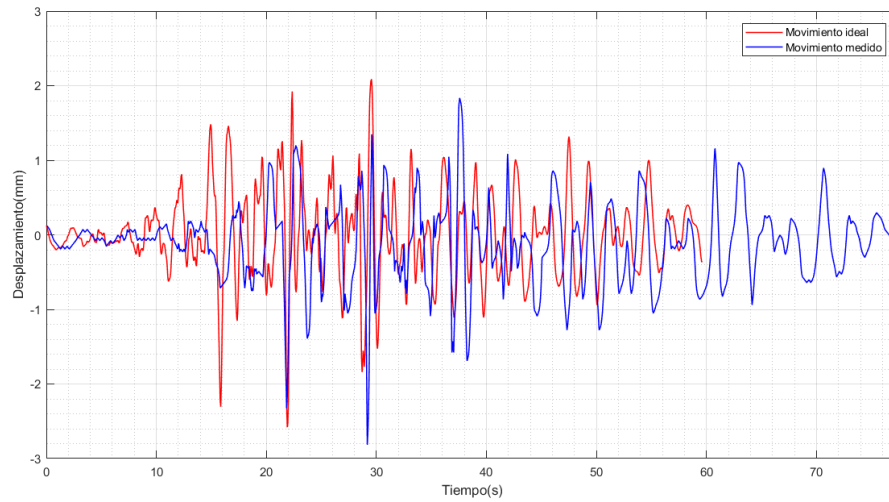
**Figura 44.** Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Jacó (2017)  
Fuente: MATLAB.



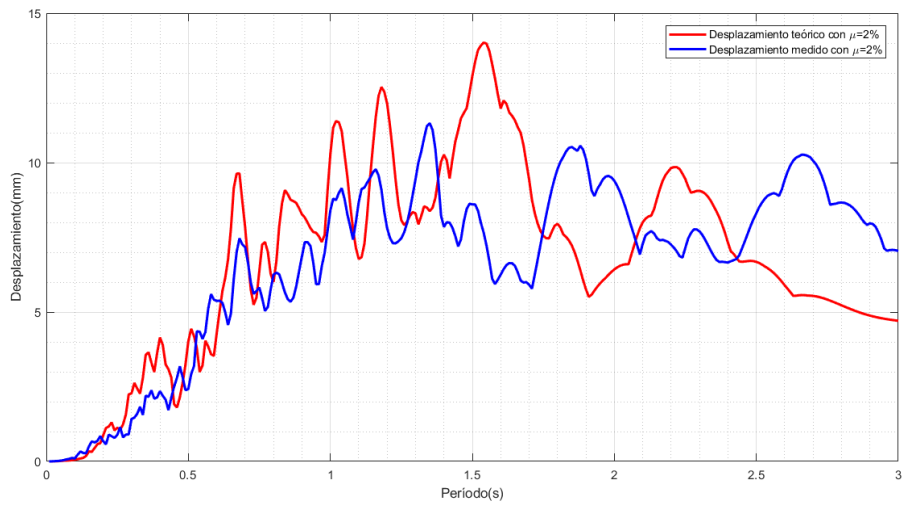
**Figura 45.** Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Jacó (2017)  
Fuente: MATLAB.



**Figura 46.** Comportamiento del sismo de Limón (1991) a través del tiempo  
Fuente: MATLAB.

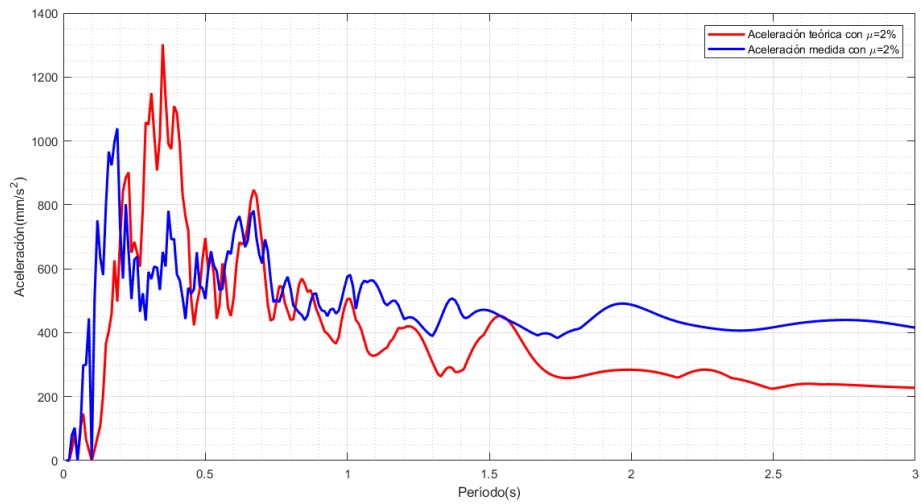


**Figura 47.** Error de desplazamiento en Limón (1991)  
Fuente: MATLAB.



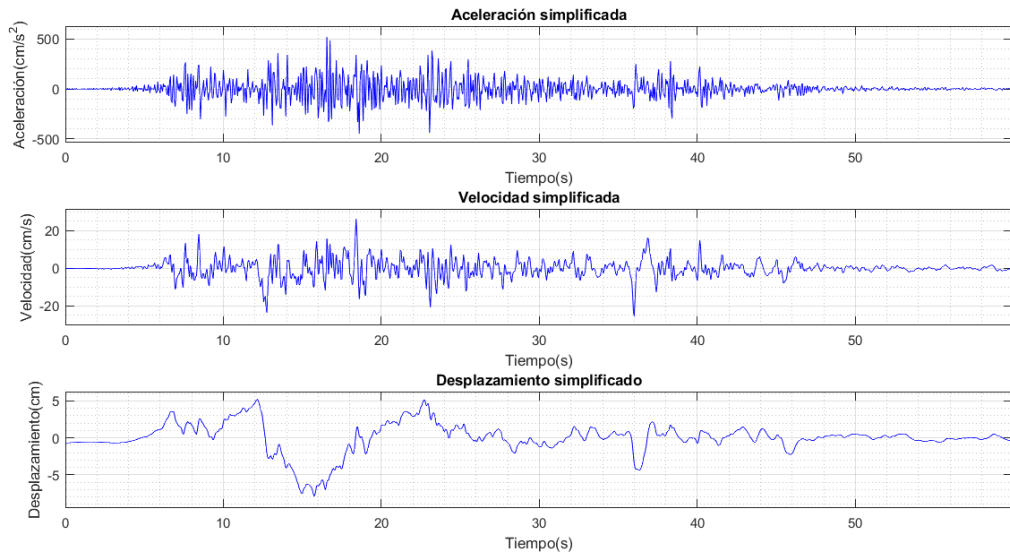
**Figura 48.** Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Limón (1991)

Fuente: MATLAB.

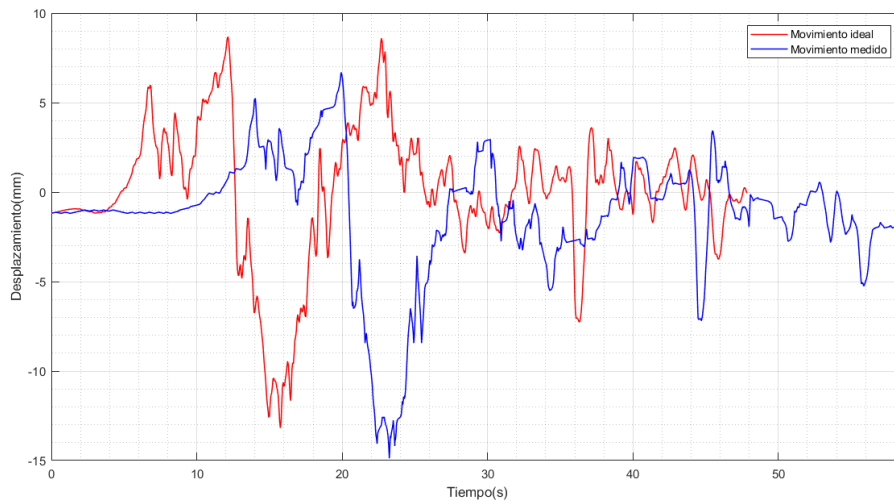


**Figura 49.** Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Limón (1991)

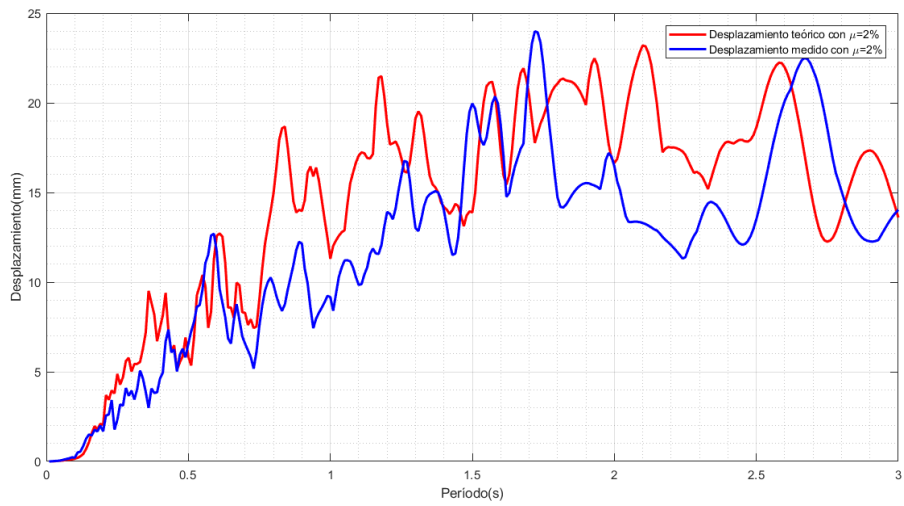
Fuente: MATLAB.



**Figura 50.** Comportamiento del sismo de Nicoya (2012) a través del tiempo  
Fuente: MATLAB.

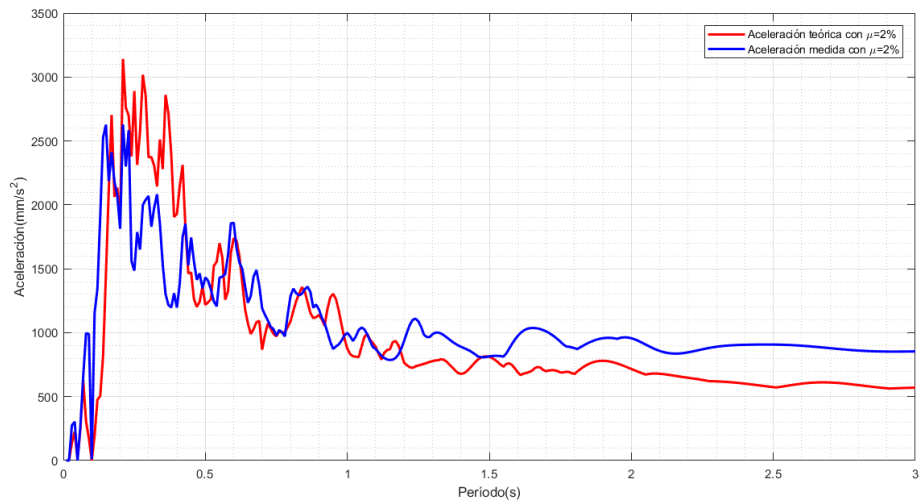


**Figura 51.** Error de desplazamiento en Nicoya (2012)  
Fuente: MATLAB.



**Figura 52.** Comparación de espectros de respuesta de desplazamiento del sismo de Nicoya (2012)

Fuente: MATLAB.



**Figura 53.** Comparación de espectros de respuesta de aceleración del sismo de Nicoya (2012)

Fuente: MATLAB.



## Apéndice 4. Costo del proyecto

**Cuadro 6.** Costo de materiales utilizados en el proyecto

Producto	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo total
Motor a paso + driver	1	und	66.997	66.997
Kit de tornillo de rieles	1	und	28.713	28.713
Kit de rieles	1	und	25.335	25.335
Importación de Amazon	1	-	137.062,68	137.062,68
Arduino MEGA 2560 rev 3	1	und	23.972,75	23.972,75
Fuente de poder ajustable 0 a 48 V 10 A	1	und	41.688,01	41.688,01
Arduin Mega Case	1	und	1.422,94	1.422,94
Placa metálica 60x60 cm x1/4"	1	und	14.492,25	14.492,25
Maquinado del acople	1	und	24.860	24.860
Tornillo hexagonal c/tuerca, rosca ordinaria 1/4" x2"	6	und	156	936
Tornillo de estufa redondo 3/16" x 2 1/2" (paq 10)	4	und	307	1.228
Tornillo allen cilíndrico mm 5x16	26	und	34,8	904,8
Tornillo allen cilíndrico mm 5x12	36	und	35,05	1.261,8
Tornillo allen cilíndrico mm 5x20	9	und	32,36	291,24
Tornillo allen cilíndrico mm 5x25	7	und	178,05	1246,35
Tornillo allen cilíndrico 1/4" x 1"	8	und	179,45	1435,6
Tuerca hexagonal galvanizada 3/16"	40	und	2,89	115,6
Arandela de presión galvanizada 5 mm	40	und	2,61	104,4
Tubo estructural 50x50x3,17mm x6m	2	und	21.027,83	42.055,66
Disco corte de metal plano 14x2,8mm	1	und	5.002,67	5002,67
Hoja de segueta 12	2	und	1438,34	2876,68
Soldadura punto rojo 3/32	1	kg	5.017,62	5.017,62
Angular para uniones*	1	und	12.556	12.556
Anticorrosivo*	1/4	Galón	4.300	4.300
Placa metálica 16x33 cm x 3/8" *	1	und	10.000	10.000
Hule 1/8" 90x45 cm*	1	lámina	2.800	2.800
Jumpers*	8	und	100	800
Cpu antiguo*	1	und	2.000	2.000
Sensor Gy-521	1	und	4.531,5	4.531,5
<b>Costo de materiales</b>				<b>453.700,82 CRC</b>

Fuente: Autoría propia.

Nota: Los aspectos indicados (\*) fueron donados, para efectos del presente proyecto.

**Cuadro 7.** Costo de mano de obra del proyecto

Actividad	Cantidad de horas	Costo de hora	Costo total
Asistente mecánico y eléctrico	86	1.200	103.200
Preparación de piezas metálicas**	40	2.500	100.000
Ensamblaje del artefacto**	72	1.200	86.400
Maquinado del acople	-	-	24.860
<b>Costo de mano de obra</b>			<b>314.460 CRC</b>

Fuente: Autoría propia.

Nota: Los aspectos indicados (\*\*) fueron considerados como parte del alcance, para efectos del presente proyecto.

**Cuadro 8.** Costo total de la construcción de la mesa sísmica

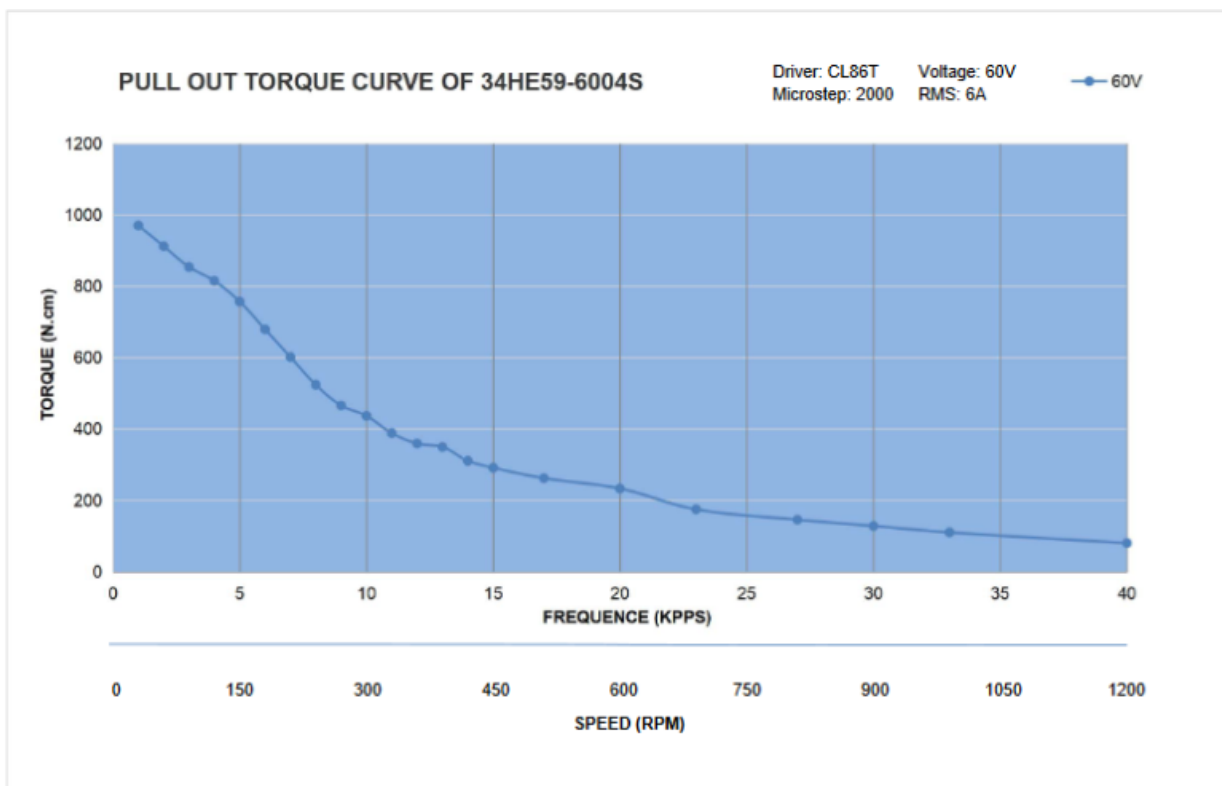
Aspecto	Costo
Mano de obra	314.460
Materiales	453.700,82
<b>Total</b>	<b>768.160,82 CRC</b>

Fuente: Autoría propia.

# Anexos

En la presente sección se muestran 2 anexos relacionados al proyecto. En el anexo 1 se muestra la curva de eficiencia del motor utilizado. En el anexo 2 se muestra el cálculo del torque utilizado por el motor para las condiciones actuales; cálculos realizados por Julián Barquero Jiménez, asistente mecánico, rescantando que los datos son variables, así que estos son adaptados a un escenario posible.

## Anexo 1. Curva de eficiencia del motor



**Figura 1.** Curva de eficiencia del motor, según fabricante OMC Corporation Limited.  
Fuente: StepperOnline, s.f.

## Anexo 2. Cálculo del peso movido por el motor

### CÁLCULOS

Cálculos mesa

#### Paso 1 - Defina las necesidades del actuador y del movimiento

Peso de la mesa y del objeto = 60 Kg

Ángulo de inclinación = 0°

Fuerza externa de la carga = 0

Diámetro del tornillo = 16 mm

Longitud del tornillo = 850 mm

Material del tornillo = acero

Resolución deseada = 0,0254 mm/paso (200 pasos son una vuelta del eje)

Reductor de engranaje = 1:1

Movimiento = 120 mm

Paso del tornillo = 16 mm/rev (pitch = 0,0625 rev/mm o 62,5 rev/m)

Coefficiente de fricción de superficies que se deslizan = 0,05

Tiempo de movimiento = 1,2 segundos

Tiempo de aceleración: 25% del tiempo total = 0,3 s.

Frecuencia inicial en la partida = 40 Hz

#### Paso 2 - Determine la resolución de la posición de la carga

paso = (dcarga + i) + L = (16 + 1) + 0,0254[mm/pulso] = 630 pulsos/rev

#### Paso 3 - Determine el perfil del movimiento

$P_{total} = (D_{total} + (dcarga + i)) * paso$

$= (120 + (16 + 1)) * 630 = 4725 \text{ pulsos}$

$f_{Trapez} = (P_{total} - (f_0 * t_{acel})) + (t_{total} - t_{acel})$

$= (4725 - (40 * 0,3)) + (1,2 - 0,3) = 5237 \text{ Hz}$

donde el tiempo  $t_{acel}$  es 0,3 [s] y la frecuencia  $f_0$  es de 40 Hertz.

$= 4,692 \text{ Hz} * (60 \text{ sec}/1 \text{ min}) + 400 \text{ pasos/rev} = 500 \text{ RPM}$  de velocidad del eje del motor

#### Paso 4 - Determine el torque necesario para mover la carga

Usando las fórmulas en la Tabla 1:

$$J_{total} = J_{motor} + J_{reductor} + ((J_{acoplamiento} + J_{tornillo} + JW) \div i^2)$$

Para este ejemplo, digamos que la inercia del reductor de engranajes y del acoplamiento es cero.

$$JW = (\text{Peso} \div e) * (1 \div (2 * \pi * P))^2$$

$$= (60[\text{Kg}] \div 0,9) * (1 \div (2 * 3,1416 * 62,5[\text{rev/m}]))^2$$

$$= 0,000432304 [\text{Kg-m}^2]$$

$$J_{tornillo} = (\pi * L * \text{densidad} * r^4) \div 2 = (3,1416 * 0,850 [\text{m}] * 7700 [\text{kg/m}^3] * 0,008^4 [\text{m}]) \div 2$$

$$4,211 \cdot 10^{-5} [\text{Kg-m}^2]$$

La inercia de la carga y el tornillo reflejados al eje del motor son:

$$J_{(tornillo+carga)/motor} [\text{Kg-m}^2] = ((J_{tornillo} + JW) \div i^2) = ((0,0004323 + 0,00004211) \div 1) = 0,0004744 [\text{Kg-m}^2]$$

$$\begin{aligned} \text{El torque requerido para acelerar la inercia es: } T_{acel} &= J_{total} [\text{Kg-m}^2] * \\ &(\text{velocidad} [\text{RPM}] \div \text{tiempo} [\text{s}] * 2 * \pi \div 60 [\text{N-m}] = 0,000231 [\text{Kg-m}^2] * (704 \text{ RPM} \div 0,425 [\text{s}] * 2 * \pi \div 60 = \\ &0,08279842 [\text{N-m}] \end{aligned}$$

Después, necesitamos determinar el torque resistivo en la operación de movimiento. Si existe la máquina es a veces posible medir realmente el torque resistivo. De otra forma, es necesario estimar este valor por experiencias similares o por fórmulas similares a la siguiente:

$$T_{resist} = ((F_{total} \div (2 * \pi * P)) + T_{preload}) \div i$$

$$F_{total} = F_{ext} + F_{fricción} + F_{gravedad}$$

$$= 0 + \mu * \text{Peso} * \cos 9,81 + 0 = 0,05 * 60 * 9,81 = 29,43 [\text{N}]$$

$$T_{resist} = (29,43 [\text{N}] \div (2 * 3,1416 * 62,5[\text{rev/m}])) \div 1 = 0,0749429 [\text{N-m}]$$

donde hemos asumido que el torque de carga y de precarga sea cero.

$$T_{movimiento} = T_{acel} + T_{resist} = 0,08279842 + 0,0749429 = 0,1577 [\text{N-m}]$$