

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“RÉPLICA DE MOVIMIENTO SÍSMICO PARA DETERMINAR
ACELERACIONES, VELOCIDADES Y DESPLAZAMIENTOS EN
UNA ESTRUCTURA EXPERIMENTAL CON EL USO DE UNA MESA
VIBRATORIA, PUNO 2018”**

TESIS

PRESENTADA POR:

ARTURO WALDEMAR QUISPE CONDORI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

RÉPLICA DE MOVIMIENTO SÍSMICO PARA DETERMINAR
ACELERACIONES, VELOCIDADES Y DESPLAZAMIENTOS EN UNA
ESTRUCTURA EXPERIMENTAL CON EL USO DE UNA MESA
VIBRATORIA, PUNO 2018

TESIS PRESENTADA POR:

ARTURO WALDEMAR QUISPE CONDORI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 27 DE DICIEMBRE DEL 2018



APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE

:


.....
Ing. RAÚL FERNANDO ECHEGARAY CHAMBI

PRIMER MIEMBRO

:


.....
D. Sc. LEONEL COYLA IDME

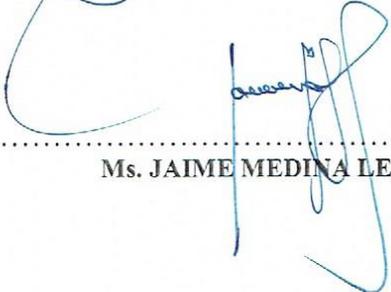
SEGUNDO MIEMBRO

:


.....
Ing. YASMANI TEÓFILO VITULAS QUILLE

DIRECTOR / ASESOR

:


.....
Ms. JAIME MEDINA LEIVA

TEMA : Réplica de Movimiento Sísmico

ÁREA : Estructuras

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Análisis y Diseño Estructural

DEDICATORIA

A mis padres, Wenceslao
Quispe Yapo y Alejandrina
Condori Quilca, por su
incondicional colaboración y
respaldo tanto a lo largo de mi
formación académica como
durante el desarrollo de esta
obra, este proyecto no lo habría
podido concretar sin ustedes.

Este trabajo les pertenece,
gracias.

Arturo W.
Quispe

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, al Creador, por haberme dado la energía necesaria y la voluntad para culminar el presente proyecto de tesis.

A mis amigos y familiares por la presión ejercida, fueron responsables de la finalización de esta etapa.

Un agradecimiento especial a mis amigos Hugo y César, gracias por el apoyo intelectual brindado hasta la culminación de este proyecto y por la conceptualización de la idea, la cual dio vida a este proyecto, respectivamente.

Agradezco también a mi Director de Tesis, Ing. Jaime Medina Leiva y al Jurado Dictaminador: Ing. Raúl Fernando EcheGARAY Chambi, Ing. Yasmani Teófilo Vitulas Quille y al Ing. Leonel Coyla Idme. Que gracias a sus consejos y valiosa colaboración logré una mejor versión y culminación del trabajo presentado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT.....	13
I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 INTRODUCCIÓN:	15
1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA:	15
1.3 PREGUNTA GENERAL:.....	16
1.3.1 Preguntas Específicas:	17
1.4 OBJETIVO GENERAL:	17
1.4.1 Objetivos Específicos:	17
1.5 HIPÓTESIS GENERAL:	18
1.5.1 Hipótesis Específicas:.....	18
II. REVISIÓN DE LITERATURA	19
2.1 ANTECEDENTES:.....	19
2.2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO:	25
2.2.1 Comportamiento Dinámico Estructural:.....	25
2.2.2 Comportamiento Dinámico Estructural Emulado:	30
2.2.3 Modelo Estructural:	30
2.2.4 Sistema Mecánico:.....	33
2.2.5 Acelerograma:	35
2.2.6 Mesa Vibratoria:.....	45
2.2.7 Arduino:.....	50
2.2.8 Acelerómetro ADXL335:	52
2.2.9 Señales:.....	53
III. MATERIALES Y MÉTODOS	55
3.1 METODOLOGÍA:	55
3.1.1 Método Científico:.....	55
3.1.2 Nivel de Investigación:.....	55
3.1.2 Tipo de Investigación:	55
3.1.3 Matriz de consistencia:	55
3.2 MODELO TEÓRICO:	56

3.2.1 Propiedades Mecánicas del Modelo Estructural:	56
3.2.2 Obtención de Resultados del Modelo Teórico:	58
3.3 MODELO EXPERIMENTAL:	68
3.3.1 Propiedades Mecánicas del Modelo Estructural:	68
3.3.2 Dimensiones del Modelo Estructural:	70
3.4 SISTEMA MECÁNICO DE LA MESA VIBRATORIA:	70
3.4.1 Unión Entre el Husillo y Motores:	70
3.4.2 Unión Concéntrica de los Ejes de Motor con el Husillo:	73
3.4.3 Fijación de las Placas Metálicas a Motores:	75
3.4.4 Transferencia de Movimiento del Husillo a la Plataforma:	75
3.5 RÉPLICA DE SEÑALES CON UNA MESA VIBRATORIA:	82
3.6 REGISTRO DE SEÑALES UTILIZANDO SENSORES ADXL335:	84
3.7 IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES ADXL335 EN UN MODELO EXPERIMENTAL:	86
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	88
4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE ACELEROGRAMAS DE SALIDA Y ENTRADA EN UNA MESA VIBRATORIA	88
4.1.1 Análisis Estadístico con Acelerograma Senoidal:	88
4.1.2 Análisis Estadístico con Acelerograma Senoidal de Diferentes Amplitudes:	92
4.1.3 Análisis Estadístico con Acelerograma de un Sismo Real:	96
4.1.3.1 Estadística Descriptiva:	96
4.2 COMPORTAMIENTO DINÁMICO ESTRUCTURAL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL:	101
4.2.1 Modelo Estructural Teórico	101
4.2.2 Modelo Estructural Experimental:	106
4.2.3 Discusión de Resultados Teóricos y Experimentales:	116
V. CONCLUSIONES	118
VI. RECOMENDACIONES	119
VII. REFERENCIAS	120
ANEXOS	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 001: Respuesta dinámica: aceleraciones, velocidades y desplazamientos.	26
Figura 002: Respuesta dinámica de una estructura.	27
Figura 003: Características de un sismo.	29
Figura 004: Modelo teórico.	31
Figura 005: Modelo estructural experimental.	32
Figura 006: Sistema mecánico de un solo husillo.	34
Figura 007: Sismógrafo.	38
Figura 008: Acelerogramas de un sismo en sus tres componentes.	39
Figura 009: Deformaciones producidas por ondas de cuerpo P y S.	40
Figura 010: Deformaciones causadas por ondas superficiales L y R.	41
Figura 011: Tipos de Excitación Sísmica.	42
Figura 012: Mesa vibratoria contemporánea.	46
Figura 013: Esquema general de una Mesa Vibratoria.	47
Figura 014: E-Defense, la Mesa Vibratoria más grande del mundo.	48
Figura 015: Mesa Vibratoria uniaxial CUSHAKE.	49
Figura 016: Especificaciones Técnicas de la mesa uniaxial CUSHAKE.	50
Figura 017: Plataforma Arduino Uno.	51
Figura 018: Sensor acelerómetro ADXL335.	53
Figura 019: Señales obtenidas con el sensor ADXL335.	54
Figura 020: Señal obtenida con un sensor ADXL335.	54
Figura 021: Ensayo de compresión.	58
Figura 022: Ensayo de tracción.	58
Figura 023: Diagrama de flujo para el modelo teórico.	59
Figura 024: Información del Software utilizado en el modelamiento teórico.	59
Figura 025: Elección del modelo base.	60
Figura 026: Dimensionamiento de la Estructura Teórica.	60
Figura 027: Definición de las propiedades del materia.	61
Figura 028: Propiedades de sección de las columnas.	61
Figura 029: Diseño de sección rectangular para columnas.	62
Figura 030: Diseño de sección de Losas (Áera).	62
Figura 031: Restricción en las 4 juntas de la base.	63
Figura 032: Se elimina todo espectro.	63
Figura 033: Se elimina los demás Load Cases.	64
Figura 034: Combinación de cargas.	64
Figura 035: Inserción del acelerograma en la función Tiempo – Historia.	65
Figura 036: Visualización del acelerograma en la función Tiempo – Historia.	65
Figura 037: Cargas utilizadas en Tiempo – Historia.	66
Figura 038: Modelo estructural para el análisis teórico.	67
Figura 039: Modelo estructural teórico luego del ensayo.	67
Figura 040: Diagrama de flujo para el modelo experimental.	68
Figura 041: Propiedades mecánicas del Modelo Experimental.	69
Figura 042: Torno utilizado en la fabricación de los acoples.	71
Figura 043: Últimos pasos en la fabricación de los acoples.	71

Figura 044: Acoples ya terminados.	72
Figura 045: Acoples Flexibles prefabricados	73
Figura 046: Marcos inicialmente contruidos en melanina.	73
Figura 047: Marcos de acero listos para ensamblar la mesa vibratoria.	74
Figura 048: Marcos de acero concéntricos con los ejes del motor y del husillo.	75
Figura 049: Perforación de la camisa con el NUT para ser acoplado a la plataforma... ..	76
Figura 050: Camisa atornillada al NUT anti backlash roscado con el T8 de 300mm. ...	76
Figura 051: NUT Anti backlash.....	77
Figura 052: Ensamblado de la los marcos de acero al motor.	77
Figura 053: Extensiones de cojinete DYNASLIDE.	78
Figura 054: Ensamblado de las piezas.	78
Figura 055: Nivelación de extensiones DYNASLIDE.	79
Figura 056: Estructura interna de la Mesa vibratoria uniaxial.....	79
Figura 057: Fuente de Alimentación junto a la caja de controles.....	80
Figura 058: Acelerómetro fijo en el Modelo Experimental.....	80
Figura 059: Acelerómetro ADXL335 posicionados en dirección del movimiento.	81
Figura 060: Primera captación de datos con los sensores ADXL335.....	81
Figura 061: Programación en Arduino Mega responsable del movimiento dinámico. ..	84
Figura 062: Ventana correspondiente a la captura de señales con MATLAB.....	86
Figura 063: Sensor ADXL335 conectado a un Protoboard.	87
Figura 064: Ubicación del Sensor ADXL335 en el modelo experimental.	87
Figura 065: Onda Senoidal de Entrada – Modelo Teórico.	89
Figura 066: Onda Senoidal de Salida – Modelo Experimental.	89
Figura 067: Onda Senoidal de Entrada – Modelo Teórico.	93
Figura 068: Onda Senoidal de Salida – Modelo Experimental.	93
Figura 069: Onda Senoidal de Entrada – Modelo Teórico.	97
Figura 070: Onda Senoidal de Salida – Modelo Experimental.	98
Figura 071: Desplazamientos de la Junta 5.	101
Figura 072: Desplazamientos de la Junta 9.	102
Figura 073: Desplazamientos en la Junta 13.	102
Figura 074: Velocidades en la Junta 5.	103
Figura 075: Velocidades en la Junta 9.	103
Figura 076: Velocidades en la Junta 13.	103
Figura 077: Aceleraciones en la Junta 5.	104
Figura 078: Aceleraciones en la Junta 9.	104
Figura 079: Aceleraciones en la Junta 13.	105
Figura 080: Captura superpuesta de señales captadas en los 3 niveles.	106
Figura 081: Aceleraciones obtenidas para el primer nivel.	107
Figura 082: Velocidades obtenidas para el primer nivel.	108
Figura 083: Desplazamientos obtenidos para el primer nivel.....	109
Figura 084: Aceleraciones obtenidas para el segundo nivel.....	110
Figura 085: Velocidades obtenidas para el segundo nivel.....	111
Figura 086: Desplazamientos obtenidos para el segundo nivel.....	112
Figura 087: Aceleraciones obtenidas para el tercer nivel.	113
Figura 088: Velocidades obtenidas para el tercer nivel.	114
Figura 089: Desplazamientos obtenidos para el tercer nivel.	115
Figura 090: Inserción de licencia de software para finalizar instalación.....	122

Figura 091: Instalación de la extensión para Arduino.	122
Figura 092: Explorador de Extensiones.	123
Figura 093: Instalación de la extensión para Arduino.	123
Figura 094: Inicio de sesión en MathWorks®.	124
Figura 095: Cómo generar el archivo de captura de datos.	126
Figura 096: tmax, rate y t.	126
Figura 097: Proceder a ejecutar el archivo adquirente de señales.	127
Figura 098: Captura de señales.	127
Figura 099: Matriz de datos obtenida.	128
Figura 100: Atajo para programar pulsaciones en Excel.	130
Figura 101: Eliminación de formato Excel con bloc de notas.	131
Figura 102: Eliminación de espacios con Word.	131
Figura 103: Compilación y ejecución de la programación en Arduino Uno.	131
Figura 104: Vista de la camisa encargada de transmitir el movimiento.	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01:	Catálogo de Sismos Peruanos.....	36
Tabla 02:	Acelerogramas indicando tiempo y aceleración.....	37
Tabla 03:	Sismos más representativos del siglo XX.....	43
Tabla 04:	Matriz de consistencia.....	55
Tabla 05:	Propiedades Físicas de la Madera Balsa.....	56
Tabla 06:	Módulos de Elasticidad de la Madera Balsa.....	56
Tabla 07:	Propiedades Físicas de la Madera Balsa.....	69
Tabla 08:	Propiedades Físicas de la Madera Balsa.....	69
Tabla 09:	Estadística Descriptiva de los modelos teórico y experimental.....	88
Tabla 10:	Estadística Descriptiva de los modelos teórico y experimental.....	92
Tabla 11:	Estadística Descriptiva de los modelos teórico y experimental.....	97
Tabla 12:	Aceleraciones, Velocidades y Desplazamientos máximos teóricos....	105
Tabla 13:	Resultados Teóricos.....	116
Tabla 14:	Resultados Experimentales.....	116
Tabla 15:	Coefficientes de correlación Pearson obtenidos.....	116
Tabla 16:	Intervalos de Coeficientes de Correlación de Pearson.....	117

RESUMEN

El presente proyecto de investigación se ha enfocado en la reproducción o réplica de movimientos utilizando una mesa vibratoria fabricada para estudiar aceleraciones, velocidades y desplazamientos en una estructura experimental, para lo cual se contrastó los registros experimentalmente obtenidos con acelerómetros colocados en cada nivel y utilizando una mesa vibratoria diseñada y fabricada por el autor del proyecto de tesis, comparando estos resultados con otros resultados obtenidos con un software de cálculo estructural y analizando la misma estructura con un ordenador.

Para garantizar la validez y fiabilidad de los datos proporcionados por la mesa vibratoria se utilizó un acelerograma de entrada que sometió a movimiento sísmico la plataforma de ensayo de la mesa vibratoria, entonces se capturó un acelerogramas de salida con un acelerómetro ADXL335 colocado en la misma plataforma, entonces se hizo un análisis estadístico de estos datos para comprobar que son idénticos estadísticamente con un margen de error del cinco por ciento.

La mesa vibratoria es de tipo uniaxial y fue fabricada en el transcurso del proyecto de investigación debido a que la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano Puno a inicios del proyecto no contaba con el equipo necesario, esta mesa vibratoria fue fabricada con la utilización de un solo husillo y aproximadamente tiene un área de mil trescientos centímetros cuadrados efectivos para la realización de los ensayos.

La replicación de comportamiento dinámico estructural tiene principal protagonismo a lo largo del desarrollo de este proyecto de tesis, así como elaborar un sistema mecánico con los elementos adecuados para la fabricación de una mesa vibratoria uniaxial, replicar los datos obtenidos de un acelerograma con una mesa vibratoria, registrar el comportamiento dinámico estructural emulado en los diferentes niveles de un modelo experimental utilizando acelerómetros ADXL335, implementar esos mismos sensores en un modelo estructural

experimental para la obtención de señales, realizar un análisis estadístico para comparar si un acelerograma de entrada a la mesa vibratoria es diferente a un acelerograma de salida y emular un determinado comportamiento dinámico estructural en un modelo experimental y uno teórico.

Obteniendo como resultado que los datos de entrada son estadísticamente iguales a los de salida al replicar un determinado movimiento sísmico, esto se comprobó replicando con éxito diferentes acelerogramas. Sin embargo, existe una gran diferencia en cuanto a las aceleraciones, velocidades y desplazamientos obtenidos en los diferentes niveles del modelo estructural experimental y teórico, esto se debe a la insuficiente precisión al instalar los sensores ADXL335, así como la anisotropía de la madera balsa.

Palabras Clave: *Acelerograma, Replicar sismo, Arduino, Comportamiento Sísmico, Estructura Experimental, Acelerómetro.*

ABSTRACT

The present research project has focused on the reproduction or replication of seismic movements using a shake table made to study accelerations, velocities and displacements in an experimental structure, for which experimentally obtained records were compared with accelerometers placed at each level and using a shake table designed and manufactured by the author of this thesis project, comparing these results with other results obtained with a structural software and analyzing the same structure with a computer.

To guarantee the validity and reliability of the data provided by the shake table, an input accelerogram was used that subjected the vibration table test platform to seismic movement, then an output accelerograms was captured with an ADXL335 accelerometer placed on the same platform , then a statistical analysis of these data was made to verify that they are statistically identical with a margin of error of five percent.

The shake table is uniaxial and was manufactured during the course of the research project because the Professional School of Civil Engineering of the National University of the Altiplano at the beginning of the project did not have the necessary equipment, this shake table was manufactured with the use of a single axis and approximately has an area of one thousand three hundred square centimeters effective for the realization of the tests.

The replication of structural dynamic behavior has main protagonism throughout the development of this thesis project, as well as to elaborate a mechanical system with the suitable elements for the manufacture of a uniaxial vibrating table, to replicate the data obtained from an accelerogram with a vibrating table, register the structural dynamic behavior emulated in the different levels of an experimental model using ADXL335 accelerometers, implement those same sensors in an experimental structural model for obtaining signals, perform a statistical analysis to compare whether an accelerogram to the vibrating table is

different to an output accelerogram and emulate a certain structural dynamic behavior in an experimental and a theoretical model.

Obtaining as a result that the input data are statistically equal to the output when a certain seismic movement is replicated, this was verified by successfully replicating different accelerograms. However, there is a big difference in the accelerations, velocities and displacements obtained in the different levels of the experimental and theoretical structural model, this is caused by the insufficient precision when installing the ADXL335 sensors, as well as the anisotropy of the balsa wood.

Key Words: *Accelerogram, Earthquake Replication, Arduino, Seismic Behavior, Experimental Structure, Accelerometer.*

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN:

En el presente proyecto de investigación se buscó replicar un comportamiento sísmico para determinar las aceleraciones y desplazamientos de una estructura a escala reducida utilizando una mesa vibratoria uniaxial controlada por la plataforma de prototipos electrónica de código abierto Arduino, dicho comportamiento es provocado utilizando registros sísmicos denominados acelerogramas, pertenecientes a sismos que han tenido presencia en el pasado.

Al emular estos registros sísmicos sobre la estructura a escala reducida se obtendrán aceleraciones y desplazamientos, datos que serán puestos a contraste con los obtenidos con un software de cálculo estructural. Estos parámetros se obtuvieron mediante la implementación de sensores ADXL335 en cada nivel de la estructura a escala reducida.

La experimentación con modelos a escala reducida es una vía para validar las soluciones numéricas estudiadas, pero principalmente las obtenidas mediante el uso de softwares de cálculo estructural. Siendo las nuevas tecnologías que mediante el desarrollo de herramientas digitales que cada vez más accesibles por ser de bajo costo, permiten realizar actividades específicas como lo es el modelamiento digital de muestras y el modelamiento asistido por computador de muestras manufacturadas.

1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA:

Existe un desconocimiento del comportamiento dinámico estructural entre una estructura experimental y un modelo teórico durante la ocurrencia de un movimiento sísmico, esta

falta de conocimiento de respuesta entre valores experimentales y teóricos afecta en el diseño y posibles alternativas de construcción, al asumir comportamientos ideales.

Este contraste de resultados teóricos y experimentales muchas veces puede llevar al sesgo en la respuesta estructural de una estructura.

Acontece que uno de los acontecimientos más notables dentro de la ingeniería estructural, son las fallas producidas por movimientos sísmicos, que al ser de una naturaleza impredecible y en muchos casos catastrófica, siempre están presentes a una muy baja escala, pero en ocasiones aumentan a niveles destructivos, tanto para las estructuras como para todo ser viviente. A este fenómeno natural se suman otros, como los efectos causados por las fuerzas que el viento ejerce sobre una estructura. Estos fenómenos producen deformaciones y rupturas en juntas, conexiones, marcos, vigas, columnas, entre otros.

Otro fenómeno influyente dentro de la ingeniería son las vibraciones mecánicas, ocasionadas por equipos vibrantes en funcionamiento, estos equipos poseen una energía destructiva que no solo afecta a los mismo, sino también a la estructura que los soporta o lo protege del medio ambiente.

Se necesita acortar la valla entre el diseño por una respuesta experimental y una teórica, es entonces que la problemática de la investigación experimental saca a flote la simulación sísmica como alternativa y también posible solución a este desconocimiento de comportamiento estructural frente a una excitación sísmica real y no teórica.

1.3 PREGUNTA GENERAL:

¿Cuál será el comportamiento dinámico estructural emulado en un modelo teórico y uno experimental?

1.3.1 Preguntas Específicas:

1. ¿Cómo será el sistema mecánico con los elementos adecuados para la fabricación de una mesa vibratoria uniaxial?
2. ¿Cómo replicar los datos obtenidos de un acelerograma con una mesa vibratoria?
3. ¿Cómo registrar el comportamiento dinámico estructural emulado en los diferentes niveles de un modelo experimental utilizando acelerómetros ADXL335?
4. ¿Cómo implementar acelerómetros ADXL335 en un modelo estructural experimental para la obtención de señales?
5. ¿Estadísticamente un acelerograma de entrada a la mesa vibratoria será diferente a un acelerograma de salida?
6. ¿Cómo emular el comportamiento dinámico estructural en un modelo experimental y uno teórico?

1.4 OBJETIVO GENERAL:

Replicar el comportamiento dinámico estructural emulado en un modelo estructural teórico y uno experimental.

1.4.1 Objetivos Específicos:

1. Elaborar un sistema mecánico con los elementos adecuados para la fabricación de una mesa vibratoria uniaxial.
2. Replicar los datos obtenidos de un acelerograma con una mesa vibratoria.
3. Registrar el comportamiento dinámico estructural emulado en los diferentes niveles de un modelo experimental utilizando acelerómetros ADXL335.
4. Implementar acelerómetros ADXL335 en un modelo estructural experimental para la obtención de señales.

5. Realizar el análisis estadístico para comparar si un acelerograma de entrada a la mesa vibratoria es diferente a un acelerograma de salida.
6. Emular el comportamiento dinámico estructural en un modelo experimental y uno teórico.

1.5 HIPÓTESIS GENERAL:

El comportamiento dinámico estructural emulado en un modelo teórico y uno experimental es diferente.

1.5.1 Hipótesis Específicas:

1. El comportamiento dinámico estructural en un modelo experimental y uno teórico serán diferentes.
2. Estadísticamente un acelerograma de entrada a la mesa vibratoria será diferente a un acelerograma de salida.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES:

Brown (2007) en su tesis para optar el título de Masters of Building Science titulado “Seismic Analysis and Shake Table Modeling: Using a Shake Table for Building Analysis” menciona que:

Una mesa vibratoria que ejecuta correctamente un registro sísmico existente logrará que un modelo a escala tenga una reacción sísmica similar al edificio prototipo y que las técnicas de remediación sísmica pueden aplicarse al modelo a escala para extraer conclusiones generales aplicables a un edificio en prototipo. Así como el uso que tuvo la mesa vibratoria perteneciente a la Universidad de California del Sur, las mesas vibratorias o Shaking Tables por su traducción al inglés tienen un uso significativo en el estudio de respuesta sísmica de un edificio utilizando datos existentes a partir de acelerogramas pertenecientes a sismos pre-existentes, siendo importantes los datos obtenidos entre el modelo a escala y el edificio prototipo.

El objetivo de su estudio fue ejecutar una mesa vibratoria que produzca adecuadamente un registro sísmico logrando que los modelos a escala tengan una reacción sísmica similar a un edificio prototipo.

Llegando a las siguientes conclusiones:

- 1) A partir de los datos de prueba, se puede ver que la mesa vibratoria se restablece en orden de trabajo. La mesa de agitación puede ejecutar tanto ondas seno como ondas de sismo. Cuando se ejecuta una onda senoidal a 1 Hz , el acelerómetro de la mesa vibratoria envía una forma de onda de 1 Hz de vuelta al ordenador.

- 2) Los datos de prueba también muestran que la tabla de agitación parece funcionar de manera consistente. Esto es más evidente en los archivos de datos tomados de los pisos 2° y 3° inferiores, donde hay menos variación en las formas de onda, y las tres pruebas parecen coincidir más estrechamente. La tabla de agitación también puede crear pruebas repetibles.
- 3) Cada nivel del modelo reaccionó predeciblemente en cada prueba. Hubo mayor deflexión en los niveles superiores y menor deflexión en el nivel más bajo. El modelo reaccionó como se esperaba cuando se instaló el refuerzo en el modelo. Las reacciones del modelo son similares a las reacciones del edificio del prototipo.
- 4) El refuerzo redujo la aceleración y el desplazamiento en todos los pisos del modelo y aumentó la rigidez del modelo en un 130%. Sin embargo, una mayor rigidez aumentará el estrés en las articulaciones de la carrera, y podría conducir a más daño futuro en el edificio del prototipo. La sacudida del modelo se redujo mucho en comparación con las pruebas sin el refuerzo. El refuerzo aumentó la rigidez en un 120%.

Muhlenkamp (1997) en su tesis para optar el título de Master of Science titulado “Analysis, Design, and Construction of a Shaking Table Facility” afirma que:

La mesa de vibración es una herramienta importante para la realización de investigaciones experimentales en las áreas de la identificación estructural, la evaluación y el control. Teniendo como propósito principal mediante la simulación de movimientos sísmicos estudiar sus efectos en modelos estructurales a escala reducida tales como edificios, torres y equipos mecánicos sensibles a vibraciones.

Teniendo como objetivo diseñar un sistema de mesa vibratoria electrohidráulica compuesta de varios componentes diseñados para trabajar de manera uniforme y eficaz todos juntos, cada componente del sistema de mesa vibratoria siendo diseñado sobre la

base de los requisitos de todo sistema y rentabilidad junto al estado de técnica unidireccional de la mesa vibratoria.

Llegando a las siguientes conclusiones:

- 1) La mesa vibratoria es una instalación de prueba unidireccional de vanguardia, capaz de probar el comportamiento de modelos estructurales escalados bajo cargas dinámicas (en tiempo real).
- 2) La mesa de vibración es totalmente funcional y el trabajo en curso es confuso en la utilización de las capacidades de adquisición de datos y procesamiento de señales para implementar estrategias de control de la base de aceleración y parámetros de control.
- 3) La finalización de la instalación de mesa vibratoria ha abierto las puertas para investigaciones nuevas.
- 4) Las aplicaciones futuras de la mesa incluyen control de vibración pasivo y activo, identificación estructural y detección de daño no destructivo basado en análisis de firma dinámica.

Romero (2016) en sus tesis para optar el título de Ingeniero Civil titulado “Implementación de una Mesa Vibratoria para el Análisis Dinámico de Estructuras Civiles a Escala en los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato” afirma que:

La simulación mediante el uso de mesas es una parte importante en la ingeniería estructural, ya que mediante estos procesos se ha desarrollado y logrado entender de una mejor manera el comportamiento de elementos, modelos o sistemas estructurales, tanto de acero, mampostería, concreto armado, madera, etc.

En principio se ensaya los modelos con el objeto de evaluar el comportamiento total de la estructura, estos modelos pueden ser tanto en escala natural y reducida, siendo

el ensayo de mesa vibratoria la forma más directa para simular el comportamiento sísmico de estructuras, está limitado a modelos no muy pesados, no muy grandes o no muy rígidos, es decir que teniendo en cuenta la dificultad existente para ensayar modelos a escala natural, se ensayan normalmente modelos a escala reducida.

Teniendo los siguientes objetivos:

- 1) Seleccionar un sistema de mesa vibratoria que permita efectuar simulaciones en estructuras a escala con un peso máximo de 250 *Kg*.
- 2) Implementar la mesa vibratoria en los laboratorios de Ingeniería Civil para simular el movimiento del suelo generado por sismos.
- 3) Construir estructuras civiles a escala para su análisis dinámico.
- 4) Implementar sensores de medición para la obtención de datos de la simulación sísmica en las diferentes estructuras a estudiar.
- 5) Obtener resultados gráficos del análisis dinámico de las estructuras frente a una simulación sísmica.

Llegando a las siguientes conclusiones:

- 1) Se implementó un sistema de mesa vibratoria accionada por un sistema neumático el cual cumple con los parámetros establecidos en peso y medidas para la simulación de las estructuras a escala.
- 2) La implementación de sensores para el análisis dinámico puede visualizarse tanto gráficamente en tiempo real como en exportación de datos numéricos a software especializado para su posterior análisis.
- 3) Se obtuvieron resultados gráficos del análisis dinámico experimental mediante acelerómetros y flex-sensor los cuales sirven para un entendimiento teórico-práctico de la comunidad estudiantil de la dinámica estructural.

4) Se construyeron estructuras de diferente escala para el ensayo en la mesa vibratoria de las cuales se extrajeron datos para la comprobación de los objetivos planteados.

Barnes (2012) en su tesis para optar el título de Bachelor of Science titulado “Seismic Modeling With an Earthquake Shake Table” menciona que:

La mesa vibratoria que utilizó para su investigación en modelamiento sísmico utilizó guías de movimiento lineal (rieles) adquiridas de la empresa LM76, la cual se dedica a la producción y venta de guías de movimiento lineal para el sector industrial, del modelo particular llamado Speed Demon SG, de pista de cuerpo de aluminio y ejes de acero, que vienen a ser los puntos de contacto para las ruedas de movimiento de la plataforma. Menciona también que los sensores para la captura de las aceleraciones son sensores ADXL335, y el sistema de control para enlazar los sensores y actuadores fue la plataforma de prototipos electrónica de código abierto Arduino R3.

Teniendo como objetivo hacer un modelamiento sísmico con una mesa vibratoria debido a la fiabilidad de este instrumento para reproducir movimientos telúricos.

Concluyendo en lo siguiente:

- 1) Hay algunos problemas de diseño que podrían mejorarse.
- 2) Las guías lineales deben ser alargadas.
- 3) El motor de dirección Y necesita más torque.
- 4) Los motores de velocidad variable serían deseables.
- 5) Los circuitos y la electrónica podrían incluirse.

Mojiri (2013) en su tesis para optar el título de Master of Applied Science titulado “Shake Table Seismic Performance Assessment and Fragility Analysis of Lightly Reinforced Concrete Block Shear Walls” menciona que:

Los ensayos de mesa vibratoria proporcionan datos necesarios para cuantificar el rendimiento sísmico de una estructura en términos de ductilidad, capacidad de desplazamiento, absorción y disipación de energía, cantidad de daño en sus elementos estructurales y patrón de agrietamiento, siendo rastreados también los modos de fallo durante las pruebas. Resultados que han sido utilizados para desarrollar y calibrar modelos analíticos sencillos para predecir la respuesta sísmica de sus elementos estructurales.

Siendo de gran utilidad la comparación entre modelos a escala reducida que representan estructuras reales, teniendo similitud de modo de fallo entre una estructura a escala reducida y una estructura real al reproducir el mismo registro de acelerograma del sismo que afectó a la estructura real aplicado a la estructura en escala reducida.

El objetivo de esta investigación fue proporcionar datos necesarios para cuantificar el rendimiento sísmico de mampostería en términos de ductilidad, capacidad de desplazamiento, absorción y disipación de energía. La cantidad de daño a la mampostería, su patrón de agrietamiento y los modos de fallo. Los resultados se utilizarían para desarrollar y calibrar modelos analíticos sencillos para predecir la respuesta sísmica de mampostería, que posteriormente se utilizará para desarrollar una herramienta de evaluación de la fragilidad para la clase de paredes de concreto armado.

Llegando a las siguientes conclusiones:

- 1) El diseño de las paredes no cumplió con las limitaciones verticales máximas de espaciamiento de refuerzo del código de diseño de albañilería canadiense para las categorías de ductilidad limitada o de pared moderadamente dúctil.
- 2) Como tal, basándose en la separación de refuerzo, la pared califica sólo para la categoría de construcción convencional que está restringida a zonas sísmicas bajas.

- 3) Los resultados se utilizaron para la cuantificación del desempeño sísmico y el desarrollo de herramientas analíticas como la mesa vibratoria para la predicción del desempeño sísmico.
- 4) Se presentaron observaciones generales en términos de patrones de fisuración y modos de fallo de las paredes ensayadas y los resultados sobre la resistencia lateral, respuesta histórica, propiedades dinámicas y la contribución de diferentes componentes de desplazamiento a la respuesta de las paredes.
- 5) Finalmente, se presentó el desarrollo de modelos analíticos y herramientas de evaluación de la fragilidad analítica de las paredes ensayadas.

2.2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO:

2.2.1 Comportamiento Dinámico Estructural:

En un sentido amplio, un sistema dinámico es aquel cuyas variables experimentan variaciones en el tiempo y, si se conocen las influencias externas que actúan sobre el sistema, entonces podrá predecirse el comportamiento de este (Cassano, 2009).

Un sistema dinámico es variable con variaciones temporales, estas a su vez serían influencias externas sobre el sistema, se permite “predecir” el comportamiento de las variables temporales una vez conocidas estas acciones externas, es el caso de este proyecto de tesis, donde al conocer el acelerograma del sismo que actúa sobre un modelo estructural experimental se obtiene datos in-situ para determinar valores de aceleraciones, velocidades y desplazamientos.

2.2.1.1 Definición de acción dinámica:

Una acción tiene carácter dinámico cuando su variación con el tiempo es rápida y da origen a fuerzas de inercia comparables en magnitud con las fuerzas estáticas. Algunas fuentes importantes de vibraciones estructurales son:

- Sismos
- Viento
- Olas y corrientes de agua
- Explosiones e impactos
- Cargas móviles (vehículos, personas, etc.)

La definición de estas cargas externas puede distinguirse entre: determinista y no determinista, ésta última denominada también estocástica o aleatoria.

Como indica Cassano (2009): se considera determinista cuando su variación temporal es perfectamente conocida y no determinista cuando alguno o todos sus parámetros son definidos estadísticamente.

2.2.1.2 Respuesta dinámica:

Cualquier magnitud que pueda caracterizar el efecto de una carga dinámica sobre la estructura, una carga definida como determinista da origen a una respuesta, que también es determinista.

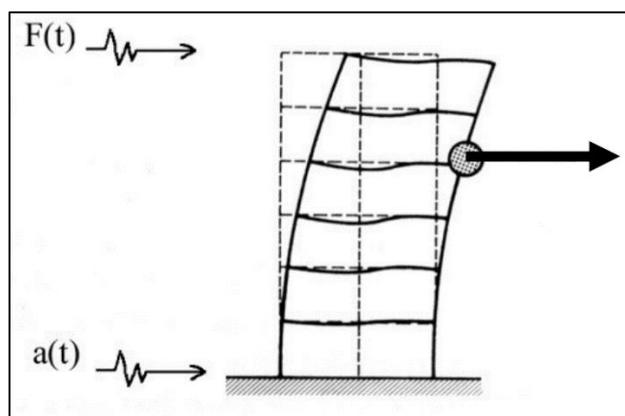


Figura 001: Respuesta dinámica: aceleraciones, velocidades y desplazamientos.
Cassano (2009)

Es el resultado del efecto aplicado llamado cargas dinámicas en una edificación o estructura. En la siguiente figura se observa la respuesta dinámica en un edificio que se

produce tras un movimiento del suelo y que puede traer consigo desplazamientos, velocidades y aceleraciones.

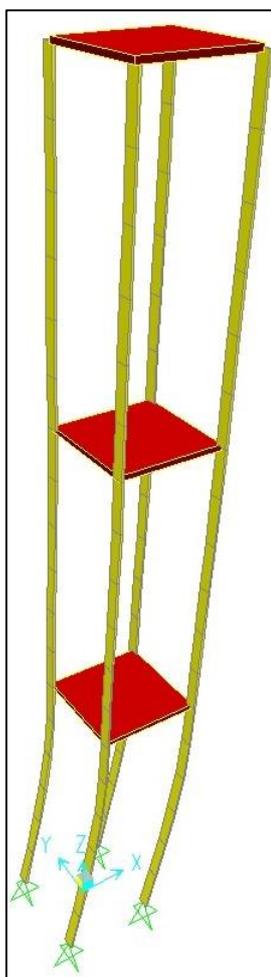


Figura 002: Respuesta dinámica de una estructura.
Fuente: Propia

2.2.1.3 Acciones y fuerzas dinámicas:

Las acciones dinámicas definidas utilizando representaciones deterministas, son funciones del tiempo cuyo valor en cada instante es conocido.

Como indica Cassano (2009): Este tipo de representación es apropiado para evaluar el comportamiento de una estructura “a posteriori” del acontecimiento que dio lugar a dicha acción. Por ejemplo, evaluar el comportamiento de un edificio nuevo ante el terremoto ocurrido en México en 1986 (del que se poseen registros). El diseño de una

estructura no puede encararse en base a acciones deterministas, pues nada nos asegura que la acción estudiada volverá a repetirse.

2.2.1.4 Liberación de energía:

Un sismo es la liberación de energía elástica almacenada durante años por movimientos relativos entre las placas tectónicas. Esta liberación se presenta como una ruptura entre los contactos de las placas acusando vibraciones en la corteza terrestre. Con respecto a las características de los movimientos sísmicos, se consideran componentes horizontales y verticales en términos de aceleración, velocidad, desplazamiento, periodo predominante y duración.

Estas características estandarizadas de movimientos terrestres están definidas por las características del suelo. En general, la aceleración es mayor en terrenos con un periodo natural corto (por ejemplo, roca), y el desplazamiento máximo es mayor en terrenos blandos donde el periodo natural es más largo (por ejemplo, suelos blandos).

Los sismos son causados por la descarga abrupta de tensiones acumuladas a lo largo de los años en las fallas de la corteza terrestre o zonas volcánicas. Estos liberan una gran cantidad de energía elástica acumulada en el suelo y generan movimientos que se transmiten como aceleraciones (proporcionales a fuerzas, $F = m \times a$), desplazamientos y velocidades a los sistemas estructurales en todas las direcciones.

Un sismo puede darse por actividad volcánica, colapso de los techos de cavernas, fallas geológicas, cambio de polaridad del campo magnético, etc., por lo que no pueden ser controlados o predichos fácilmente. Las características principales de un sismo son las siguientes:

- Foco o hipocentro: lugar en la corteza terrestre donde ocurre la descarga de energía al suelo y se genera el sismo

- Epicentro: punto de la superficie en la corteza terrestre más cercana al foco. Es el lugar en la superficie donde generalmente se presentan las mayores aceleraciones.
- Magnitud: en general, la magnitud es una propiedad física medible de un sistema físico, a la cual se le pueden asignar valores. En un sismo, la propiedad física medida es la cantidad de energía liberada en el suelo, y se representa generalmente por medio de la escala de magnitud de momento sísmico, la escala de magnitud Richter, la escala de onda superficial o la escala de magnitud de las ondas de cuerpo.
- Intensidad: es la medida de los efectos provocados por un sismo en un lugar determinado. La intensidad varía dependiendo del lugar en donde fue medida.

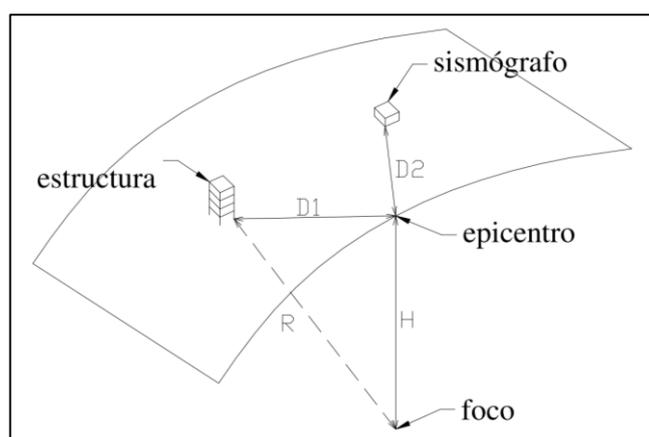


Figura 003: Características de un sismo.
Cassano (2009)

Las consecuencias de los sismos significan anualmente numerosas pérdidas humanas, además de millonarias pérdidas en la infraestructura de los países y pérdidas invaluable de construcciones históricas. Aunque no es posible predecir un sismo, sí se pueden realizar modelos de predicción de catástrofes. Estos modelos se encargan de predecir las pérdidas monetarias causadas por posibles sismos, para la creación de programas de prevención en países.

El modelamiento de catástrofes busca prevenir la desestabilización económica de países o empresas, a partir de cálculos estadísticos de probabilidad de ocurrencia de sismos. Estos estudios involucran muchas variables tales como la probabilidad de ocurrencia de un sismo, la magnitud del sismo, la vulnerabilidad de las construcciones de la zona, etc.

2.2.2 Comportamiento Dinámico Estructural Emulado:

El comportamiento dinámico estructural emulado en esta investigación es aquel dado por la interacción suelo – estructura, en esta interacción tiene como principal protagonista a las aceleraciones provocadas por un sismo o excitación sísmica, este conjunto de aceleraciones se plasma en una base de datos llamada “acelerograma” en la cual nosotros tenemos aceleraciones por intervalos de tiempo que comúnmente son 0.02s, estos datos en conjunto son los que se utilizan para replicar el movimiento sísmico de una estructura, en donde el principal objetivo es el de lograr una respuesta dinámica estructural similar a la que se obtuvo en el momento del suceso en una estructura de ensayo experimental.

El principal dato emulado es la aceleración, de esta se obtiene las velocidades y desplazamientos, datos los cuales servirán para posteriores estudios.

2.2.3 Modelo Estructural:

2.2.3.1 Modelo Estructural Teórico:

El concepto de modelo estructural teórico es una estructura igual en dimensiones y propiedades mecánicas que el modelo experimental, pero a diferencia del antes mencionado, este es un modelo teórico que es ensayado mediante su simulación en un software de cálculo estructural.

Es algo ideal, donde la anisotropía se debe tomar con cuidado, en especial para estructuras teóricas ensayadas con madera, este quizás es uno de los puntos débiles de la investigación.

Un modelo estructural teórico viene a dar una idea general e ideal de lo que debería ser el modelo real, existiendo siempre un contraste de este con el experimental. Muchas veces si no es en su totalidad que el diseño de estructuras se apoya en una respuesta teórica de estudio. La ventaja del estudio de modelos estructurales teóricos es principalmente el rápido modelado y obtención de resultados a comparación de su contraparte, el modelo estructural experimental.

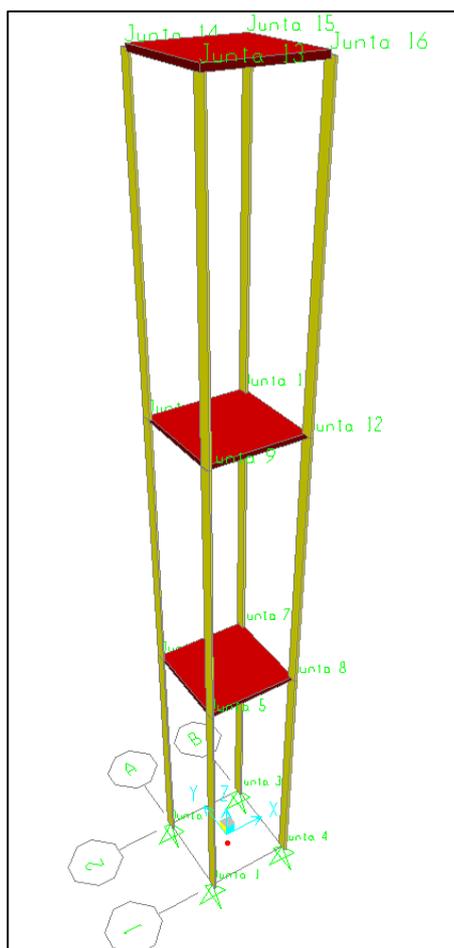


Figura 004: Modelo teórico.
Fuente: Propia

En la imagen anterior se puede observar un modelo teórico, donde la respuesta a un posible comportamiento dinámico o excitación sísmica brinda resultados de diseño en base a una respuesta ideal de la estructura.

2.2.3.2 Modelo Estructural Experimental:

Un modelo experimental es aquel que se observa físicamente construido con las dimensiones que se utilizaron para detallar y analizar el modelo teórico, igualmente con las propiedades mecánicas, por lo que el material de construcción utilizado debe ser el mismo en cuanto a sus propiedades que el modelo teórico, esto a fin de validar un posterior análisis comparativo.



Figura 005: Modelo estructural experimental.
Fuente: Propia

Como se observa en la anterior figura y en contraste con lo definido en el subcapítulo anterior que habla de modelos teóricos, este modelo experimental está

construido con un material con propiedades mecánicas y dimensiones iguales a las del modelo teórico, en base a esto es que su posterior comparación tendrá base y validez, salvo que la anisotropía sea una característica que influya y sea un factor determinante, provocando un alto contraste en cuanto a los futuros resultados.

2.2.4 Sistema Mecánico:

2.2.4.1 Definición De Sistemas Mecánicos

Un sistema mecánico es aquel sistema constituido fundamentalmente por componentes, dispositivos o elementos que tienen como función específica transformar o transmitir el movimiento desde las fuentes que lo generan, transformando un tipo de energía en un determinado movimiento buscado según sea el fin que precise.

2.2.4.2 Características De Un Sistema Mecánico:

Se caracterizan por presentar elementos o piezas sólidos, con el objeto de realizar movimientos por acción o efecto de una fuerza. En ocasiones, se asocia con sistemas eléctricos que producen movimiento a partir de un motor accionado por la energía eléctrica. Este es el caso de este proyecto de tesis.

En general la mayor cantidad de sistemas mecánicos usados actualmente son propulsados por motores de combustión interna. En los sistemas mecánicos, se utilizan distintos elementos relacionados para transmitir un movimiento.

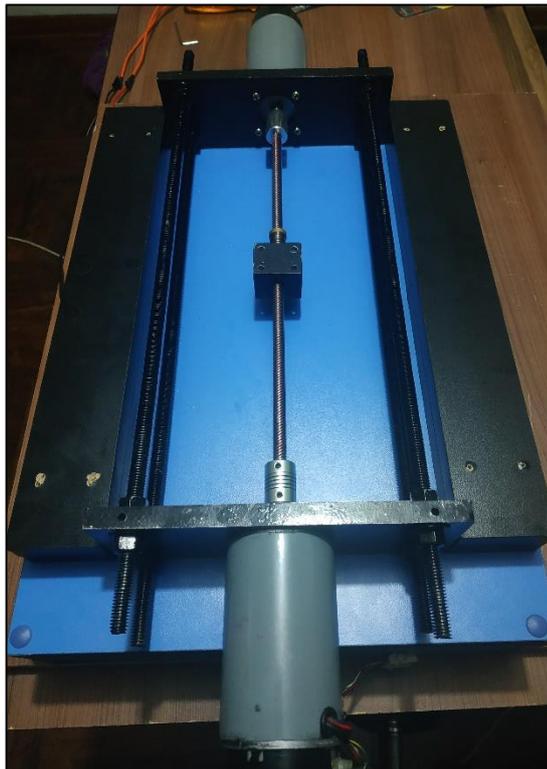
Como el movimiento tiene una intensidad y una dirección, en ocasiones es necesario cambiar esa dirección y/o aumentar la intensidad, y para ello se utilizan mecanismos.

En general el sentido de movimiento puede ser circular (movimiento de rotación) o lineal (movimiento de translación) los motores tienen un eje que genera un movimiento circular.

2.2.4.3 Funcionamiento De Un Sistema Mecánico:

Mediante el uso de alguna fuente de energía como lo puede ser un motor, se aprovecha el movimiento del eje para convertir este movimiento rotacional en desplazamientos lineales.

En el caso del sistema mecánico correspondiente a la siguiente figura, el movimiento circular propiciado por los ejes de los dos motores concéntricos es transmitido por un husillo conectado a estos que mediante una camisa inserta en el husillo puede transferir y convertir ese movimiento rotacional en uno direccional. Este movimiento direccional es aprovechado por una plataforma que se mueve gracias al movimiento rotacional del husillo.



*Figura 006: Sistema mecánico de un solo husillo.
Fuente: Propia*

2.2.5 Acelerograma:

Es la representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un punto durante un movimiento sísmico.

Estos valores (aceleraciones) se obtienen mediante unos instrumentos llamados acelerógrafos, que registran la aceleración del suelo (X, Y & Z) siendo dos horizontales y una vertical. Al ser la variación de la aceleración muy irregular en el tiempo, es necesario que la captación de datos se realice en intervalos muy pequeños de tiempo, utilizándose valores de $0.01s$ o $0.02s$ generalmente. Un acelerograma se caracteriza por capturar datos altamente irregulares y oscilatorios, con pequeñas amplitudes iniciales que crecen rápidamente hasta alcanzar los máximos valores y decrecer rápidamente hasta que se detiene el movimiento y se experimenta un estado de quietud (García, 1998).

Con objeto de estudio se suele utilizar acelerogramas sintéticos que ya han sido corregidos y filtrados, esto para eliminar el ruido que está presenta en los acelerogramas obtenidos en sismos reales.

Existen muchos programas generadores de estos acelerogramas, entre ellos tenemos el AcelSin que es un software para la generación de acelerogramas sintéticos para cálculos dinámicos en estructuras.

En la siguiente tabla se puede observar un catálogo de sismos peruanos, en el cual está presente el Código en la primera columna que sirve para identificar cada sismo, la Fecha de suceso, la componente que es muy importante, debido a que por cada sismo se registran dos componentes horizontales y una vertical, y por último la columna Data que indica el número de lecturas para cada sismo, siendo este el número de datos obtenidos.

Tabla 01

Catálogo de Sismos Peruanos

COD	FECHA	DENOMINACIÓN	COMPONENTE	DATA	PGA	PGV	PGD
7031	31-ene-51	1639 GCT	VERTICAL	1479	18.66	-0.54	-0.29
7032	31-ene-51	1639 GCT-N82W	HORIZONTAL	1478	-60.44	-1.65	-0.31
7033	31-ene-51	1639 GCT-NO8W	HORIZONTAL	1480	45.70	0.92	0.15
7034	17-oct-66		VERTICAL	3284	94.25	10.61	13.50
7035	17-oct-66	N82W	HORIZONTAL	3283	-180.59	13.23	7.35
7036	17-oct-66	NO8E	HORIZONTAL	3282	-269.34	-21.60	-16.60
7037	31-may-70		VERTICAL	2252	73.52	4.51	1.48
7038	31-may-70		HORIZONTAL	2259	-104.82	4.71	1.55
7039	31-may-70		HORIZONTAL	2259	-97.75	6.98	2.64
7040	29-nov-71		VERTICAL	2004	23.00	1.17	0.56
7041	29-nov-71	N82W	HORIZONTAL	2010	53.55	4.08	1.74
7042	29-nov-71	N08E	HORIZONTAL	2010	86.54	-4.22	-1.25
7043	5-ene-74		VERTICAL	1805	-30.32	-2.04	0.66
7044	5-ene-74	N82W	HORIZONTAL	1804	66.76	4.03	0.59
7045	5-ene-74	NO8E	HORIZONTAL	1804	-72.28	-2.15	-0.45
7046	5-ene-74	ZARATE L	HORIZONTAL	1641	-139.59	3.23	1.30
7047	5-ene-74	ZARATE V	VERTICAL	1641	-77.10	-2.27	0.76
7048	5-ene-74	ZARATE V	HORIZONTAL	1642	-156.18	4.40	1.08
7049	3-oct-74	1421 GCT	VERTICAL	4899	99.75	-7.03	-5.81
7050	3-oct-74	1421 GCT NO8E	HORIZONTAL	4899	178.95	10.30	-5.34
7051	3-oct-74	1421 GCT N82W	HORIZONTAL	4899	-192.49	14.48	6.41
7052	3-oct-74	1421 GCT N82W	HORIZONTAL	4879	192.35	-20.48	7.93
7053	3-oct-74	1421 GCT	VERTICAL	4879	-126.32	12.00	-4.61
7054	3-oct-74	1421 GCT	HORIZONTAL	4879	-207.12	16.94	8.03
7055	9-nov-74		VERTICAL	2390	-28.00	-3.24	-1.79
7056	9-nov-74		HORIZONTAL	2392	46.21	-3.60	1.80
7057	9-nov-74		HORIZONTAL	2391	-69.21	-4.91	-1.81
7058	9-nov-74	LA MOLINA	HORIZONTAL	1972	-116.78	-7.89	2.43
7059	9-nov-74	LA MOLINA	VERTICAL	1972	-41.26	5.33	2.59
7060	9-nov-74	LA MOLINA	HORIZONTAL	1971	-93.71	-5.35	1.28

Recuperado de: <http://ceмос.cismid-uni.org/ceмос-redacis.html>

Cada acelerograma por componente tiene la siguiente estructura:

Tabla 02

Acelerogramas indicando tiempo y aceleración

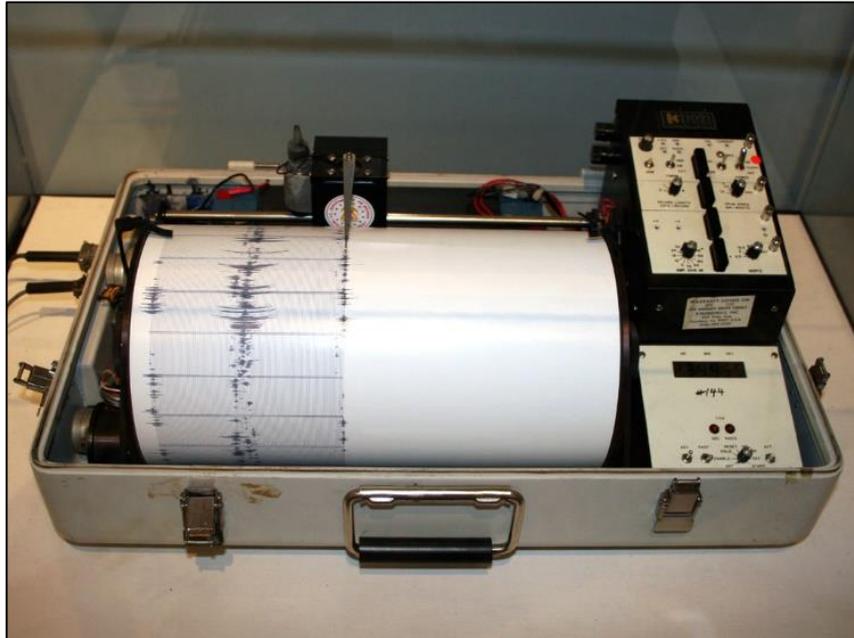
Tiempo seg	7031 cm/seg²	7032 cm/seg²	7033 cm/seg²	7034 cm/seg²	7035 cm/seg²	7036 cm/seg²
-	-8.120	-60.440	-45.470	4.150	-11.410	-14.250
0.02	-1.800	16.200	0.240	-5.000	-2.690	-7.780
0.04	14.050	45.480	12.080	-4.570	-3.080	-6.300
0.06	18.660	3.730	9.310	0.900	-4.990	1.490
0.08	8.310	-6.390	0.370	9.030	0.270	2.990
0.10	-14.100	-12.070	-10.840	6.920	3.590	-1.750
0.12	-16.300	-46.370	-8.750	-3.050	-10.100	1.730
0.14	1.320	-40.290	9.920	-9.280	-18.250	5.060
0.16	6.960	5.490	4.980	-10.090	0.340	0.140
0.18	6.110	26.290	-6.010	-1.000	8.480	-4.580
0.20	10.910	14.730	20.020	5.890	-2.290	0.270
0.22	8.260	15.310	40.510	2.840	-0.780	6.340
0.24	-13.690	-4.600	3.810	-3.010	4.280	3.440
0.26	-17.940	-16.630	-31.220	-8.850	-0.870	1.710
0.28	2.880	-3.170	-30.120	-9.430	-1.690	-2.350
0.30	12.000	-8.730	-15.420	-0.130	8.090	-4.160
0.32	10.250	11.680	12.950	6.760	11.220	-0.100
0.34	8.620	24.100	16.800	4.640	3.180	-4.360
0.36	1.560	-13.320	13.090	6.330	-1.470	-3.770
0.38	-8.590	-24.000	8.910	7.180	0.220	3.120
0.40	-8.320	12.880	-17.670	3.930	3.240	0.360
0.42	0.980	20.670	-32.310	2.200	5.670	2.890
0.44	9.650	5.250	-8.640	0.130	3.550	8.300
0.46	5.310	2.590	32.920	-4.630	0.610	-0.830
0.48	-4.620	18.250	45.700	-7.450	2.130	-6.090
0.50	-5.630	5.110	12.800	-6.210	1.520	-2.190
0.52	2.230	-43.750	-13.090	-5.390	-5.010	-3.510
0.54	0.560	-20.960	-10.920	-6.050	-1.410	-6.270
0.56	-2.040	37.540	-3.720	0.810	0.780	-2.990

Recuperado de: <http://ceмос.cismid-uni.org/ceмос-redacis.html>

2.2.5.1 Medición y Registros De Acelerogramas:

Tanto la propagación como también las características de una onda sísmica se pueden estudiar utilizando instrumentos que registran vibraciones sísmicas conocidos como sismógrafos. Se puede obtener desplazamientos, velocidad o aceleración del suelo, el cual está determinado por el rango útil de frecuencias a medir (ω), con respecto a la frecuencia natural del instrumento (ω_n). Se registra el movimiento respecto al tiempo de un péndulo

que va oscilar libremente de un marco sujeto al suelo, esto se registra con el sismógrafo. Este movimiento va siendo registrado con una pluma sobre un tambor rotatorio. El movimiento del péndulo se convierte en señales electrónicas que se irán registrando en la memoria de un ordenador, esto se nota en los sismógrafos modernos.



*Figura 007: Sismógrafo.
García (1998)*

2.2.5.2 Acelerómetro:

Los acelerómetros que también conocemos como sismógrafos de movimiento fuerte son diseñados para registrar directamente el movimiento del suelo cercano y a su vez producen el registro conocido como acelerograma, este instrumento funciona tal que registre la aceleración del suelo en función del tiempo en los tres ejes. El análisis sísmico requiere una digitalización numérica de estos acelerogramas para convertir este registro en datos Aceleración – Tiempo.

La información directa del movimiento sísmico que es dada por los acelerogramas, es apta para estimar una respuesta en estructuras como lo pueden ser

puentes y edificios. La aceleración como medida de la intensidad se constituye como un parámetro base en el análisis estructural sísmico. (Goytia & Villanueva, 2001)

En la siguiente ilustración se observa los acelerogramas registrados durante el sismo del 5 de mayo de 1976 en Friuli (Italia).

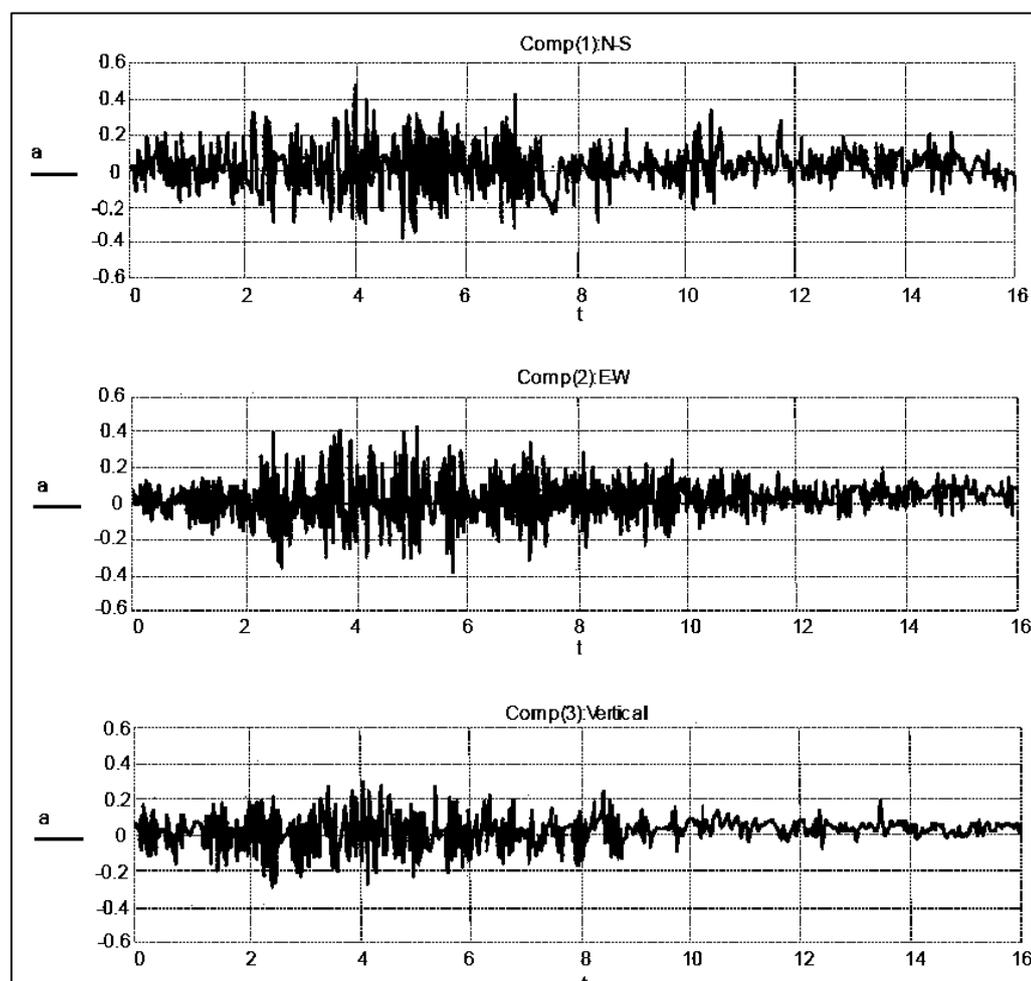


Figura 008: Acelerogramas de un sismo en sus tres componentes.
Goytia & Villanueva (2001)

2.2.5.3 Ondas Sísmicas:

Al suceder la enorme y súbita liberación de energía en el hipocentro del sismo o foco, se propaga en forma de vibraciones u ondas elásticas de deformación. Estas deformaciones generadas por el paso de una onda son elásticas, de manera que las velocidades de la propagación se determinarán sobre la base del módulo elástico y la densidad de los materiales a través de los cuales la onda viaja (Goytia & Villanueva, 2001).

2.2.5.3.1 Ondas de Cuerpo:

Como se observa en la ilustración, se tiene las deformaciones producidas por las ondas de cuerpo u onda P en el primer caso y en el segundo la onda S.

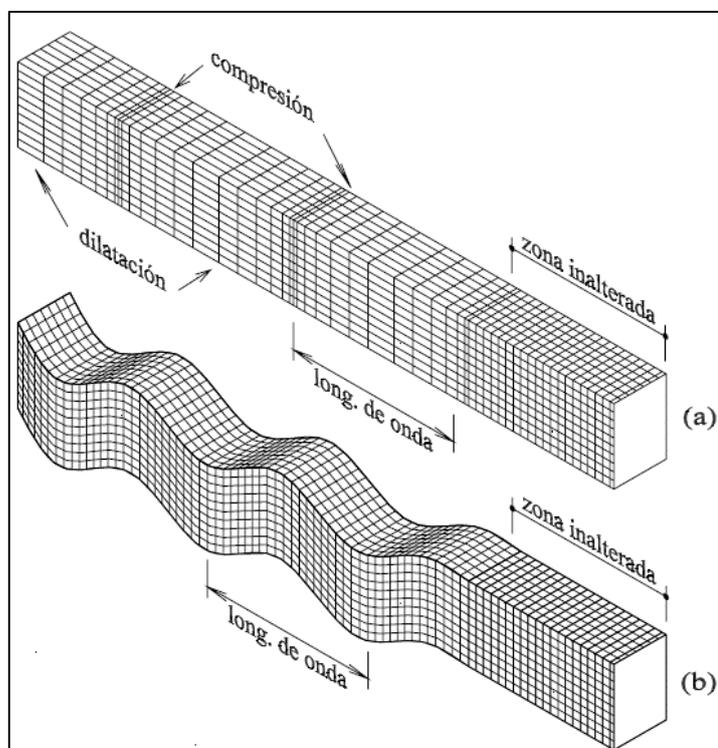


Figura 009: Deformaciones producidas por ondas de cuerpo P y S.
Goytia & Villanueva (2001)

- Ondas P (Primarias): También conocidas como ondas dilatantes, producen movimiento de las partículas en dirección de la propagación generando dilatación y compresión del mismo.
- Ondas S (Secundarias): También conocidas como ondas de cortante o transversales, esta onda produce un movimiento de partículas en sentido ortogonal a la dirección de la propagación.

Cuando existe movimiento sísmico en la mayoría de los casos las ondas P son registradas primero, seguidas por las ondas S. Con un movimiento de arriba hacia abajo y movimiento lateral, esto en perjuicio de estructuras logrando graves daños, las ondas P se

propagan tanto en medios sólidos y medios sólidos, sin embargo, las ondas S únicamente se propagan en medios sólidos, esto se debe a que los

2.2.5.3.2 Ondas Superficiales:

Como lo indica su nombre, el movimiento se limita a las cercanías de la superficie.

Estas ondas se dividen en ondas L y ondas R (Love y Rayleigh respectivamente).

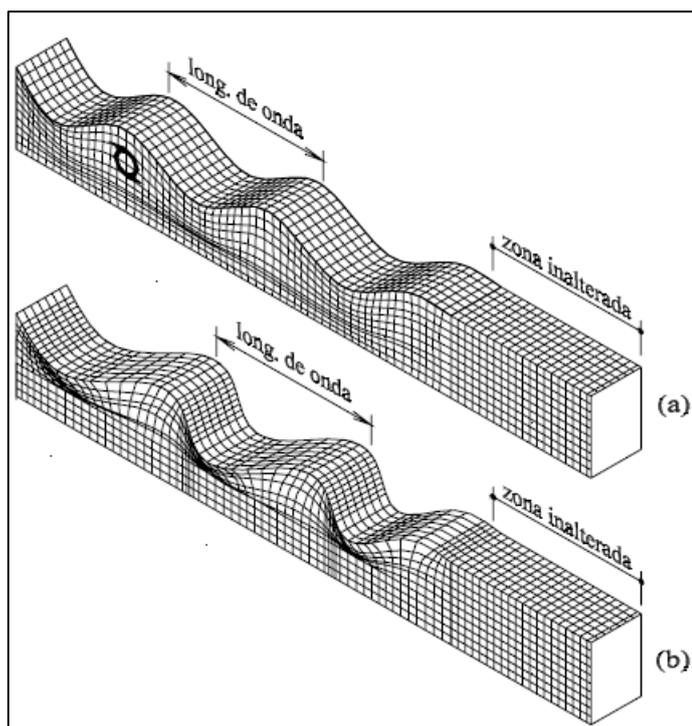


Figura 010: Deformaciones causadas por ondas superficiales L y R.
Goytia & Villanueva (2001)

Entre los principales sismos que representaron grandes estragos en el siglo XX podemos observar los siguientes:

- Onda L (Love): Guarda similitud con las ondas S, no tiene componente vertical debido a que desplaza la superficie del suelo lateralmente sobre un plano horizontal y en sentido ortogonal a la dirección de propagación.
- Onda R (Rayleigh): El desplazamiento de estas ondas es elíptico y tiene lugar en planos ortogonales a la superficie libre.

En líneas simples, las ondas L son más veloces que las ondas R, pero ambas se expanden a menor velocidad que las ondas de cuerpo (P y S). El intervalo de llegada entre todas estas ondas puede verse de manera práctica en acelerogramas.

2.2.5.4 Consecuencias de los sismos:

Las consecuencias de un sismo pueden ser desde en la mayoría de casos imperceptibles hasta catastróficos ocasionando importantes pérdidas económicas y humanas, en la tabla que viene a continuación se menciona los sismos más representativos del Siglo XX.

Se puede observar ejemplos importantes de vibración que puede afectar a una estructura en la siguiente figura.

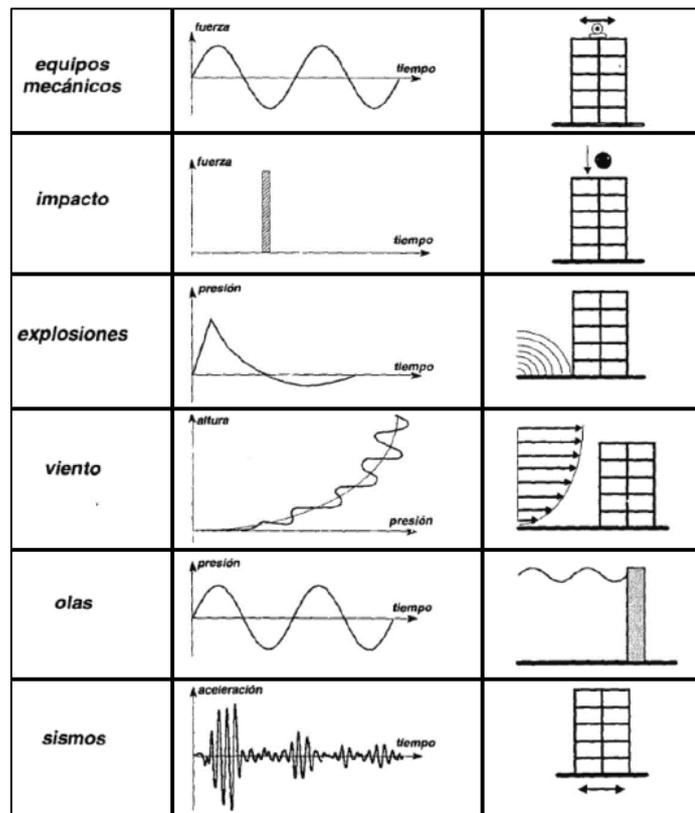


Figura 011: Tipos de Excitación Sísmica.
García (1998)

Tabla 03
Sismos más representativos del siglo XX

Fecha	Magnitud	Ciudades o Región	Consecuencias
1906, abril 18	8.3	Estados Unidos:California	700 muertos, llamado "Temblor de San Francisco". Ocasionó grandes danos; se observaron desplazamientos en el suelo. Después del temblor ocurrieron grandes incendios. Este fue el primer terremoto estudiado con detalle.
1906, agosto 16	8.6	Chile Valparaiso, Santiago	20.000 muertos
1908, diciembre 28	7.5	Italia: Regio	29.980 muertos
1920, diciembre 16	8.5	China Kansu y Stransi	200.000 muertos
1923, septiembre 1	8.3	Tokio Yokojawa	99.330 muertos, conocido como el terremoto de Kwanto. Tuvo desplazamientos de hasta 4.5 m y le sucedieron grandes incendios.
1927, mayo 22	8.0	China Nan Shan	200.000 muertos, grandes fallas, se sintió hasta Pekin.
1935, mayo 30	7.5	Paquistán Quetta	30.000 muertos, la ciudad de Quetta fue totalmente destruida.
1939, junio 25	8.3	Chile	28.000 muertos
1939, diciembre 26	7.9	Turquia Erzincan	30.000 muertos, se detectaron movimientos oscilatorios de 3.7 m de desplazamiento con movimientos trepidatorios menores.
1960, febrero 29	5.8	Marruecos Agadir	De 10.000 a 15.000 muertos, es uno de los temblores que más muertes ha ocasionado a pesar de ser baja su magnitud.
1960, mayo 22	8.5	Chile Concepcion Valparaiso	De 6.000 a 10.000 muertos, causó muchas víctimas y grandes daños en Concepción y áreas circunvecinas, dejando cerca de 2.000.000 de

			damnificados y daños cuantificados en mas de 300 millones de dólares. Produjo un maremoto que causo daños en Hawai y Japón.
1964, marzo 28	9.2	Alaska Anchorage	173 muertos, destrucción en Alaska. Se abrieron grietas en las carreteras y los vehículos en movimiento fueron sacados de su curso. Se estimó en 129 500 kilómetros cuadrados el área de daños y produjo un maremoto registrado en las costas de Hawai. Se quebrantó seriamente la economía de Alaska (Figura 2.3).
1970, mayo 31	7.7	Peru: Huara,Chimbote,Yungay	De 50.000 a 70.000 víctimas, derrumbes e inundaciones. La peor catástrofe registrada en Perú por un terremoto en este siglo.
1972, diciembre 23	5.6 6.2	Nicaragua Managua	De 4.000 a 6.000 muertos, miles de heridos. La ciudad de Managua fue casi totalmente destruida.
1976, febrero 4	6.2 7.5	Guatemala Guatemala	3.000 muertos y se calculan 76.000 heridos.
1976, agosto 27	6.3 7.9	China Noreste	655.237 muertos cerca de 800.000 heridos y danos en el área de Tanshan. Este terremoto fue probablemente el más mortífero de los últimos 4 siglos y el 2° más fuerte que registra la historia moderna.
1978, septiembre 16	7.7	Iran	De 11.000 a 15.000 muertos, muchos heridos y daños considerables en Bozonabad y áreas circunvecinas.
1984, octubre	7.1	Estados Unidos San francisco	El sismo azotó el área de la Bahía entera de San Francisco causando daños tremendos en las edificaciones del distrito de Marina (Figura 2.4). el sismo causó el colapso de la autopista de Oakland y parte del puente de la Bahía de San Francisco.

1994, enero 17	6.6	Estados Unidos	Aprox. 76 muertos, sentido en el sureste de Estados Unidos y noroeste de Mexico. Grandes danos en obras civiles y particulares. Las ciudades más dañadas fueron los Angeles y Santa Mónica, California.
-------------------	-----	----------------	---

Fuente: Goytia & Villanueva
“Texto Guía de Ingeniería Antisísmica”. Pág. 18.

2.2.6 Mesa Vibratoria:

Este aparato es también llamado “simulador sísmico” y sirve para realizar ensayos experimentales para poner a prueba una estructura y evaluar posteriormente su comportamiento dinámico estructural. Tiene la capacidad de emular movimientos sísmicos como una onda senoidal (de forma regular) y también emular acelerogramas que son datos generados por acelerógrafos y estos a su vez son datos altamente irregulares y oscilatorios, con pequeñas amplitudes iniciales que crecen rápidamente hasta alcanzar los máximos valores y decrecer rápidamente hasta que se detiene el movimiento.

2.2.6.1 Rol de un Simulador Sísmico en la Ingeniería Sismo-Resistente:

Un sismo implica una gran liberación de energía elástica almacenada durante años por movimientos relativos entre las placas tectónicas. Esta liberación de energía se presenta como una ruptura en los contactos de las placas que a su vez causan vibraciones en la corteza terrestre. Un sismo libera gran cantidad de energía en el suelo y genera movimientos que se transmiten a las estructuras como aceleraciones, velocidades y desplazamientos.

Las consecuencias de los sismos significan anualmente no sólo numerosas pérdidas humanas, sino millonarios deterioros en las estructuras y en las invaluable construcciones históricas su cada vez más cercano fin. Adicionalmente, la ocurrencia

inesperada y su gran poder de destrucción han convertido a los sismos en uno de los fenómenos naturales más temidos en el mundo (Carrillo, 2013).

2.2.6.2 Evolución de las Mesas Vibratorias:

Las primeras mesas vibratorias surgieron a finales del siglo XIX. Dichos simuladores sísmicos generaban el movimiento de manera manual por medio de una rueda con manivela y una plataforma móvil sobre rieles. Décadas más tarde se utilizaron motores eléctricos para reemplazar los mecanismos manuales. La siguiente generación de mecanismos nace con la propuesta de Jacobsen en 1930, la cual es un simulador sísmico que produce vibraciones a partir de un primer impulso. Este impulso se genera mediante un péndulo de impacto y el movimiento a la plataforma se transmite mediante un resorte. Con la ayuda de modelos a escala reducida, este tipo de simuladores fueron una herramienta esencial para realizar numerosos avances en estructuras sismo-resistentes.



Figura 012: Mesa vibratoria contemporánea.

Recuperado de: <https://peer.berkeley.edu/laboratories/uc-berkeley-shaking-table>

El principio de funcionamiento de los simuladores sísmicos en nuestra actualidad inició con los avances logrados en la segunda guerra mundial. Las mesas vibratorias modernas usan actuadores y sistemas de control avanzados para simular sismos reales o artificiales. La primera mesa vibratoria de gran tamaño ($6m \times 6m$ aproximadamente) se desarrolló en la Universidad de California, Berkeley en 1972. Esta mesa fue construida con capacidad de movimiento horizontal y vertical, e inspiró el desarrollo de otras mesas vibratorias de gran tamaño con diferentes grados de libertad en todo el mundo. Hoy en la actualidad, las mesas vibratorias se han convertido en una herramienta clave para estudiar los efectos de los movimientos sísmicos sobre las estructuras. Los resultados medidos en este tipo de ensayos dinámicos han sido fundamentales para validar, calibrar y complementar gran variedad de modelos de predicción que se utilizan para análisis, diseño y rehabilitación de viviendas, edificios, puentes, viviendas etc. (Carrillo, 2013).

Una mesa vibratoria es una plataforma móvil que simula el comportamiento sísmico de un sismo sobre un modelo estructural, tal como se observa en la siguiente ilustración. Las mesas vibratorias pueden ser clasificadas según su tamaño, el tipo de actuador que genera el movimiento y por último los grados de libertad.

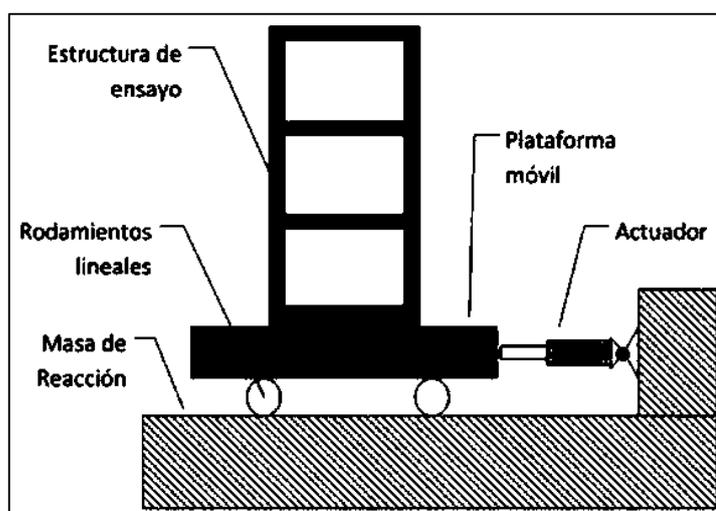


Figura 013: Esquema general de una Mesa Vibratoria.
Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v23n1/v23n1a06.pdf>

El ensayo de comportamiento sísmico en una mesa vibratoria generalmente involucra modelos a escala reducida y en las mesas vibratorias de mayor tamaño y capacidad portante permite ensayar modelos en una escala real 1:1. Sin embargo, en los últimos años se han llevado a cabo ensayos de estructuras en escala real usando mesas vibratorias como las disponibles en el E-Defense en Japón o en la Universidad de San Diego en Estados Unidos. Estas mesas permiten simular movimientos hasta en seis grados de libertad.

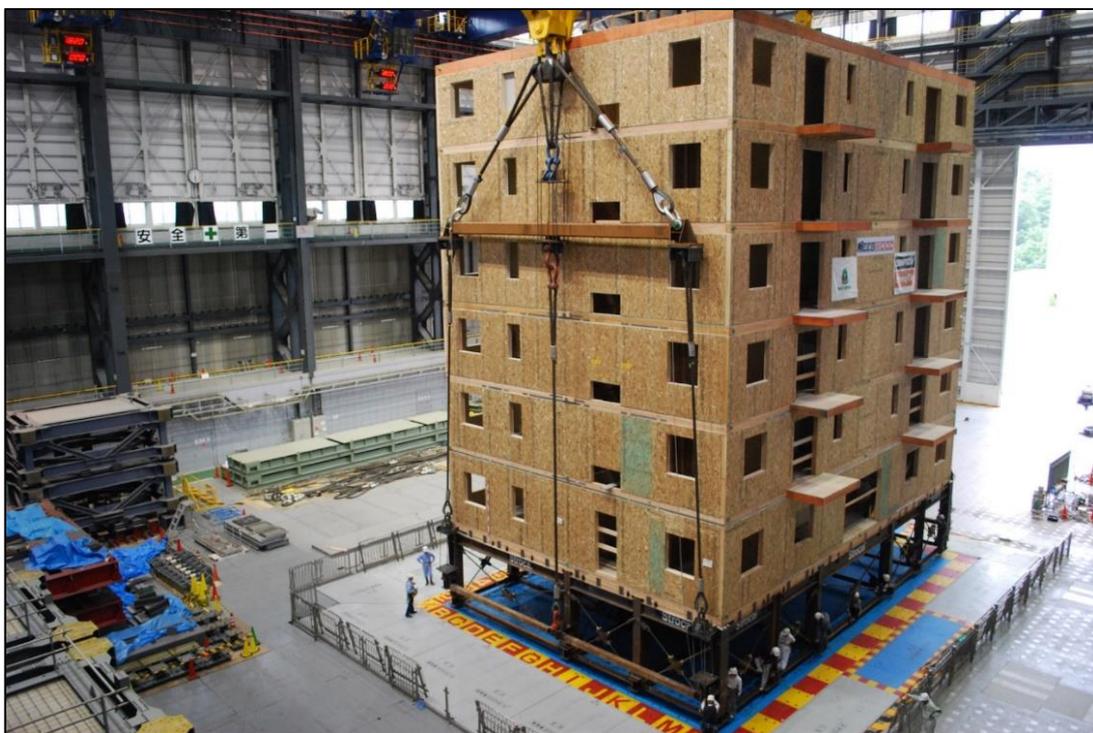


Figura 014: E-Defense, la Mesa Vibratoria más grande del mundo.

Recuperado de: <https://www.tuexperto.com/2009/09/21/un-edificio-de-seis-plantas-resiste-un-fuerte-terremoto-simulado/>

2.2.6.3 Clasificación:

Las mesas son clasificadas según su tamaño como:

- Pequeñas (dimensiones menores a $3 \times 3m$)
- Medianas (dimensiones entre $3 \times 3m$ a $9 \times 9m$)
- Grandes (dimensiones mayores a $9 \times 9m$).

Las Mesas Vibratorias Grandes, permiten representar el comportamiento de estructuras a escala completa, e involucra una costosa construcción y operación.

Para representar completamente un sismo real, las mesas vibratorias deberían tener la capacidad de moverse en 3 direcciones, por lo cual se componen de piezas costosas, además de conocimientos especiales y experiencia en el desarrollo de su construcción y operación.

Ante ello, las mesas vibratorias de tamaños menores y unidireccionales son más convenientes para el análisis de modelos a menor escala, sobre todo si se trata de objetivos netamente educacionales.

A continuación, se muestra la mesa vibratoria unidireccional CUSHAKE construida en el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cukurova en Adana (Turquía). Construida con tecnología avanzada en electrónica y computación. (Lázaro, 2015).

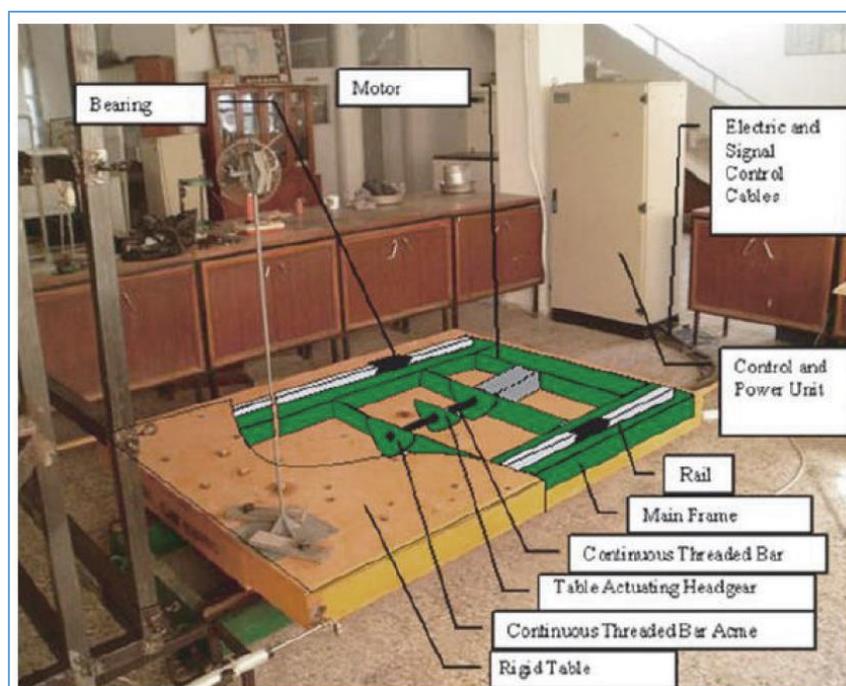


Figura 015: Mesa Vibratoria uniaxial CUSHAKE.

Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.915.1332&rep=rep1&type=pdf>

Teniendo las siguientes especificaciones técnicas:

SPECIFICATION	VALUE	UNIT
Table dimensions (B × L)	150 × 200	cm
Displacement	±7.5	cm
Velocity (bounded by software)	±40	cm/s
Maximum acceleration	1 g	(g = 9.81 m/s ²)
Table frequency	0–25	Hz
Maximum motor force	50	kN
Motor current	45	kW
Mass of the table	1500	kg
Max. payload (theoretical)	3500	kg

Figura 016: Especificaciones Técnicas de la mesa uniaxial CUSHAKE.

Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.915.1332&rep=rep1&type=pdf>

2.2.7 Arduino:

Los instrumentos que se utilizan para la medición experimental de una respuesta estructural frente a un movimiento sísmico en modelos reducidos están ligados a mesas vibratorias que utilizan el Hardware Libre Arduino, utilizando el mismo para su calibración (Lázaro, 2015).

La plataforma de Hardware libre Arduino es planteada en este proyecto para la medición de respuestas dinámicas en un modelo ensayado.

Arduino es una plataforma de hardware de código abierto, que se basa en una placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo que está basado en el lenguaje de programación Processing. Es un dispositivo que conecta el mundo físico con el mundo virtual, o el mundo analógico con el digital.

Las ventajas que ofrece la utilización del microcontrolador y plataforma Arduino son:

- Accesible, las placas Arduino son relativamente económicas en comparación con otras plataformas de microcontroladores y la versión más económica del módulo Arduino puede ser montado a mano.

- Multiplataforma, el software de Arduino (IDE) se ejecuta en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux, siendo de uso más popular en Windows.
- Programación clara, el software de Arduino (IDE) es de fácil uso para el área usuaria amateur, pero lo suficientemente flexible para usuarios de nivel avanzado.
- Por su bajo costo y facilidad de uso es un instrumento fácil de adecuarse en los laboratorios de una universidad.
- Existe bastante bibliografía en referente a su uso en Internet.

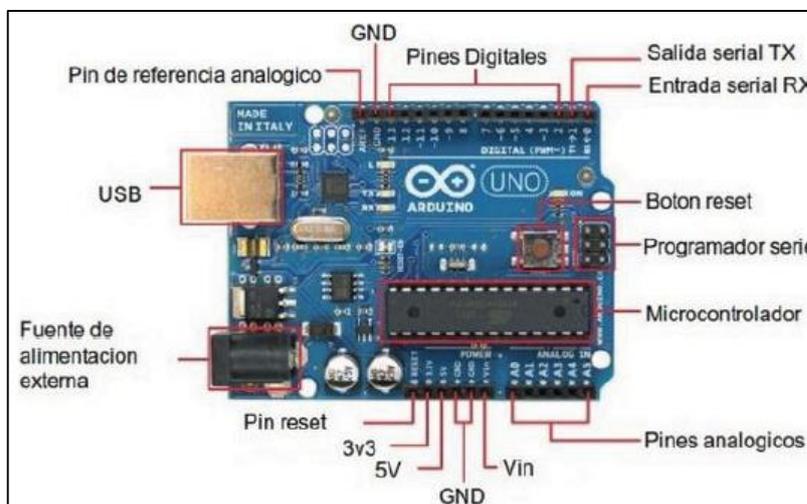


Figura 017: Plataforma Arduino Uno.
Recuperado de: <https://es.slideshare.net/adg89/seminario-de-arduino>

Como antecedente de uso con acelerómetros se tiene:

- Acelerómetros en la fabricación y producción de giroscopios.
- Acelerómetros en Inclínómetro digital de vehículos.

En la actualidad los Smartphones utilizan acelerómetros para que la pantalla cambie su orientación según el posicionamiento del móvil.

Aunque para medición de aceleraciones de estructuras en términos educaciones existen muy escasos antecedentes.

La razón por la que se mide la aceleración en lugar de la velocidad y el desplazamiento es porque la aceleración proporciona las fuerzas directamente, por lo que se pueden utilizar para establecer las fuerzas que experimenta una estructura durante un terremoto o sismo. Además, los sensores de aceleración son generalmente más robustos que los sensores sísmicos. Y, por lo general son pequeños de modo que son fáciles de colocar en lugares clave en una estructura. El registro de aceleración puede entonces ser procesada por computadora y se integra para obtener la velocidad y registros de desplazamiento (Lázaro, 2015).

2.2.8 Acelerómetro ADXL335:

Es un acelerómetro ADXL335 de 3 ejes, incluye condensadores de desacople para un óptimo funcionamiento. Está listo para su uso en cualquier tipo de proyecto con microcontroladores o para su uso en robótica.

Para cada eje devuelve una tensión proporcional a la aceleración, las cuales se pueden convertir a datos digitales con la ayuda de algún microcontrolador PIC, Atmel o Arduino y sus entradas analógicas. Se recomienda implementar algún filtro digital para tener lecturas más estables.

El voltaje de salida por eje se incrementa linealmente desde 0V (0G) hasta 3.3V (3G). Teniendo las siguientes especificaciones técnicas

- Voltaje de operación: 3.3V - 5V
- Consumo de corriente ultra bajo 350 μ A a 3V (nominal)
- Alta sensibilidad
- Rango Acelerómetro: 3g
- Grados de libertad: 3 ejes
- Regulador de voltaje integrado

Como se observa en la siguiente imagen, se tiene en el plano paralelo a la superficie del acelerómetro las direcciones de movimiento X & Y , por lo que es muy simple su reconocimiento y futura instalación en la superficie que se desee ensayar para capturar aceleraciones, en el eje perpendicular al plano de la superficie del sensor tenemos al eje Z .

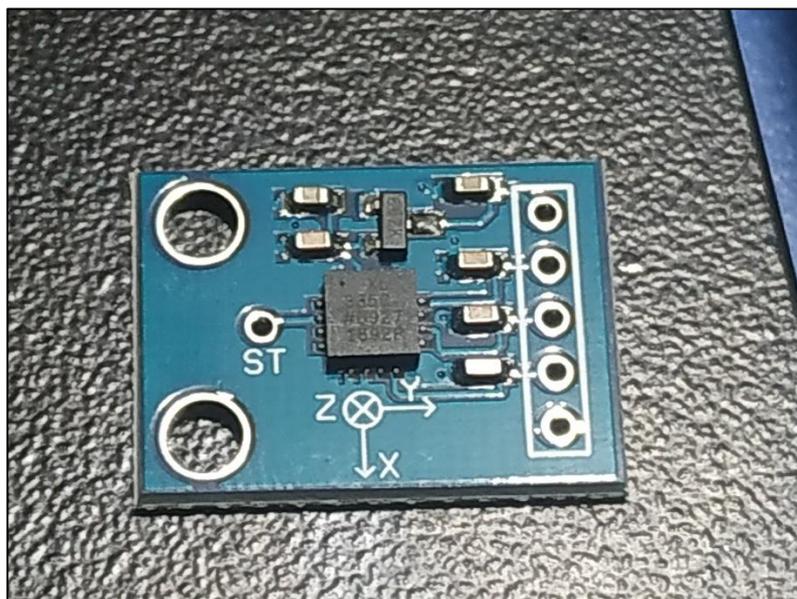


Figura 018: Sensor acelerómetro ADXL335.
Fuente: Propia

2.2.9 Señales:

Una señal es un conjunto de datos proporcionado por algún determinado tipo de sensor que es recolectado en grandes cantidades para ser representados de forma que se exprese a través de una línea temporal y a intervalos de ocurrencia, tal es el caso de las aceleraciones.

Donde el dato y objeto de estudio son las aceleraciones para los fines que requiere este proyecto de tesis, datos que se recolectan a intervalos de 0.02s de tiempo.

Como se puede observar en la siguiente imagen, mediante la colocación de sensores en cada nivel del modelo estructural experimental y posterior excitación sísmica es que se obtiene un gráfico con el conjunto de señales en un ordenador.

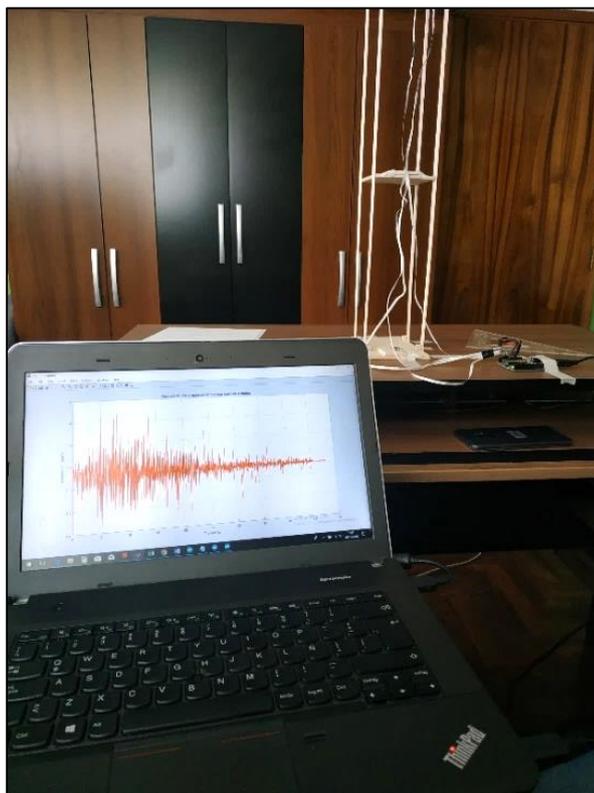


Figura 019: Señales obtenidas con el sensor ADXL335
Fuente: Propia

Estas señales que son un conjunto grande de datos expresados en un recuadro donde en el eje de las abscisas se tiene el parámetro del tiempo y en el eje de las ordenadas las aceleraciones, generan una función, la cual puede ser tratada según sea el caso.

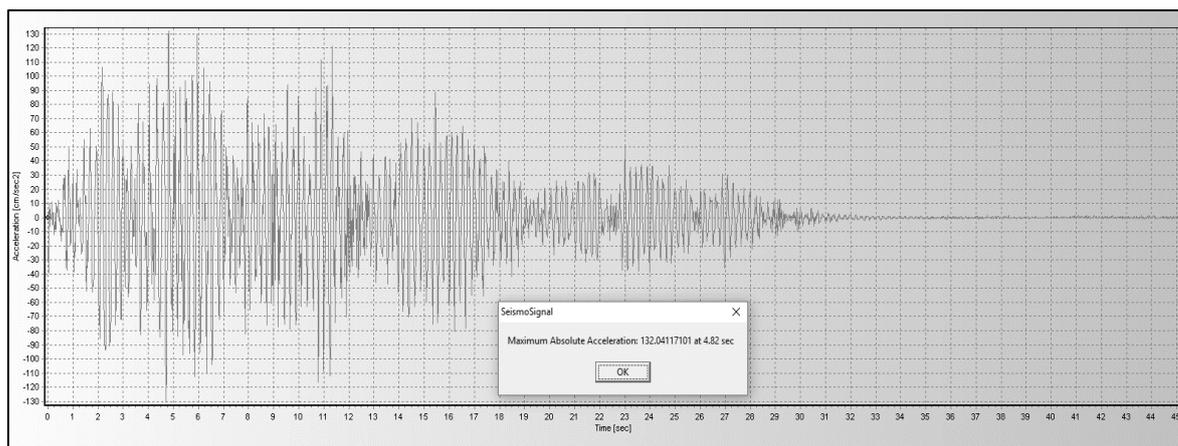


Figura 020: Señal obtenida con un sensor ADXL335.
Fuente: Propia

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 METODOLOGÍA:

3.1.1 Método Científico: Cuantitativo

3.1.2 Nivel de Investigación: Exploratoria

3.1.2 Tipo de Investigación: Experimental

3.1.3 Matriz de consistencia:

Tabla 04

Matriz de consistencia

PREGUNTA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL
¿Cuál será el comportamiento dinámico estructural emulado en un modelo teórico y uno experimental?	Replicar comportamiento dinámico estructural emulado en un modelo teórico y uno experimental.	El comportamiento dinámico estructural emulado en un modelo teórico y uno experimental es diferente.
Preguntas Específicas:	Objetivos Específicos:	Hipótesis Específicas:
1. ¿Cómo será el sistema mecánico con los elementos adecuados para la fabricación de una mesa vibratoria uniaxial?	1. Elaborar un sistema mecánico con los elementos adecuados para la fabricación de una mesa vibratoria uniaxial.	
2. ¿Cómo replicar los datos obtenidos de un acelerograma con una mesa vibratoria?	2. Replicar los datos obtenidos de un acelerograma con una mesa vibratoria.	
3. ¿Cómo registrar el comportamiento dinámico estructural emulado en los diferentes niveles de un modelo experimental utilizando acelerómetros ADXL335?	3. Registrar el comportamiento dinámico estructural emulado en los diferentes niveles de un modelo experimental utilizando acelerómetros ADXL335.	
4. ¿Cómo implementar acelerómetros ADXL335 en un modelo estructural experimental para la obtención de señales?	4. Implementar acelerómetros ADXL335 en un modelo estructural experimental para la obtención de señales.	
5. ¿Cómo emular el comportamiento dinámico estructural en un modelo experimental y uno teórico?	5. Emular el comportamiento dinámico estructural en un modelo experimental y uno teórico.	1. El comportamiento dinámico estructural en un modelo experimental y uno teórico serán diferentes.
6. ¿Estadísticamente un acelerograma de entrada a la mesa vibratoria será diferente a un acelerograma de salida?	6. Realizar un análisis estadístico para comparar si un acelerograma de entrada a la mesa vibratoria es diferente a un acelerograma de salida	2. Estadísticamente un acelerograma de entrada a la mesa vibratoria será diferente a un acelerograma de salida.

Fuente: Propia

3.2 MODELO TEÓRICO:

3.2.1 Propiedades Mecánicas del Modelo Estructural:

Se toma una estructura de madera balsa junto con sus propiedades mecánicas a una igual escala con el modelo experimental, se tiene que sus propiedades mecánicas son:

- Módulo de Young: $26800 \frac{kg}{cm^2}$
- Módulo de Compresión: $4670 \frac{kg}{cm^2}$
- Módulo de Tracción: $12970 \frac{kg}{cm^2}$
- Un Radio de Poisson (U): $U = \frac{\text{módulo de compresión}}{\text{módulo de tracción}} = \frac{4670kg/cm^2}{12970kg/cm^2} = 0.36$
- Módulo de Dilatación Térmica: $3.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Datos provenientes de:

Tabla 05

Propiedades Físicas de la Madera Balsa

Densidad	150kg/cm ³ (Madera ligera)
Dureza	0.2 (Madera muy blanda)
Tendencias a curvarse	Pequeña (Madera Persistente)
Módulo de Elasticidad	26800kg/cm ²

Recuperado de: <http://normadera.tknika.net/es/content/ficha/balsa>

Tabla 06

Módulos de Elasticidad de la Madera Balsa

Compresión	4670 kg/cm ²
Tracción	12970 kg/cm ²

Recuperado de: <http://www.amaglider.com/?p=view&a=balsa-wood-properties>

Se denomina en forma genérica “propiedades de la madera” al comportamiento de este material frente a ciertas solicitaciones del medio que pueden originar efectos no deseados en su uso estructural, no sólo para la construcción de modelos estructurales reducidos, sino también estructuras a escala real.

Este comportamiento no deseado de la madera, propio del material, se puede reducir o aun eliminar mediante tecnologías de transformación, pero es inherente a su constitución.

Las propiedades de los materiales son las respuestas que un material da a una demanda o estímulo del medio, y no algo intrínseco del mismo. Hay tantas propiedades como sollicitaciones del medio consideremos.

Entre el mayor fenómeno en su composición tenemos la Anisotropía, la madera es la materia anisotrópica por excelencia, es decir, que sus propiedades varían según la dirección en que son examinadas.

Su comportamiento, como en el caso del acero, es bueno ante situaciones que originen compresión, tracción, flexión o corte. Es un material cuya performance estructural compite en cierta medida con el acero, y deja muy atrás los valores del hormigón.

Esta capacidad de soportar estados de tensión variados de la madera se modifica sensiblemente con diversos factores. La función básica de un material destinado a la construcción de edificios es su aptitud estructural.

El factor determinante dentro de la Anisotropía es la dirección de la beta de la madera, al ser el aeromodelismo uno de los principales usos que tiene la madera balsa, los proveedores son cuidadosos en los ensayos de compresión, tracción y elasticidad a fin de satisfacer la necesidad del consumidor.

Se puede garantizar sus propiedades haciendo ensayos de compresión y tracción como en las siguientes figuras:

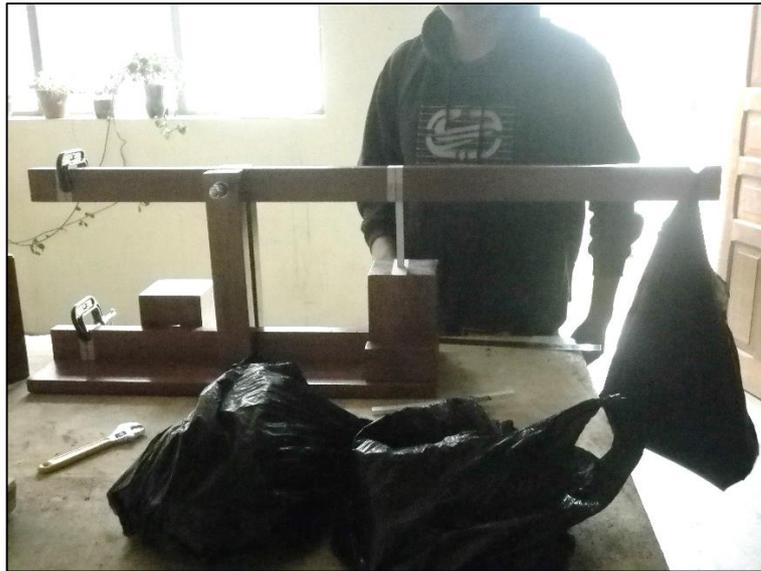


Figura 021: Ensayo de compresión.

Fuente: Propia (Curso de Estática, Universidad Nacional del Altiplano – Ingeniería Civil, 2011)



Figura 022: Ensayo de tracción.

Fuente: Propia (Curso de Estática, Universidad Nacional del Altiplano – Ingeniería Civil, 2011)

Utilizando una prensa de madera que pueda comprimir las piezas para obtener una respuesta frente a la compresión o someterlas a un comportamiento traccionante.

3.2.2 Obtención de Resultados del Modelo Teórico:

El software utilizado para el modelamiento de la estructura teórica y obtención de resultados es SAP2000 Advanced 14.0.0 el cual permitió ingresar un acelerar el análisis sísmico de la estructura teórica por la modalidad Tiempo-Historia.

El análisis y recolección de datos para el Modelo Teórico se dio siguiendo siguiente diagrama de flujo:

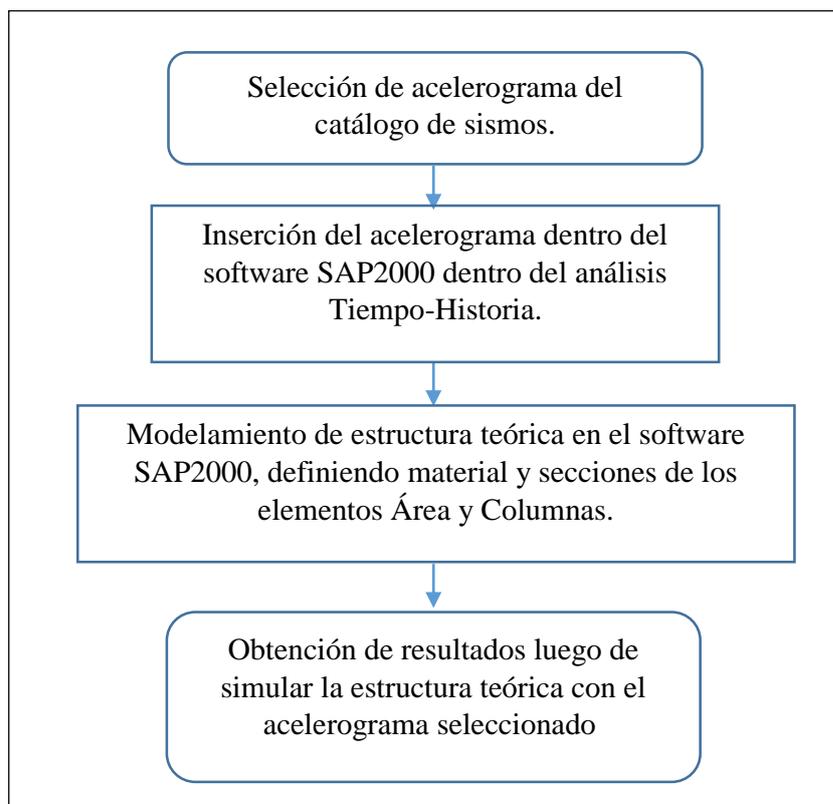


Figura 023: Diagrama de flujo para el modelo teórico.
Fuente: Propia

Y utilizando el siguiente software de modelamiento estructural:

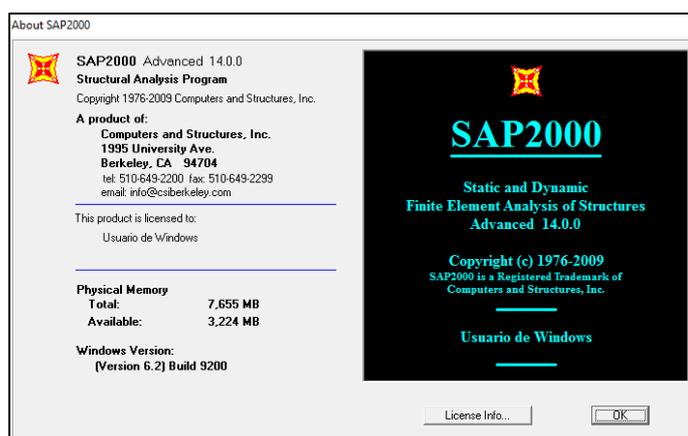


Figura 024: Información del Software utilizado en el modelamiento teórico.
Fuente: Propia

Como configuración inicial del modelo estructural se utilizó las siguientes unidades: Newton (N) como unidad de fuerza, el centímetro (cm) como unidades de longitud y el grado centígrado ($^{\circ}\text{C}$) como unidad de temperatura.

Se especifica el número de niveles que posee la estructura teórica, siendo estos 3 niveles, y la longitud entre pisos 28.7cm , en 3D Frame Type se utilizó: Flat Plate Building, ya que no se trabajó con vigas sino únicamente con losas (area-objetcs), y las dimensiones de la losa son de $10\text{cm} \times 10\text{cm}$. Las dimensiones de las columnas y losas se definirán más adelante.

Se utilizó para iniciar con el modelamiento la opción 3D Frames.

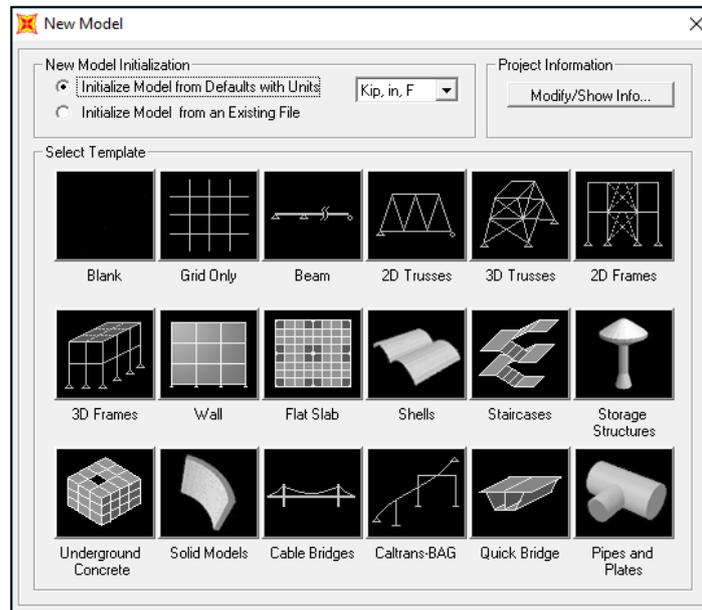


Figura 025: Elección del modelo base.

Fuente: Propia

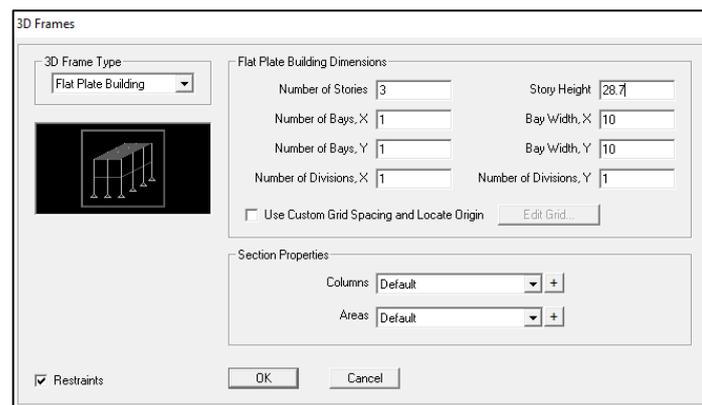


Figura 026: Dimensionamiento de la Estructura Teórica.

Fuente: Propia

Definición de las propiedades mecánicas de los materiales a utilizar en el modelo teórico:

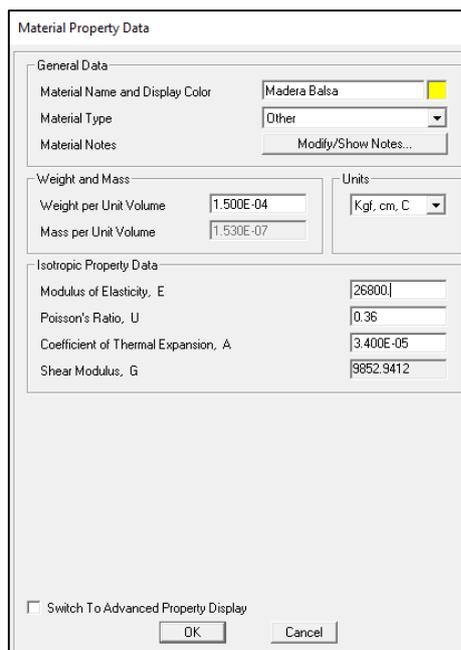


Figura 027: Definición de las propiedades del materia.
Fuente: Propia

En la siguiente etapa se define la sección de los elementos estructurales utilizados en el presente modelamiento teórico, los cuales son columnas y losas.

A continuación, se diseña las columnas en Section Properties y Frame Sections:

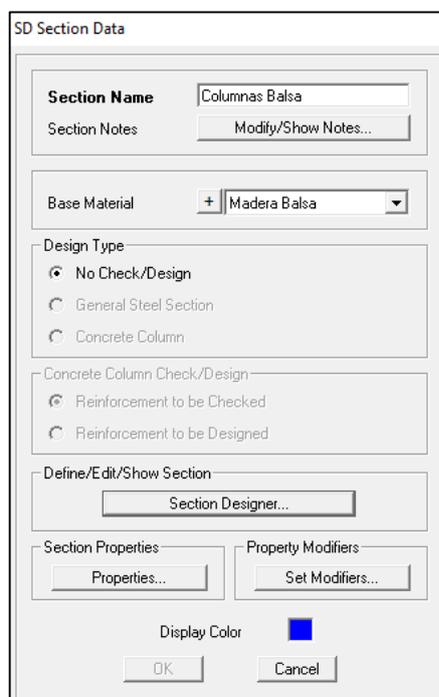


Figura 028: Propiedades de sección de las columnas.
Fuente: Propia

Se diseña la sección dentro de Section Designer, indicando que será de sección rectangular e indicando que será de secciones $0.2\text{cm} \times 1.2\text{cm}$.

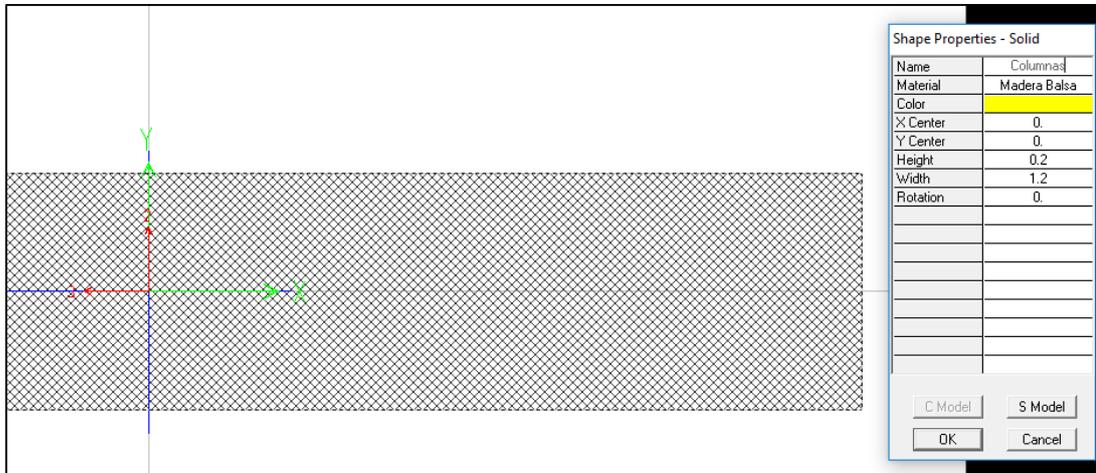


Figura 029: Diseño de sección rectangular para columnas.
Fuente: Propia

Y por último se diseña las losas, dentro de Section Properties y Area Sections, teniendo en cuenta que tiene un espesor de 0.5cm y actúa como una Capa-Delgada (Shell-Thin).

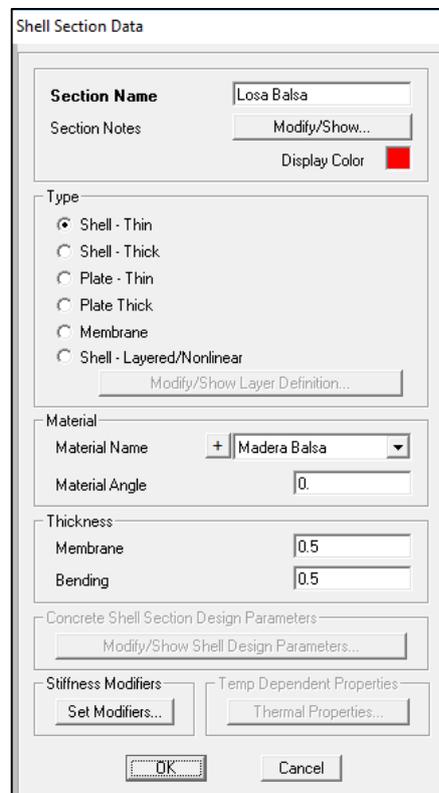


Figura 030: Diseño de sección de Losas (Áera).
Fuente: Propia

Definimos la restricción en articulaciones de la siguiente manera:

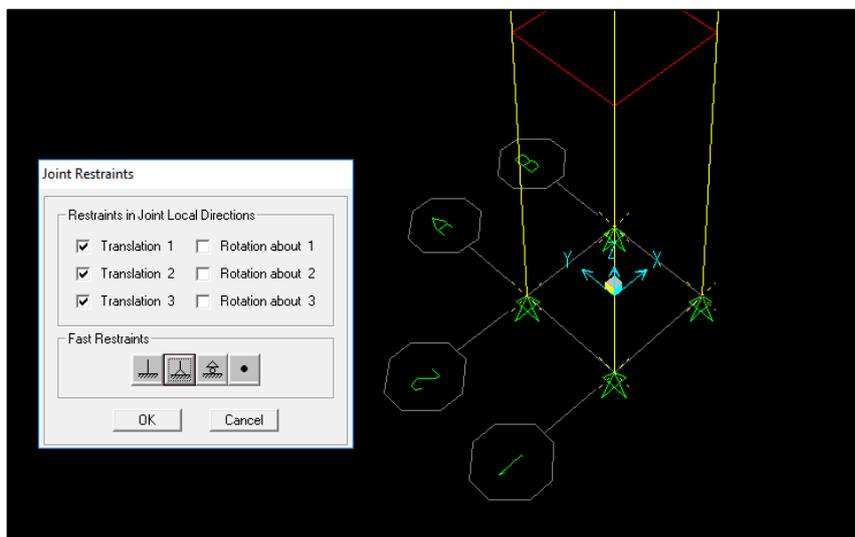


Figura 031: Restricción en las 4 juntas de la base.

Fuente: Propia

En Functions entramos Response Spectrum y procedemos a borrar el espectro existente.

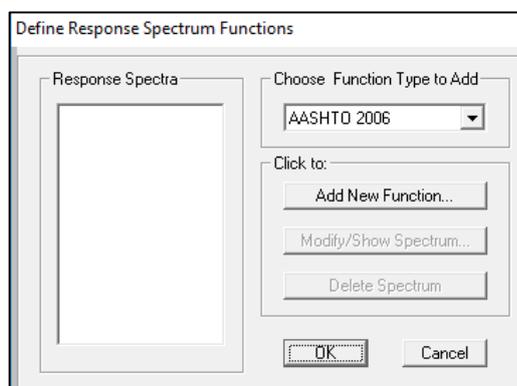


Figura 032: Se elimina todo espectro.

Fuente: Propia

Dejamos el análisis Modal únicamente, ya que ahí se toma en consideración las masas y rigidez de la estructura.

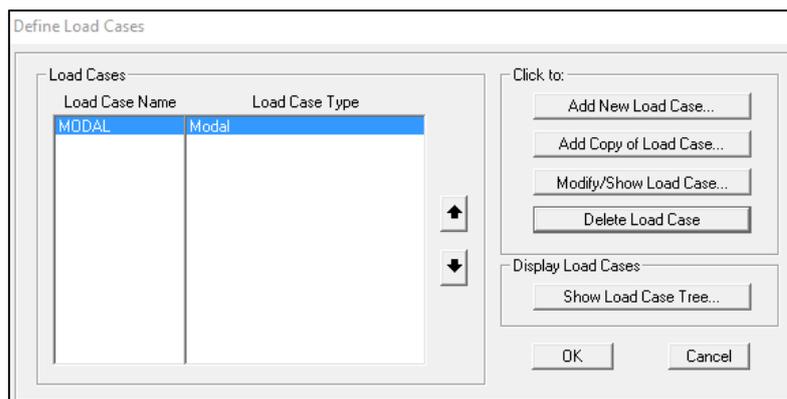


Figura 033: Se elimina los demás Load Cases.
Fuente: Propia

Igualmente, en combinaciones deberá quedar de la siguiente forma, debido a que se trata de un sismo real ocurrido en nuestro país.

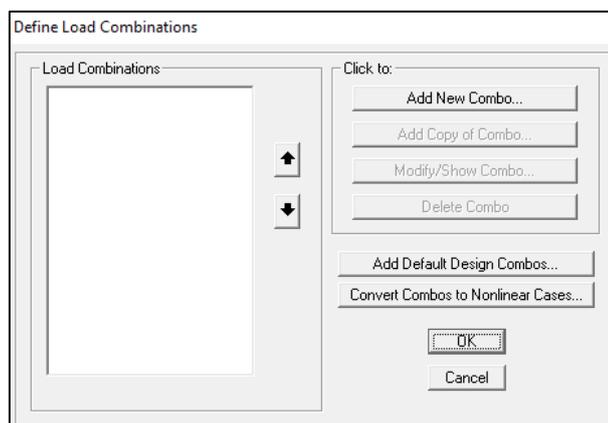


Figura 034: Combinación de cargas.
Fuente: Propia

Procedemos a definir la función Tiempo Historia, utilizando la opción From File, desde Define Time History Functions el momento donde pide elegir el tipo de función a añadir (Choose Function Type to Add).

Para lo cual se utilizó el siguiente archivo con los registros de aceleraciones de un sismo ocurrido el 31 de mayo de 1970, siendo este un archivo .txt o .dat que cuenta únicamente con las aceleraciones en una única columna, para posteriormente definir el lapso de tiempo de ocurrencia entre los mismos.

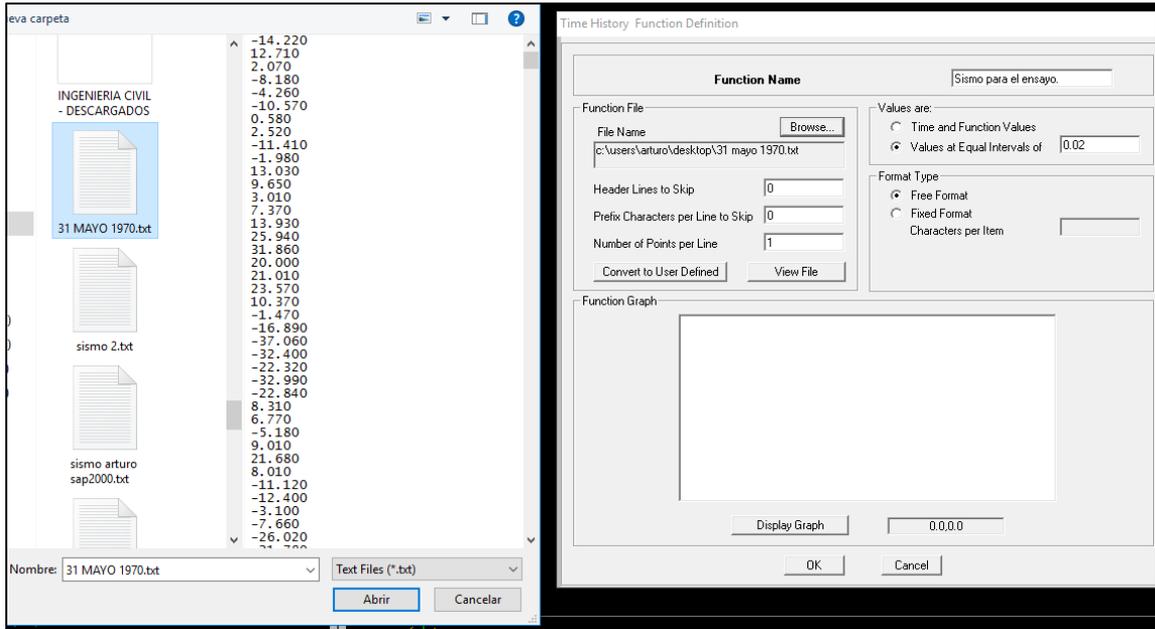


Figura 035: Inserción del acelerograma en la función Tiempo – Historia.

Fuente: Propia

Para finalmente obtener el siguiente panorama luego de haber insertado el acelerograma en formato .txt para su visualización y posterior uso. Los demás casos son eliminados al pasar a la ventana Define History Functions.

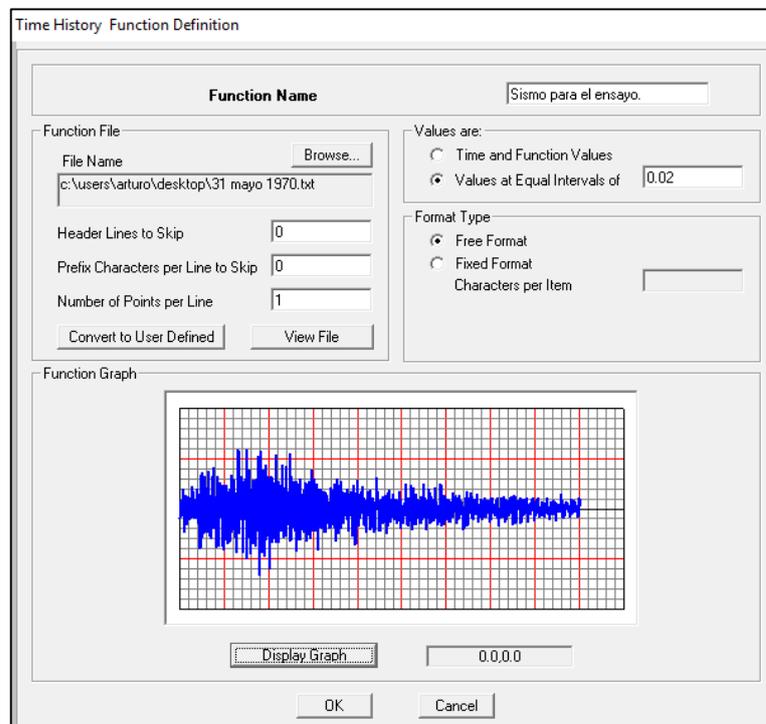
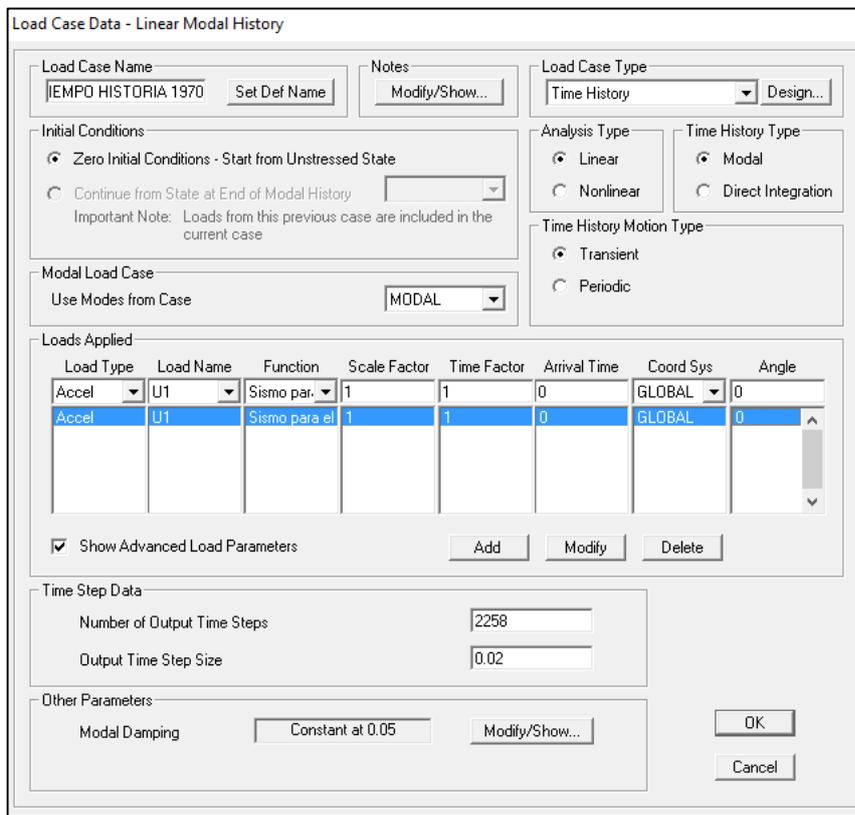


Figura 036: Visualización del acelerograma en la función Tiempo – Historia.

Fuente: Propia

Posteriormente en casos de análisis definiremos el nuevo estado de carga dentro de Define Load Cases, agregando el estado de carga con la opción Add New Load Case.

En Load Case Type escogemos Time History, esto debido a que se utilizó un sismo real, en Tipo de Carga (Load Type) elegimos Accel, luego el sentido del sismo (U1) y el Factor Scale que viene a ser 1, debido a que las aceleraciones se presentan en cm/s^2 , para posteriormente dar en Add para aplicar esta carga aplicada (Loads Applied). En Number of Output Time Steps escribimos 2258 que es el número de lecturas y en Output Time Step Size escribimos 0.02 que viene a ser el tiempo cada cual se ha tomado cada aceleración.



Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Accel	U1	Sismo par.	1	1	0	GLOBAL	0
Accel	U1	Sismo para el	1	1	0	GLOBAL	0

Figura 037: Cargas utilizadas en Tiempo – Historia.
Fuente: Propia

Al volver a la ventana Define Load Cases únicamente se considera en Load Case Name lo ya definido que viene a ser MODAL (que considera las masas y rigidez de la estructura), y TIEMPO HISTORIA 1970 (el sismo ingresado mediante la función Tiempo-Historia).

El análisis de aceleraciones y desplazamientos se hará en las Juntas 5, 9 y 13.

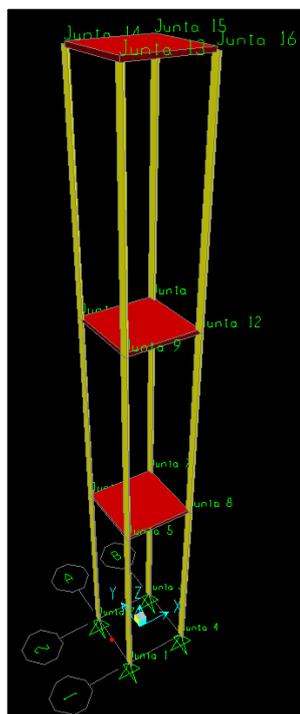


Figura 038: Modelo estructural para el análisis teórico.
Fuente: Propia

Se tiene la estructura de esta forma, luego de haber sido aplicado el acelerograma (perteneciente a un sismo existente) con la función Tiempo-Historia.

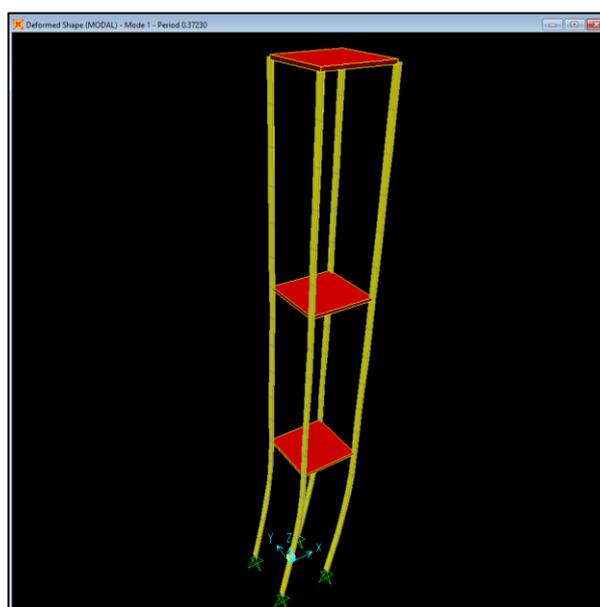


Figura 039: Modelo estructural teórico luego del ensayo.
Fuente: Propia

3.3 MODELO EXPERIMENTAL:

El análisis y recolección de datos para el Modelo Experimental se dio siguiendo siguiente diagrama de flujo.

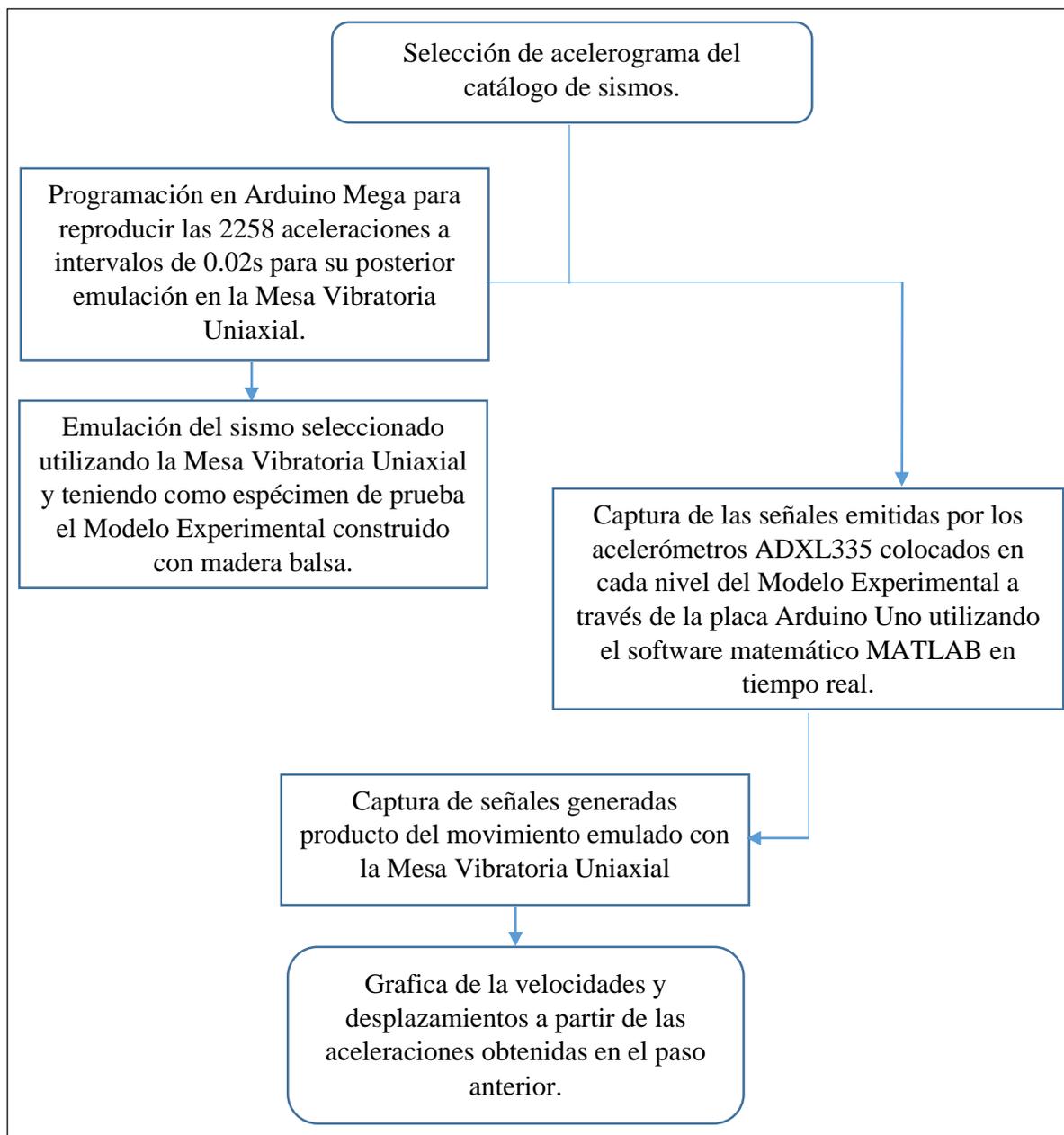


Figura 040: Diagrama de flujo para el modelo experimental.
Fuente: Propia

3.3.1 Propiedades Mecánicas del Modelo Estructural:

Las propiedades mecánicas de la madera balsa asumidas tanto para el modelo experimental como en el modelo teórico se garantizan según el proveedor de compra.

El modelo experimental tuvo igual tamaño en sus dimensiones con respecto al modelo teórico, teniendo las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 07

Propiedades Físicas de la Madera Balsa

Densidad	150kg/cm ³ (Madera ligera)
Dureza	0.2 (Madera muy blanda)
Tendencias a curvarse	Pequeña (Madera Persistente)
Módulo de Elasticidad	26800kg/cm ²

Recuperado de: <http://normadera.tknika.net/es/content/ficha/balsa>

Tabla 08

Propiedades Físicas de la Madera Balsa

Compresión	4670 kg/cm ²
Tracción	12970 kg/cm ²

Recuperado de: <http://www.amaglider.com/?p=view&a=balsa-wood-properties>

<p>NOMBRE</p> <p>Ochroma lagopus Familia: Malvaceae (Bombacoideae) Frondosa</p> <p>ORIGEN</p>  <p>APARIENCIA</p>  <p>CARACTERÍSTICAS</p> <p>Caract. Albura: entre blanco-crema y rosa parduzco Caract. Duramen: entre blanco-crema y rosa muy pardo Caract. Fibra: recta Caract. Grano: grueso</p> <p>SINGULARIDADES</p> <p>Deformaciones y cementaciones</p>	<p>PROPIEDADES FÍSICAS</p> <p>Densidad: 150 kg/m³. Madera ligera Dureza: 0,2. Madera muy blanda Tendencia a curvarse: pequeña. Madera persistente</p> <p>PROPIEDADES TECNOLÓGICAS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proceso</th> <th>Mala</th> <th>Buena</th> <th>Muy buena</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> Serrado</td> <td colspan="3">[Red bar]</td> </tr> <tr> <td> Clavado</td> <td colspan="3">[Red bar]</td> </tr> <tr> <td> Atornillado</td> <td colspan="3">[Red bar]</td> </tr> <tr> <td> Encolado</td> <td colspan="3">[Red bar]</td> </tr> <tr> <td> Acabado</td> <td colspan="3">[Red bar]</td> </tr> </tbody> </table> <p>PROPIEDADES MECÁNICAS EN MADERA LIBRE DE DEFECTOS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Esfuerzos</th> <th></th> <th>kg/cm²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> Resistencia a la flexión</td> <td></td> <td>190</td> </tr> <tr> <td> Resistencia a la compresión</td> <td></td> <td>100</td> </tr> <tr> <td> Resistencia a la tracción</td> <td></td> <td>26</td> </tr> <tr> <td> Módulo de elasticidad</td> <td></td> <td>26800</td> </tr> </tbody> </table>	Proceso	Mala	Buena	Muy buena	Serrado	[Red bar]			Clavado	[Red bar]			Atornillado	[Red bar]			Encolado	[Red bar]			Acabado	[Red bar]			Esfuerzos		kg/cm ²	Resistencia a la flexión		190	Resistencia a la compresión		100	Resistencia a la tracción		26	Módulo de elasticidad		26800
Proceso	Mala	Buena	Muy buena																																					
Serrado	[Red bar]																																							
Clavado	[Red bar]																																							
Atornillado	[Red bar]																																							
Encolado	[Red bar]																																							
Acabado	[Red bar]																																							
Esfuerzos		kg/cm ²																																						
Resistencia a la flexión		190																																						
Resistencia a la compresión		100																																						
Resistencia a la tracción		26																																						
Módulo de elasticidad		26800																																						

Figura 041: Propiedades mecánicas del Modelo Experimental.
Recuperado de: <http://normadera.tknika.net/es/content/ficha/balsa>

3.3.2 Dimensiones del Modelo Estructural:

El modelo experimental tuvo una relación de igual tamaño frente al modelo teórico, para lo cual también se utilizó madera balsa con las siguientes dimensiones: losas de $10 \times 10 \text{ cm}$ y 0.5 cm de espesor, columnas de $1.2 \times 0.2 \text{ cm}$ de sección y 28.7 cm de altura entre pisos.

3.4 SISTEMA MECÁNICO DE LA MESA VIBRATORIA:

A continuación, se detallará el procedimiento cómo se elaboró el sistema mecánico.

3.4.1 Unión Entre el Husillo y Motores:

Torneado de los acoples destinados a ser el nexo de unión entre el eje de los motores de corriente continua y el actuador mecánico responsable del desplazamiento de la plataforma.

El principal obstáculo para lograr el acoplamiento del actuador mecánico encargado de transmitir el movimiento a la plataforma de la mesa vibratoria fue fabricar acoples concéntricos que enlacen el eje de los motores con el actuador mecánico (T8 300mm).

La excentricidad del diámetro mayor y el menor de 10mm y 8mm correspondientemente generaría vibraciones en el actuador y pandeo.



*Figura 042: Torno utilizado en la fabricación de los acoples.
Fuente: Propia*



*Figura 043: Últimos pasos en la fabricación de los acoples.
Fuente: Propia*



*Figura 044: Acoples ya terminados.
Fuente: Propia*

Los acoples tienen dos diámetros concéntricos, el mayor y donde va inserto el eje del motor tiene un diámetro de 10mm en tanto el diámetro menor y donde va inserto el actuador mecánico tiene un diámetro de 8mm.

Los acoples fabricados manualmente tendrán un buen desempeño siempre que sean concéntricos en sus dos diámetros internos, tanto el diámetro menor donde va sujeto el husillo como el diámetro mayor se sujeta el eje del motor.

Se recomienda encarecidamente que si se desea replicar el mecanismo de esta mesa vibratoria se utilice acoples prefabricados flexibles, acorde a los diámetros del eje del motor y el husillo, en este proyecto a fin de evitar vibraciones producto de la excentricidad de los acoples fabricados artesanalmente se utilizó finalmente dichas piezas.



Figura 045: Acoples Flexibles prefabricados
Fuente: Propia

3.4.2 Unión Concéntrica de los Ejes de Motor con el Husillo:

Se fabricó inicialmente los marcos donde estarían ensamblados los motores, estos marcos debían ser idénticos para así coincidir cara a cara al momento de montar los motores al actuador mecánico responsable del movimiento sísmico.



Figura 046: Marcos inicialmente construidos en melamina.
Fuente: Propia

Estos marcos de melamina al no tener la rigidez suficiente presentaron problemas rajándose al someterlos a ensayo producto de las vibraciones y al ser de fabricación artesanal no obtuvieron la precisión necesaria generando pandeos en el actuador mecánico y por lo tanto datos faltos de precisión al realizar las lecturas con los acelerómetros.

Posteriormente se realizó la fabricación de estos marcos en acero, soldando ambas placas para que ambos sean iguales y tanto concéntricamente en el lugar donde irían acoplados los motores como también los tornillos de sujeción de los mismos.

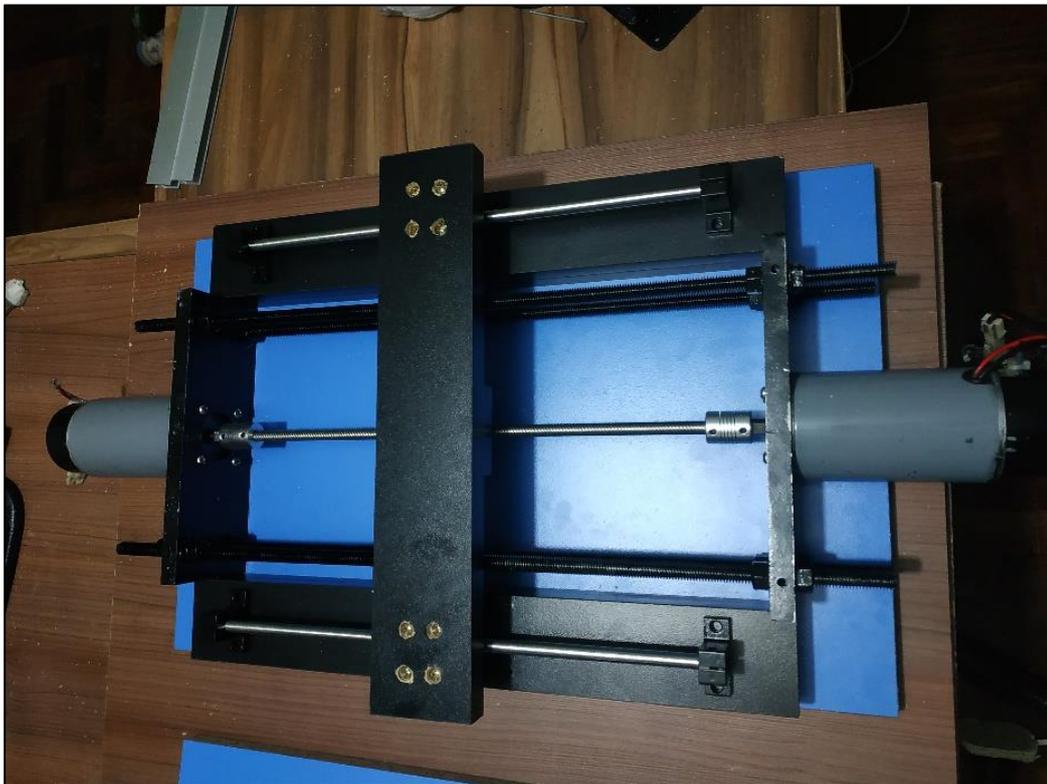
Para evitar excentricidad entre los diámetros contenidos en los marcos de acero se soldó en 2 puntos laterales las placas para realizar la perforación sin temor a que ambas piezas no fueran idénticas en su culminación.



*Figura 047: Marcos de acero listos para ensamblar la mesa vibratoria.
Fuente: Propia*

3.4.3 Fijación de las Placas Metálicas a Motores:

Estas placas se fijaron de manera que sean concéntricos los ejes de los motores estando estos fijos a las placas y el eje del husillo utilizado para generar el movimiento de la plataforma de la mesa vibratoria.



*Figura 048: Marcos de acero concéntricos con los ejes del motor y del husillo.
Fuente: Propia*

3.4.4 Transferencia de Movimiento del Husillo a la Plataforma:

Para la transferencia del movimiento del husillo se construyó una platina que iba atornillada a la Camisa con el NUT anti backlash en la tuerca T8 de 300mm para que transfiera el movimiento a la plataforma.



Figura 049: Perforación de la camisa con el NUT para ser acoplado a la plataforma.
Fuente: Propia

Más adelante se reemplazó la platina por una pieza cuadrangular que va sujeta a la plataforma de la mesa vibratoria. Esta al no ser de fabricación artesanal posee una mayor precisión al transferir el movimiento del NUT sujeto al anti backlash a la plataforma de la mesa vibratoria.

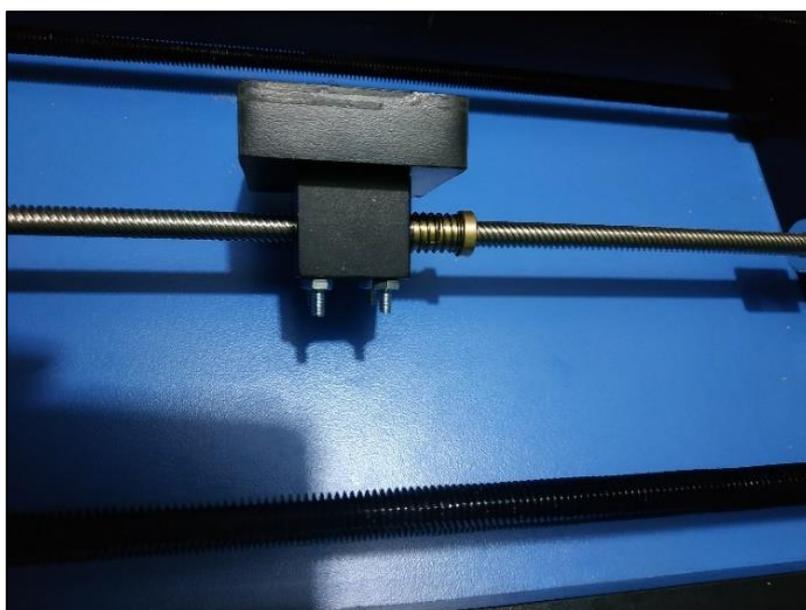


Figura 050: Camisa atornillada al NUT anti backlash roscado con el T8 de 300mm.
Fuente: Propia

El anti backlash evita el retroceso de las piezas provocando su posterior separación.



*Figura 051: NUT Anti backlash.
Fuente: Propia*

Se procedió a ensamblar los motores con los acoples fijos al actuador mecánico junto a la camisa con el NUT a los marcos de acero y los rieles encargados junto a la platina de transferir el movimiento a la plataforma de la mesa vibratoria.



*Figura 052: Ensamblado de los marcos de acero al motor.
Fuente: Propia*

Para transferir el movimiento se utilizó extensiones de cojinete DYNASLIDE, así como el correcto deslizamiento de la plataforma encima de los marcos de acero se utilizó

Extensiones completas de cojinete de 28" (71.12cm) y 100lb (45.36kg) de capacidad de soporte.



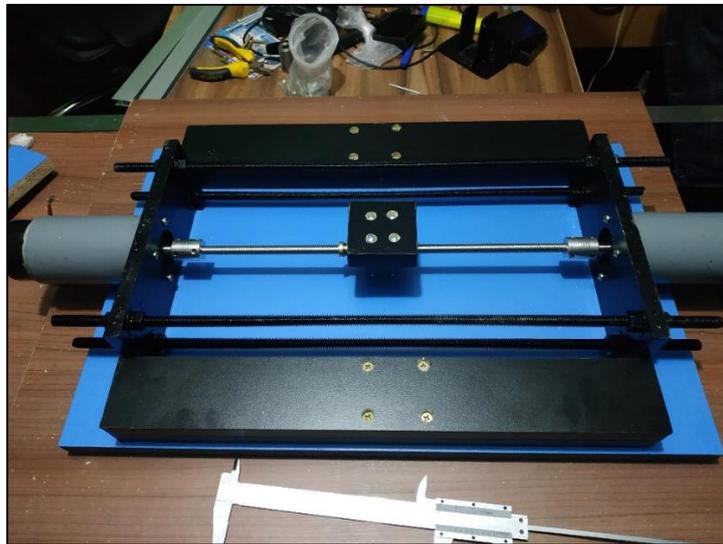
*Figura 053: Extensiones de cojinete DYNASLIDE.
Fuente: Propia*

Ensamblado del actuador con a los acoples junto a la platina que contiene el NUT atornillado a la camisa responsable de transferir el movimiento de los motores a la plataforma, con las Extensiones y los marcos de acero encargados de fijar la posición de los motores. Para finalmente sujetar los motores al marco y transmitir mediante impulsos eléctricos el movimiento proveniente del ordenador a la placa Arduino responsable de la rotación de los ejes del motor.



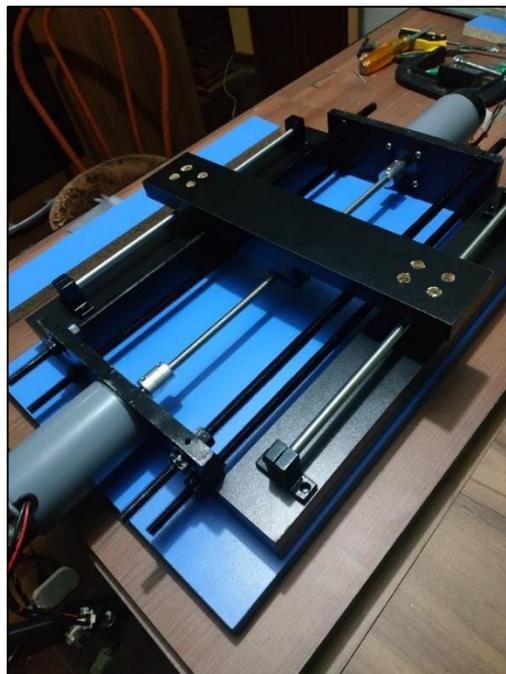
*Figura 054: Ensamblado de las piezas.
Fuente: Propia*

Para nivelar las extensiones DYNASLIDE se niveló su elevación con piezas construidas con melanina y posicionadas lateralmente a los marcos de acero que sostienen los motores.



*Figura 055: Nivelación de extensiones DYNASLIDE.
Fuente: Propia*

Para finalmente terminar la estructura interna de la mesa vibratoria, lista para acoplar encima la plataforma de sostenimiento de estructuras de ensayo.



*Figura 056: Estructura interna de la Mesa vibratoria uniaxial.
Fuente: Propia*



Figura 057: Fuente de Alimentación junto a la caja de controles.
Fuente: Propia

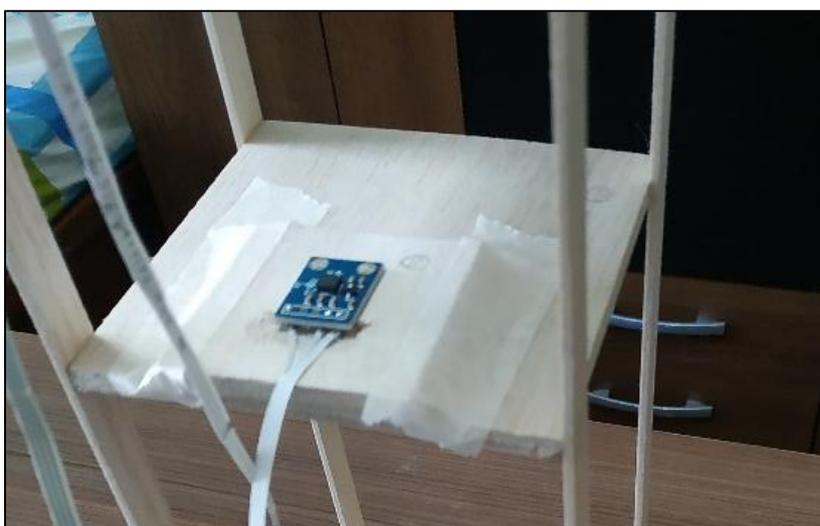


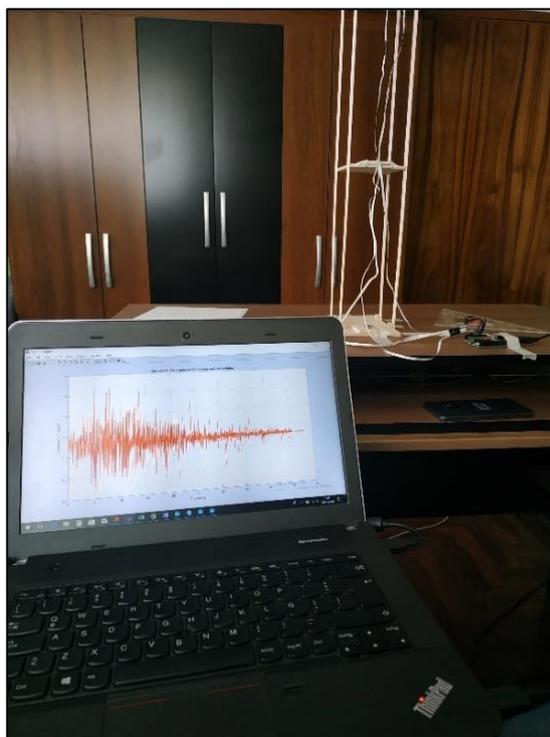
Figura 058: Acelerómetro fijo en el Modelo Experimental.
Fuente: Propia

Los acelerómetros tienen los ejes X, Y & Z para la captación de aceleraciones, por lo tanto, el eje X en los acelerómetros ADXL335 deben tener la misma dirección que el movimiento de la mesa vibratoria uniaxial.



*Figura 059: Acelerómetro ADXL335 posicionados en dirección del movimiento.
Fuente: Propia*

Las primeras capturas con los acelerogramas se dieron de la siguiente forma, nótese que la estructura está en estado de quietud debido a que el proceso de emulación estaba concluido al momento de generar los datos que se pueden visualizar en el ordenador.



*Figura 060: Primera captación de datos con los sensores ADXL335.
Fuente: Propia*

3.5 RÉPLICA DE SEÑALES CON UNA MESA VIBRATORIA:

Utilización de Arduino Mega para la Réplica de Datos de Un Acelerograma:

Se utilizó ARDUINO MEGA para la réplica de movimiento sísmico mediante la rotación de los ejes de dos motores de corriente continua ubicados concéntricamente para que mediante impulsos eléctricos estos giren y logren la rotación angular de un husillo que proporciona 300mm de desplazamiento.

De la siguiente expresión extraída de la programación utilizada en ARDUINO MEGA se ve que para la rotación anti horaria el primer impulso provee de una aceleración de $2m/s^2$ en tanto que la siguiente rotación de $8m/s^2$ se da seguidamente a esta luego de 20milisegundos, la expresión “delay” de este fragmento de la programación indica un retraso de un pulso a otro, y viene a ser que un “delay” de valor 1000 es equivalente a 1s.

```
analogWrite(RPWM,2); analogWrite(LPWM,0); delay(20);  
analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,8); delay(20);
```

Se utilizó la siguiente programación para la obtención de comportamiento dinámico ocurrido gracias a ARDUINO MEGA que controla mediante un computador el giro de ambos motores de corriente continua:

```
// Estructura sismo 31 mayo 1970 código 7038 – Tesis Arturo 2018
```

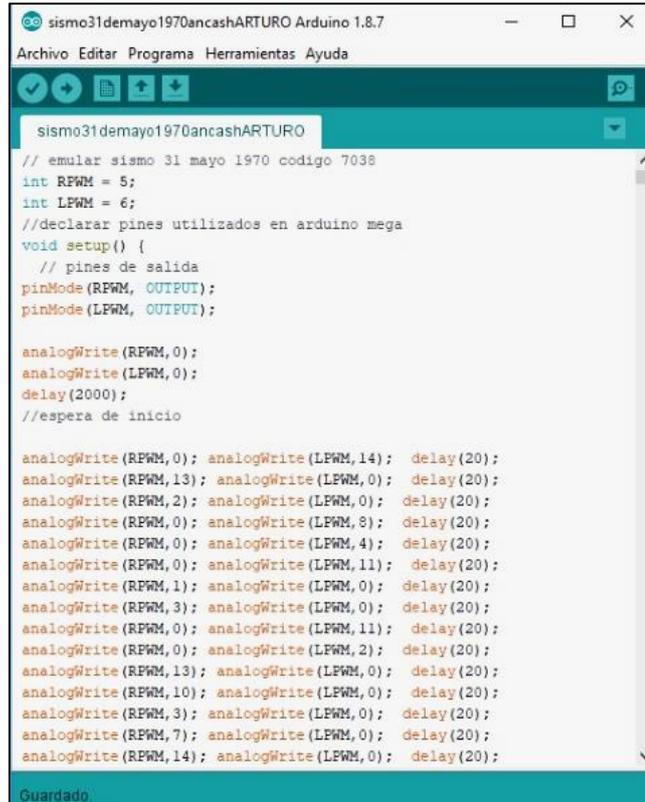
```
int RPWM = 5;
int LPWM = 6;
// Declarar pines utilizados en arduino mega
void setup() {
  // pines de salida
  pinMode(RPWM, OUTPUT);
  pinMode(LPWM, OUTPUT);

  analogWrite(RPWM,0);
  analogWrite(LPWM,0);
  delay(2000);
  // Espera de inicio
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,14); delay(20);
  analogWrite(RPWM,13); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,2); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,8); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,4); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,11); delay(20);
  analogWrite(RPWM,1); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,3); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,11); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,2); delay(20);
  analogWrite(RPWM,13); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,10); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,3); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,7); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,14); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,26); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,32); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,20); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,21); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,24); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,10); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,1); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,17); delay(20);
```

2234 líneas de programación restantes

```
analogWrite(RPWM,6); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
//fin del movimiento
analogWrite(RPWM,0);
analogWrite(LPWM,0);
delay(2000);
}
void loop() {
  // esta fue la secuencia repetitiva
}
```

Las primeras 12 líneas de código y las últimas 8 utilizaron como referencia la programación realizada por Aruhuanca (2016) en su Tesis para optar el título de Ingeniero Civil “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO EN ESTRUCTURAS A ESCALA REDUCIDA EMPLEANDO MESA VIBRATORIA DISEÑADA Y FABRICADA EN LA UNA PUNO” (p.121).



```

sismo31demayo1970ancashARTURO Arduino 1.8.7
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

sismo31demayo1970ancashARTURO

// emular sismo 31 mayo 1970 codigo 7038
int RFWM = 5;
int LPWM = 6;
//declarar pines utilizados en arduino mega
void setup() {
  // pines de salida
  pinMode(RFWM, OUTPUT);
  pinMode(LPWM, OUTPUT);

  analogWrite(RFWM, 0);
  analogWrite(LPWM, 0);
  delay(2000);
  //espera de inicio

  analogWrite(RFWM, 0); analogWrite(LPWM, 14); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 13); analogWrite(LPWM, 0); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 2); analogWrite(LPWM, 0); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 0); analogWrite(LPWM, 8); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 0); analogWrite(LPWM, 4); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 0); analogWrite(LPWM, 11); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 1); analogWrite(LPWM, 0); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 3); analogWrite(LPWM, 0); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 0); analogWrite(LPWM, 11); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 0); analogWrite(LPWM, 2); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 13); analogWrite(LPWM, 0); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 10); analogWrite(LPWM, 0); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 3); analogWrite(LPWM, 0); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 7); analogWrite(LPWM, 0); delay(20);
  analogWrite(RFWM, 14); analogWrite(LPWM, 0); delay(20);
  
```

Figura 061: Programación en Arduino Mega responsable del movimiento dinámico.
Fuente. Propia

3.6 REGISTRO DE SEÑALES UTILIZANDO SENSORES ADXL335:

Se registró las señales en los diferentes niveles de un modelo experimental utilizando sensores adxl335, estas señales son aceleraciones que en conjunto forman un acelerograma, el cual se utiliza para determinar velocidades y desplazamientos. Se utilizó el soporte Arduino en Matlab para el Registro de Señales.

En este apartado se utiliza el siguiente código de aplicación en el software matemático MATLAB para la adquisición de datos emitidos por los sensores ADXL335.

```

% Recepción de señales con Arduino
% Sensores ADXL335 - TESIS 2018 - ARTURO
%% Apertura del serie (COM)
% borrar previos
delete(instrfind({'Port'},{'COM3'}));
% crear objeto serie
s = serial('COM3','BaudRate',9600,'Terminator','CR/LF');
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
% abrir puerto
fopen(s);
%% Preparar medida
% Parámetros de medidas
tmax = 50; % tiempo de captura en s
rate = 33; % resultado experimental (comprobar)
% preparar la figura
f = figure('Name','Captura');
a = axes('XLim',[0 tmax],'YLim',[0.5 2.5]);
l1 = line(nan,nan,'Color','r','LineWidth',1);
l2 = line(nan,nan,'Color','b','LineWidth',1);
l3 = line(nan,nan,'Color','black','LineWidth',1);
l4 = line(nan,nan,'Color','c','LineWidth',1);
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('aceleracion (m/s^2)')
title('Captura de aceleraciones en tiempo real con Arduino')
grid on
hold on
%% Bucle
% inicializar
v1 = zeros(1,tmax*rate);
v2 = zeros(1,tmax*rate);
v3 = zeros(1,tmax*rate);
v4 = zeros(1,tmax*rate);
i = 1;
t = 0;
% Ejecutar bucle
tic
while t<tmax
t = toc;
% Lecturar puerto serie
a = fscanf(s,'%d,%d,%d,%d,%d');
v1(i)=a(1)*5/1024;
v2(i)=a(2)*5/1024;
v3(i)=a(3)*5/1024;
v4(i)=a(4)*5/1024;
% dibujar en la figura
x = linspace(0,i/rate,i);
set(l1,'YData',v1(1:i),'XData',x);
set(l2,'YData',v2(1:i),'XData',x);
set(l3,'YData',v3(1:i),'XData',x);
set(l4,'YData',v4(1:i),'XData',x);
drawnow
% seguir
i = i+1;
end
% Resultado
clc;
fprintf('%g s de captura a %g cap/s \n',t,i/t);
%% Limpiar valores
fclose(s);
delete(s);
clear s;

```

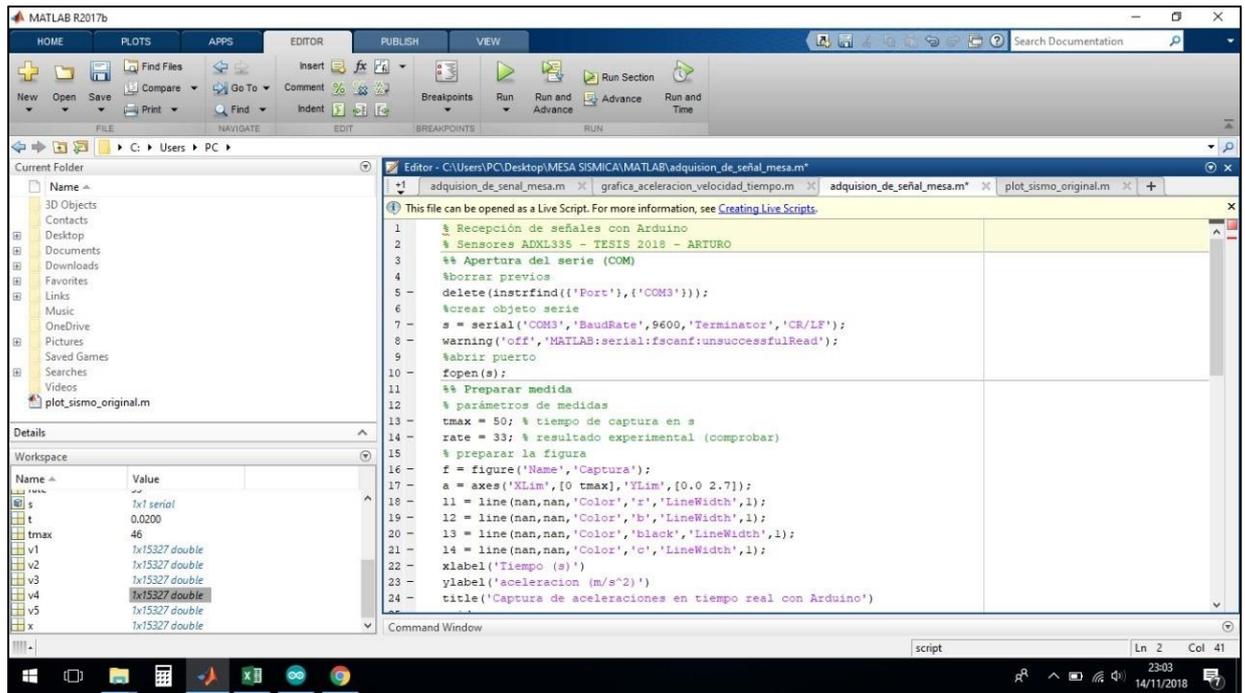


Figura 062: Ventana correspondiente a la captura de señales con MATLAB.

Fuente: Propia

De esta forma se logró capturar las señales brindadas por cada acelerómetro colocado en los diferentes niveles del modelo estructural experimental, obteniendo una matriz de aceleraciones con ocurrencia a través de una línea temporal, esto también es conocido como acelerograma.

3.7 IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES ADXL335 EN UN MODELO EXPERIMENTAL:

Se implementó sensores ADXL335 ya que este tipo de sensor permite medir aceleraciones en los 3 ejes, teniendo una capacidad de medir aceleraciones en un intervalo de -3G a 3G, considerando que G es la aceleración de la gravedad.

Estos sensores se conectan hasta en 3 entradas analógicas, una por cada eje de medición, el conector VCC se conecta a 3.3V.

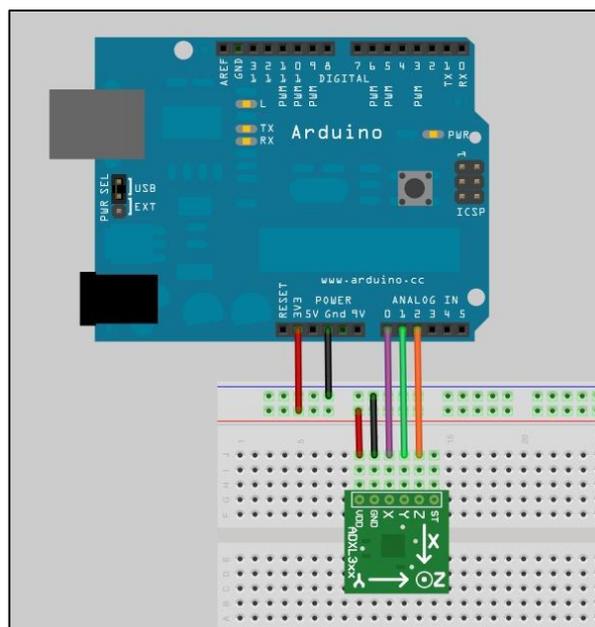


Figura 063: Sensor ADXL335 conectado a un Protoboard.
Fuente: Propia

Los sensores utilizados se orientaron de manera que el eje X esté en la misma dirección del movimiento de la plataforma de la Mesa Vibratoria.

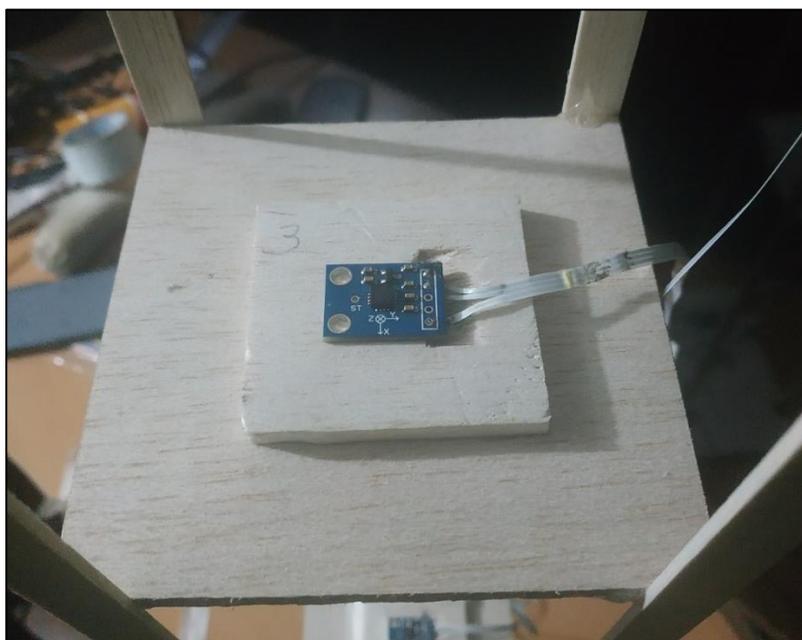


Figura 064: Ubicación del Sensor ADXL335 en el modelo experimental.
Fuente: Propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE ACELEROGRAMAS DE SALIDA Y ENTRADA EN UNA MESA VIBRATORIA

4.1.1 Análisis Estadístico con Acelerograma Senoidal:

4.1.1.1 Estadística Descriptiva:

Se presentan los siguientes datos para su utilización en el método de valor crítico y del p -valor.

Tabla 09
Estadística Descriptiva de los modelos teórico y experimental.

Modelo Teórico		Modelo Experimental	
Media	0.0015	Media	0.0045
Desviación estándar	21.2090	Desviación estándar	21.7529
Varianza de la muestra	449.8222	Varianza de la muestra	473.1905
Valor de dato Mínimo	-29.9408	Valor de dato Mínimo	-31.0980
Valor de dato Máximo	29.9408	Valor de dato Máximo	31.0990

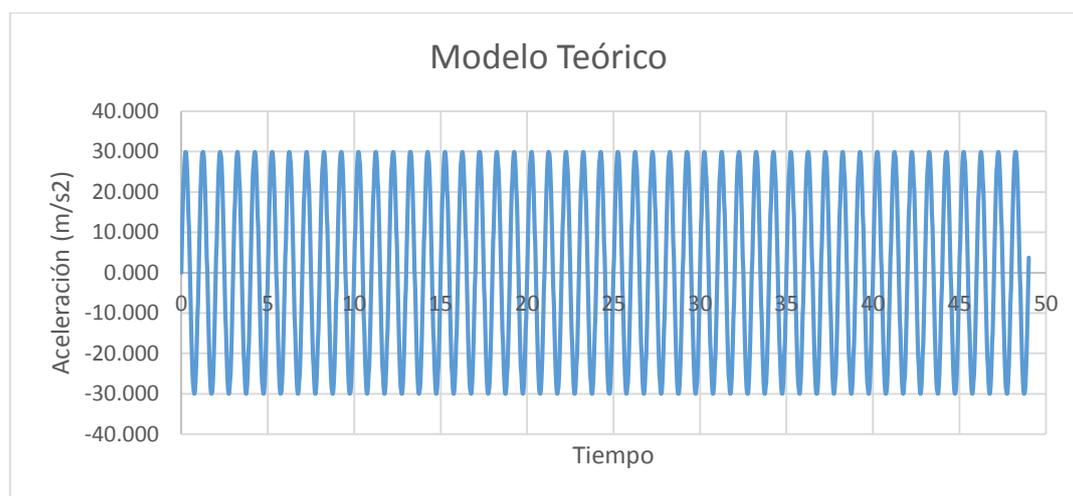
Resultados obtenidos con el software Excel 2016.

Fuente: Propia

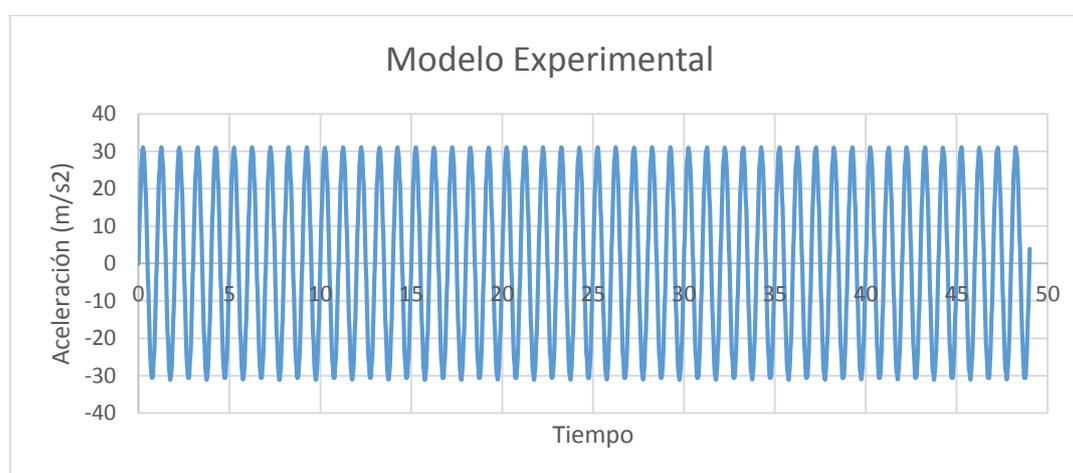
Como se puede observar la diferencia entre valores máximos negativos y positivos entre el Modelo Teórico y el Experimental no difieren mucho entre sí.

Se tiene que el valor mínimo obtenido en el ensayo de onda seno es -29.9408 m/s^2 para el modelo teórico y -31.0980 m/s^2 para el modelo experimental.

Y que el valor máximo obtenido en el ensayo de onda seno es 29.9408 m/s^2 para el modelo teórico y 31.0990 m/s^2 para el modelo experimental.



*Figura 065: Onda Senoidal de Entrada – Modelo Teórico.
Fuente: Propia*



*Figura 066: Onda Senoidal de Salida – Modelo Experimental.
Fuente: Propia*

4.1.1.2 Formulación de Hipótesis:

Se desea probar mediante una comparación de 2 medias poblacionales de muestras independientes que en este caso vienen a ser para la Primera Muestra que corresponde a una señal de forma senoidal y para la Segunda Muestra la señal captada producto de la emulación del mismo acelerograma senoidal, pero experimentalmente.

Esto con la finalidad de demostrar que el comportamiento dinámico estructural emulado en un modelo teórico y uno experimental es diferente.

4.1.1.3 Hipótesis nula (H_0):

Los datos teóricos son iguales a los datos experimentales.

$$H_0: \mu_T = \mu_E$$

$$H_0: \mu_T - \mu_E = D_0$$

$$D_0 = 0$$

Donde la diferencia especificada (entre los datos obtenidos experimentalmente y los teóricos) que se desea probar es 0.

$$H_0: \mu_T - \mu_E = 0$$

4.1.1.4 Hipótesis alternativa (H_1):

La Hipótesis alternativa H_1 señala que los datos teóricos serían estadísticamente diferentes a los datos experimentales.

$$H_1: \mu_T \neq \mu_E$$

$$H_1: \mu_T - \mu_E \neq D_0$$

De lo anterior inferimos que se trata de una Prueba de dos colas.

4.1.1.5 Especificación del Nivel de Significancia:

Se consideró de manera intencional un nivel de confianza de 95% un nivel de significancia del 5% es decir $\alpha = 0,05$ con $n_1 = 2452$, $n_2 = 2452$.

4.1.1.6 Estadístico de Prueba:

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - D_0}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

$$z = \frac{(0.0015 - 0.0045) - 0}{\sqrt{\frac{449.822}{2452} + \frac{473.191}{2452}}}$$

$$z = -0.0048$$

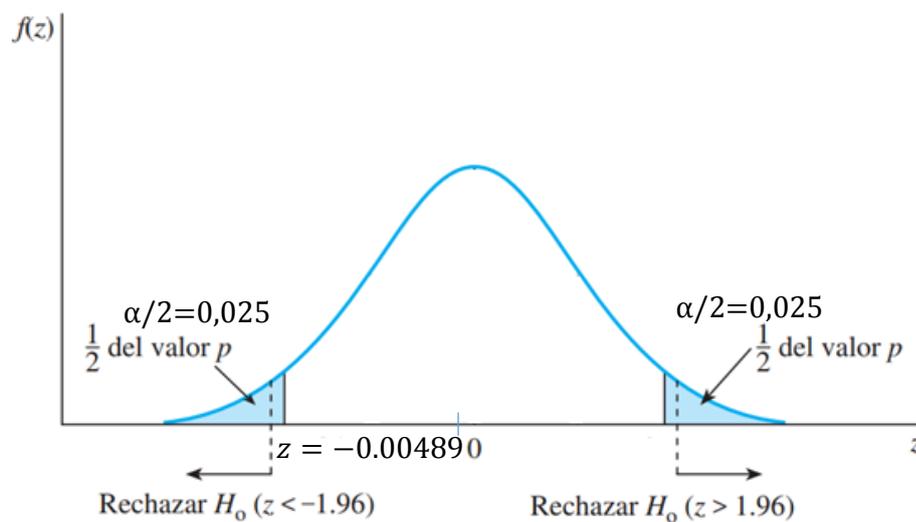
4.1.1.7 Región de rechazo:

Rechazar H_0 cuando: Prueba de dos colas

$$z > z_{\alpha/2} \quad \text{o bien} \quad z < -z_{\alpha/2}$$

4.1.1.8 Método de valor crítico:

Usando una prueba de dos colas con nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se pone $\alpha/2 = 0.025$ en cada cola de la distribución Z y se rechaza H_0 si $z > 1.96$ o $z < -1.96$. Como $Z = -0.0048$ no excede de 1.96 y no es menor a -1.96, H_0 no puede ser rechazada.



Se concluye con evidencia significativa que los datos teóricos son iguales a los datos experimentales con un nivel de confianza del 95%.

4.1.1.9 Método del p -valor:

Calculando el p -valor, la probabilidad de que z es mayor a $z = 0.0048$ y la probabilidad de que z sea menor a $z = -0.0048$, como se muestra en la anterior figura.

$$\text{Valor } p = P(z > 0.0048) + P(z < -0.0048) = (1 - 0.5019) + (0.4981) = 0.9962$$

Calculando el valor p aplicamos la regla de contraste para la toma de decisión:

Si $p < \alpha$ entonces rechazamos la hipótesis nula ($H_0: \mu_T - \mu_E = 0; \mu_T = \mu_E$), y aceptamos la hipótesis alternativa ($H_1: \mu_T \neq \mu_E$).

Por consiguiente, como $(p = 0.9962) > (\alpha = 0.05)$ entonces no rechazamos la hipótesis nula ($H_0: \mu_T - \mu_E = 0$).

Se acepta ($H_0: \mu_T - \mu_E = 0; \mu_T = \mu_E$), por lo tanto los valores teóricos son iguales a los valores experimentales estadísticamente.

\therefore Estadísticamente los datos experimentales son iguales a los teóricos a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

4.1.2 Análisis Estadístico con Acelerograma Senoidal de Diferentes Amplitudes:

4.1.2.1 Estadística Descriptiva:

Se presentan los siguientes datos para su utilización en el método de valor crítico y del p -valor.

Tabla 10
Estadística Descriptiva de los modelos teórico y experimental.

Modelo Teórico		Modelo Experimental	
Media	0.0206	Media	0.0340
Desviación estándar	13.9310	Desviación estándar	13.8672
Varianza de la muestra	194.0733	Varianza de la muestra	192.2986
Valor de dato Mínimo	-29.9408	Valor de dato Mínimo	-31.421
Valor de dato Máximo	29.9408	Valor de dato Máximo	30.508

Resultados obtenidos con el software Excel 2016.

Fuente: Propia

Como se puede observar la diferencia entre valores máximos negativos y positivos entre el Modelo Teórico y el Experimental no difieren mucho entre sí.

Se tiene que el valor mínimo obtenido en el ensayo de ondas senoidales de diferentes amplitudes es -29.9408 m/s^2 para el modelo teórico y -31.421 m/s^2 para el modelo experimental.

Y que el valor máximo es 29.9408 m/s^2 para el modelo teórico y 30.508 m/s^2 para el modelo experimental.

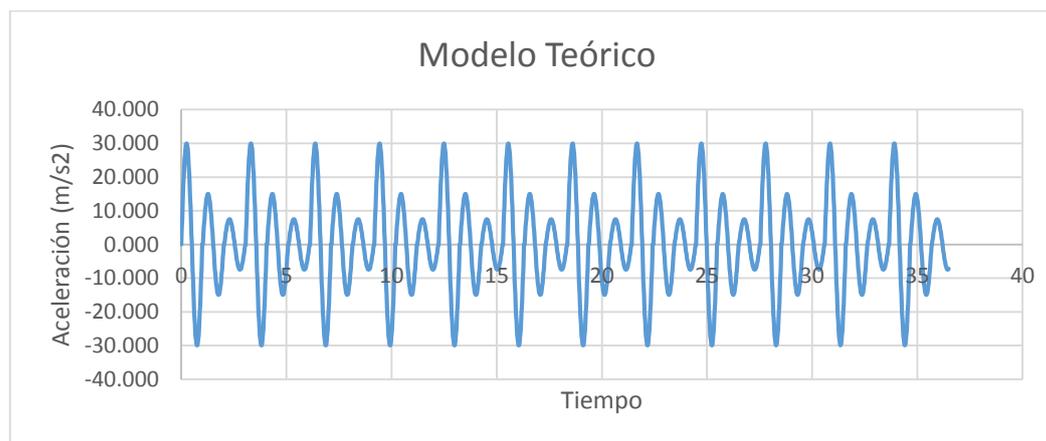


Figura 067: Onda Senoidal de Entrada – Modelo Teórico.
Fuente: Propia

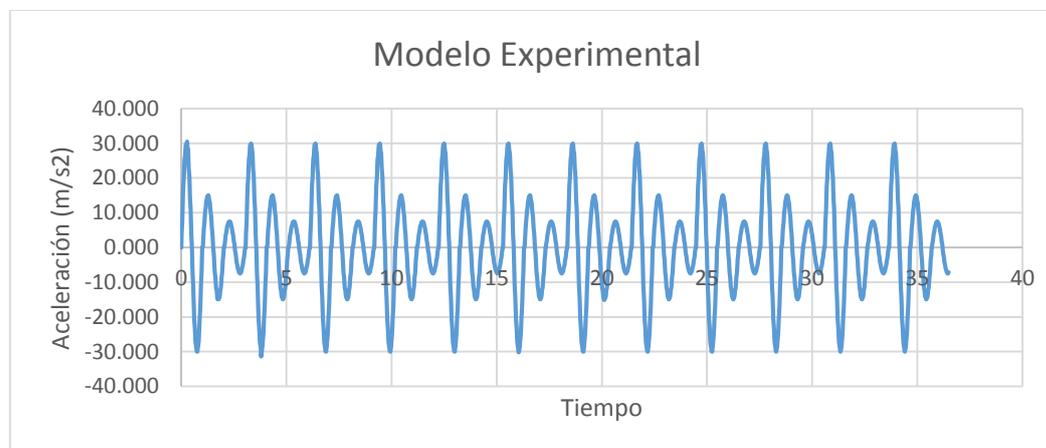


Figura 068: Onda Senoidal de Salida – Modelo Experimental.
Fuente: Propia

4.1.2.2 Formulación de Hipótesis:

Se desea probar mediante una comparación de 2 medias poblacionales de muestras independientes que en este caso vienen a ser para la Primera Muestra que corresponde a

una señal de funciones seno de diferentes amplitudes y para la Segunda Muestra la señal captada producto de la emulación del mismo acelerograma, pero experimentalmente.

Esto con la finalidad de demostrar que el comportamiento dinámico estructural emulado en un modelo teórico y uno experimental es diferente.

4.1.2.3 Hipótesis nula (H_0):

Los datos teóricos son iguales a los datos experimentales

$$H_0: \mu_T = \mu_E$$

$$H_0: \mu_T - \mu_E = D_0$$

$$D_0 = 0$$

Donde la diferencia especificada (entre los datos obtenidos experimentalmente y los teóricos) que se desea probar es 0.

$$H_0: \mu_T - \mu_E = 0$$

4.1.2.4 Hipótesis alternativa (H_1):

La Hipótesis alternativa H_1 señala que los datos teóricos serían estadísticamente diferentes a los datos experimentales.

$$H_1: \mu_T \neq \mu_E$$

$$H_1: \mu_T - \mu_E \neq D_0$$

De lo anterior inferimos que se trata de una Prueba de dos colas.

4.1.2.5 Especificación del Nivel de Significancia:

Se consideró de manera intencional un nivel de confianza de 95% y un nivel de significancia del 5% es decir $\alpha = 0,05$ con $n_1 = 1826$, $n_2 = 1826$.

4.1.2.6 Estadístico de Prueba:

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - D_0}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

$$z = \frac{(0.0206 - 0.0340) - 0}{\sqrt{\frac{194.0733}{1826} + \frac{192.2988}{2452}}}$$

$$z = -0.0291$$

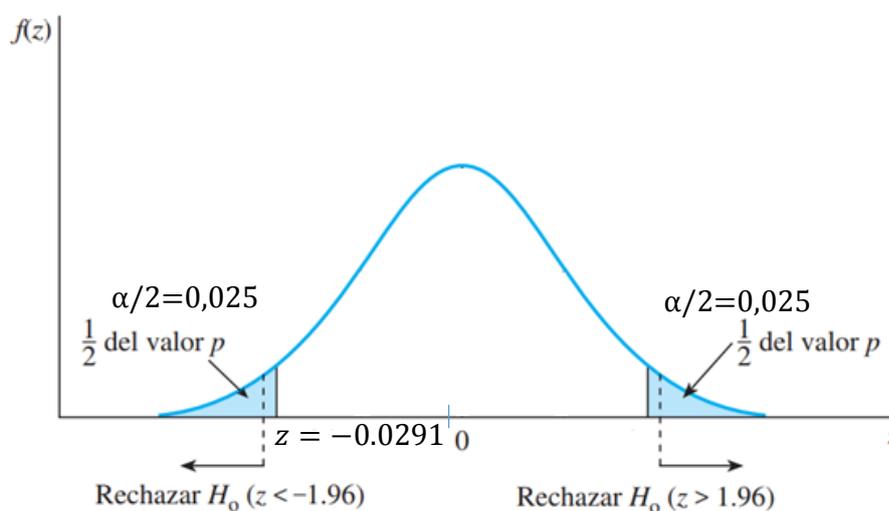
4.1.2.7 Región de rechazo:

Rechazar H_0 cuando: Prueba de dos colas

$$z > z_{\alpha/2} \quad \text{o bien} \quad z < -z_{\alpha/2}$$

4.1.2.8 Método de valor crítico:

Usando una prueba de dos colas con nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se pone $\alpha/2 = 0.025$ en cada cola de la distribución Z y se rechaza H_0 si $z > 1.96$ o $z < -1.96$. Como $Z = -0.0291$ no excede de 1.96 y no es menor a -1.96, H_0 no puede ser rechazada.



Se concluye con evidencia significativa que los datos teóricos son iguales a los datos experimentales con un nivel de confianza del 95%.

4.1.2.9 El Método del p -valor:

Calculando el p -valor, la probabilidad de que z es mayor a $z = 0.0291$ y la probabilidad de que z sea menor a $z = -0.0291$, como se muestra en la anterior figura.

$$\text{Valor } p = P(z > 0.0291) + P(z < -0.0291) = (1 - 0.5116) + (0.4883) = 0.9767$$

Calculando el valor p aplicamos la regla de contraste para la toma de decisión:

Si $p < \alpha$ entonces rechazamos la hipótesis nula ($H_0: \mu_T - \mu_E = 0; \mu_T = \mu_E$), y aceptamos la hipótesis alternativa ($H_1: \mu_T \neq \mu_E$).

Por consiguiente, como $(p = 0.9767) > (\alpha = 0.05)$ entonces no rechazamos la hipótesis nula ($H_0: \mu_T - \mu_E = 0$).

Se acepta ($H_0: \mu_T - \mu_E = 0; \mu_T = \mu_E$), por lo tanto los valores teóricos son iguales a los valores experimentales estadísticamente.

\therefore Estadísticamente los datos experimentales son iguales a los teóricos a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

4.1.3 Análisis Estadístico con Acelerograma de un Sismo Real:

4.1.3.1 Estadística Descriptiva:

Se presentan los siguientes datos para su utilización en el método de valor crítico y del p -valor.

Tabla 11
Estadística Descriptiva de los modelos teórico y experimental.

Modelo Teórico		Modelo Experimental	
Media	0.0423	Media	-0.0035
Desviación estándar	20.9110	Desviación estándar	23.3990
Varianza de la muestra	437.2691	Varianza de la muestra	547.5159
Valor de dato Mínimo	-104.82	Valor de dato Mínimo	-113.408
Valor de dato Máximo	93.8	Valor de dato Máximo	126.884

Resultados obtenidos con el software Excel 2016.

Fuente: Propia

Como se puede observar la diferencia entre valores máximos negativos y positivos entre el Modelo Teórico y el Experimental no difieren mucho entre sí.

Se tiene que el valor mínimo obtenido en el ensayo para este sismo es -104.82 m/s^2 para el modelo teórico y -113.408 m/s^2 para el modelo experimental.

Y que el valor máximo obtenido es 93.8 m/s^2 para el modelo teórico y 126.884 m/s^2 para el modelo experimental.

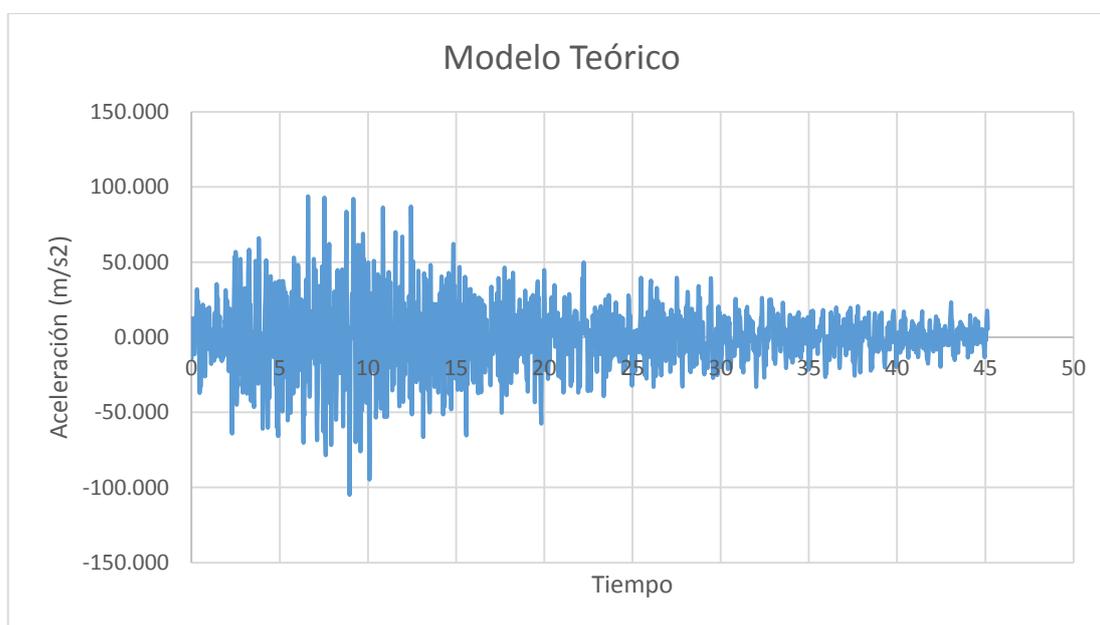


Figura 069: Onda Senoidal de Entrada – Modelo Teórico.

Fuente: Propia

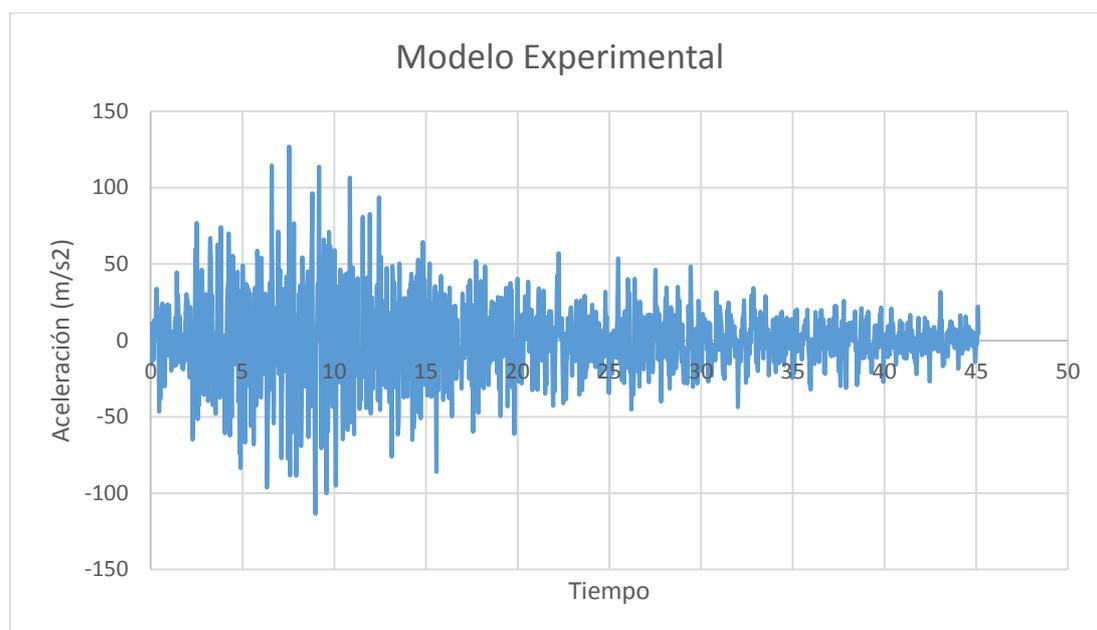


Figura 070: Onda Senoidal de Salida – Modelo Experimental.
Fuente: Propia

4.1.3.2 Formulación de Hipótesis:

Se desea probar mediante una comparación de 2 medias poblacionales de muestras independientes que en este caso vienen a ser para la Primera Muestra que corresponde al acelerograma de un sismo real y para la Segunda Muestra la señal captada producto de la emulación del mismo acelerograma, pero experimentalmente.

Esto con la finalidad de demostrar que el comportamiento dinámico estructural emulado en un modelo teórico y uno experimental es diferente.

4.1.3.3 Hipótesis nula (H_0):

Los datos teóricos son iguales a los datos experimentales

$$H_0: \mu_T = \mu_E$$

$$H_0: \mu_T - \mu_E = D_0$$

$$D_0 = 0$$

Donde la diferencia especificada (entre los datos obtenidos experimentalmente y los teóricos) que se desea probar es 0.

$$H_0: \mu_T - \mu_E = 0$$

4.1.3.4 Hipótesis alternativa (H_1):

La Hipótesis alternativa H_1 señala que los datos teóricos serían estadísticamente diferentes a los datos experimentales.

$$H_1: \mu_T \neq \mu_E$$

$$H_1: \mu_T - \mu_E \neq D_0$$

De lo anterior inferimos que se trata de una Prueba de dos colas.

4.1.3.5 Especificación del Nivel de Significancia:

Se consideró de manera intencional un nivel de confianza de 95% y un nivel de significancia del 5% es decir $\alpha = 0,05$ con $n_1 = 2258$, $n_2 = 2258$.

4.1.3.6 Estadístico de Prueba:

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - D_0}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

$$z = \frac{(0.0423 - (-0.0036)) - 0}{\sqrt{\frac{437.2691}{2258} + \frac{547.5158}{2258}}}$$

$$z = 0.0695$$

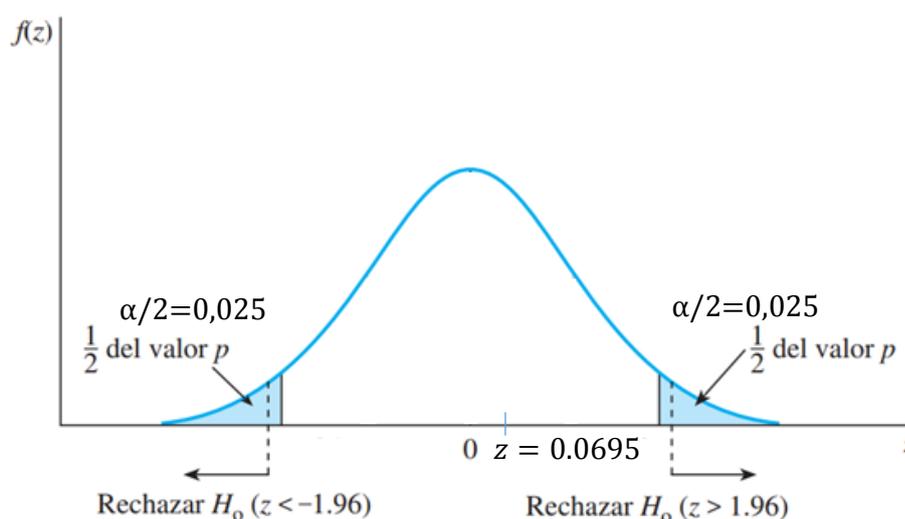
4.1.3.7 Región de rechazo:

Rechazar H_0 cuando: Prueba de dos colas

$$z > z_{\alpha/2} \text{ o bien } z < -z_{\alpha/2}$$

4.1.3.8 Método de valor crítico:

Usando una prueba de dos colas con nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se pone $\alpha/2 = 0.025$ en cada cola de la distribución Z y se rechaza H_0 si $z > 1.96$ o $z < -1.96$. Como $Z = -0.0291$ no excede de 1.96 y no es menor a -1.96, H_0 no puede ser rechazada.



Se concluye con evidencia significativa que los datos teóricos son iguales a los datos experimentales con un nivel de confianza del 95%.

4.1.3.9 El Método del p -valor:

Calculando el p -valor, la probabilidad de que z es mayor a $z = 0.0695$ y la probabilidad de que z sea menor a $z = -0.0695$, como se muestra en la anterior figura.

$$\text{Valor } p = P(z > 0.0695) + P(z < -0.0695) = (1 - 0.5277) + (0.4723) = 0.9446$$

Calculando el valor p aplicamos la regla de contraste para la toma de decisión:

Si $p < \alpha$ entonces rechazamos la hipótesis nula ($H_0: \mu_T - \mu_E = 0; \mu_T = \mu_E$), y aceptamos la hipótesis alternativa ($H_1: \mu_T \neq \mu_E$).

Por consiguiente, como $(p = 0.9446) > (\alpha = 0.05)$ entonces no rechazamos la hipótesis nula ($H_0: \mu_T - \mu_E = 0$).

Se acepta ($H_0: \mu_T - \mu_E = 0; \mu_T = \mu_E$), por lo tanto los valores teóricos son iguales a los valores experimentales estadísticamente.

∴ Estadísticamente los datos experimentales son iguales a los teóricos a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

4.2 COMPORTAMIENTO DINÁMICO ESTRUCTURAL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL:

4.2.1 Modelo Estructural Teórico

4.2.1.1 Desplazamientos:

En este apartado se analizan los desplazamientos obtenidos en el modelo teórico producto del análisis Tiempo – Historia con el software SAP2000, datos que se utilizarán más adelante en la prueba de Coeficientes de Correlación de Pearson contrastada con los desplazamientos obtenidos del modelo experimental.

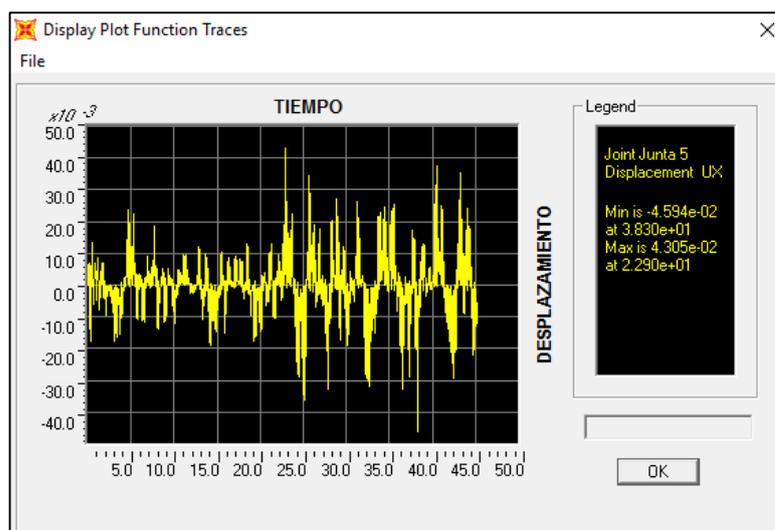


Figura 071: Desplazamientos de la Junta 5.
Fuente: Propia

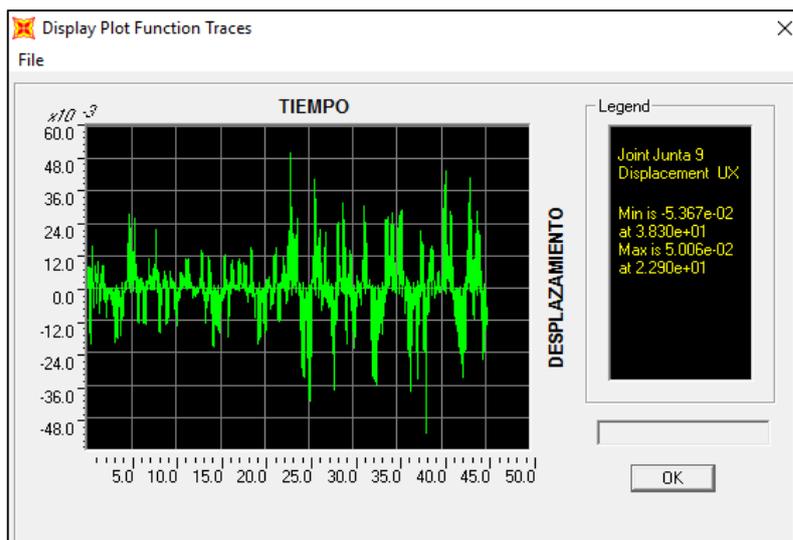


Figura 072: Desplazamientos de la Junta 9.
Fuente: Propia

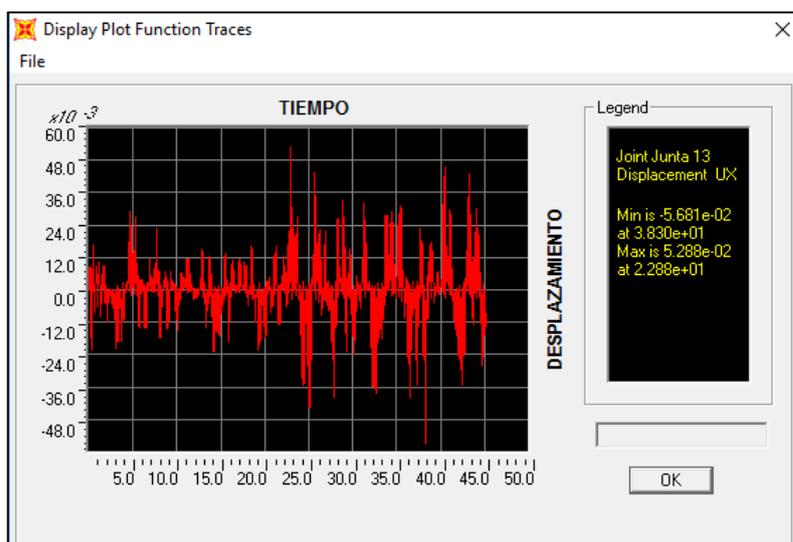


Figura 073: Desplazamientos en la Junta 13.
Fuente: Propia

4.2.1.2 Velocidades:

En este apartado se analizan las velocidades obtenidas en el modelo teórico producto del análisis Tiempo – Historia con el software SAP2000, datos que se utilizarán más adelante en la prueba de Coeficientes de Correlación de Pearson contrastada con las velocidades obtenidas del modelo experimental.

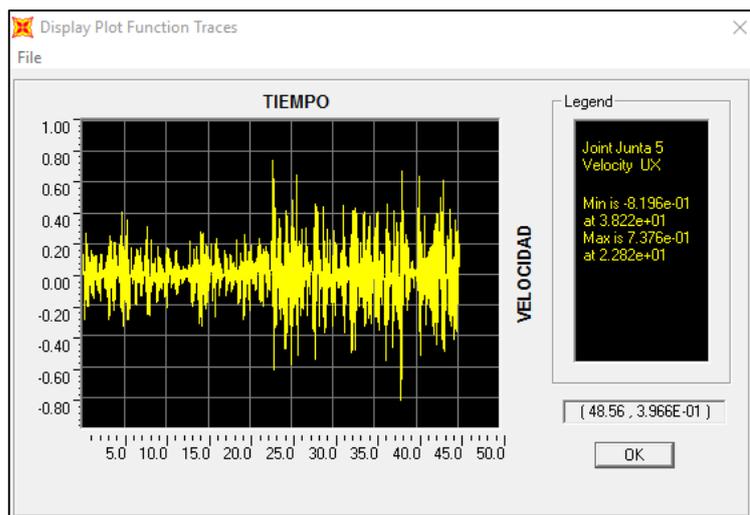


Figura 074: Velocidades en la Junta 5.
Fuente: Propia

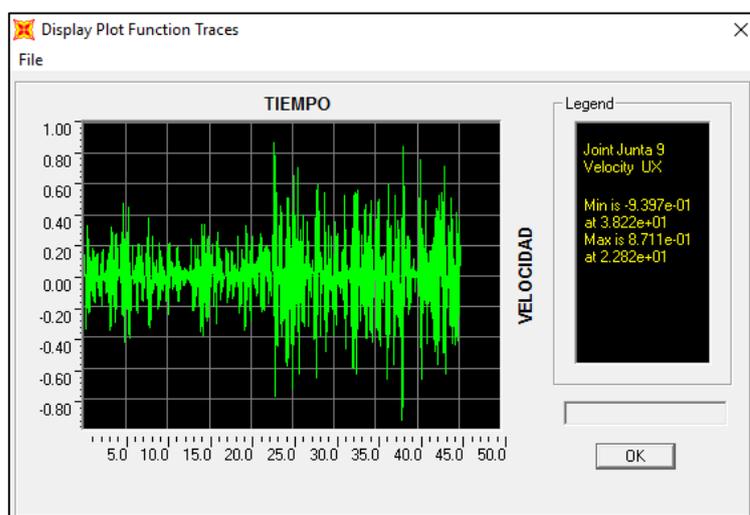


Figura 075: Velocidades en la Junta 9.
Fuente: Propia

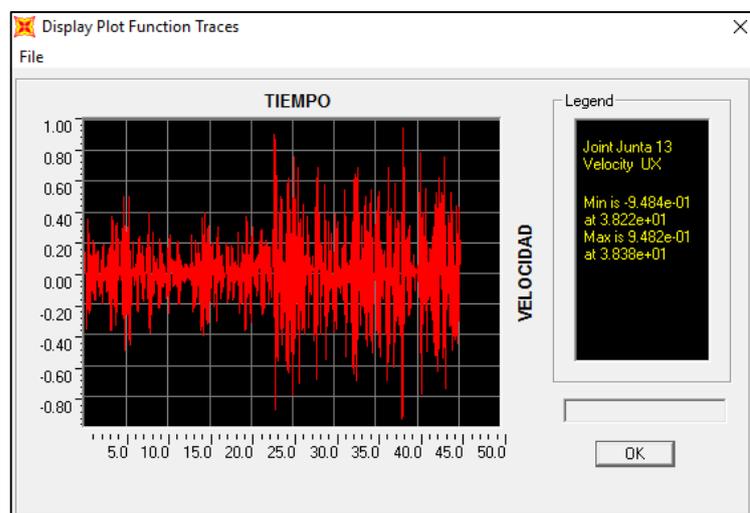


Figura 076: Velocidades en la Junta 13.
Fuente: Propia

4.2.1.3 Aceleraciones:

En este apartado se analizan las aceleraciones obtenidas en el modelo teórico producto del análisis Tiempo – Historia con el software SAP2000, datos que se utilizarán más adelante en la prueba de Coeficientes de Correlación de Pearson contrastada con las aceleraciones del modelo experimental.

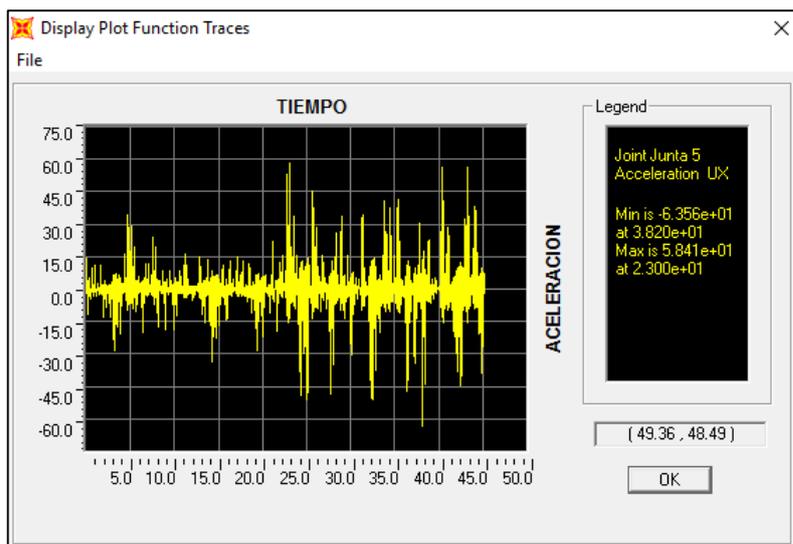


Figura 077: Aceleraciones en la Junta 5.
Fuente: Propia

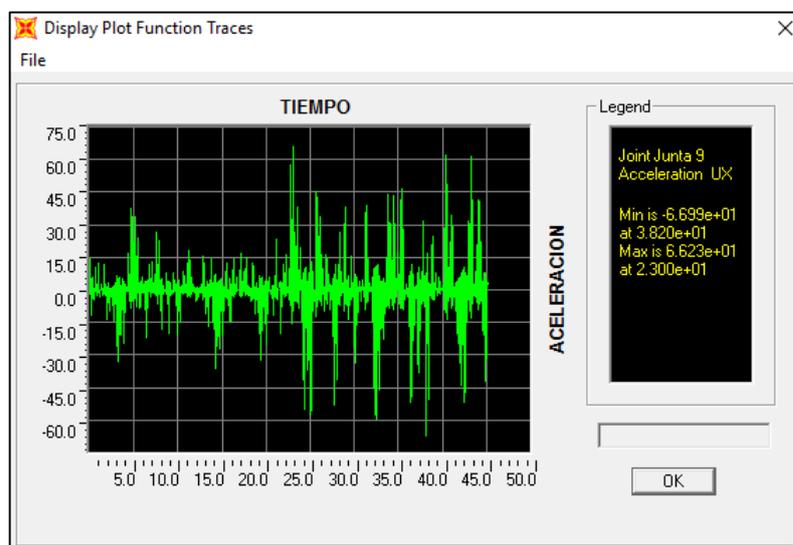


Figura 078: Aceleraciones en la Junta 9.
Fuente: Propia

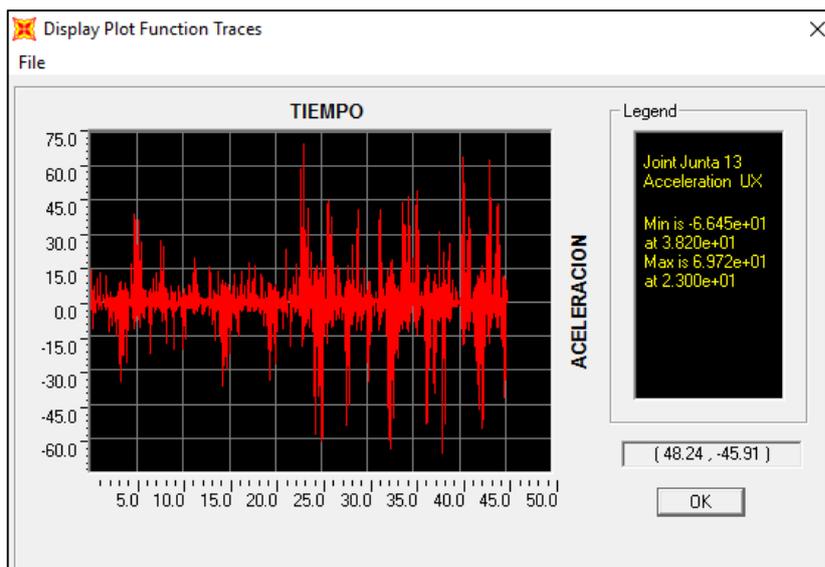


Figura 079: Aceleraciones en la Junta 13.
Fuente: Propia

Como se observa en la obtención de resultados, existe un creciente incremento de aceleraciones, velocidades y desplazamientos conforme el nivel en la estructura teórica analizada es mayor.

4.2.1.4 Resumen de Resultados Teóricos:

Tabla 12
Aceleraciones, Velocidades y Desplazamientos máximos teóricos.

		Primer Nivel	Segundo Nivel	Tercer Nivel
Aceleraciones	(cm/s^2)	63.56	69.90	69.72
Velocidades	(cm/s)	0.82	0.94	0.95
Desplazamientos	(cm)	4.59	5.37	5.68

Resultados obtenidos con el software SAP2000 en el Modelo Teórico.
Fuente: Propia

4.2.2 Modelo Estructural Experimental:

La superposición de datos en la siguiente ilustración nos ayuda a tener una idea clara de que la captura de señales independiente en cada nivel tiene un mismo patrón de amplitud en un rango de tiempo, como se puede observar con los datos capturados, los picos de aceleración están entre el quinto y décimo segundo de emulación sísmica.

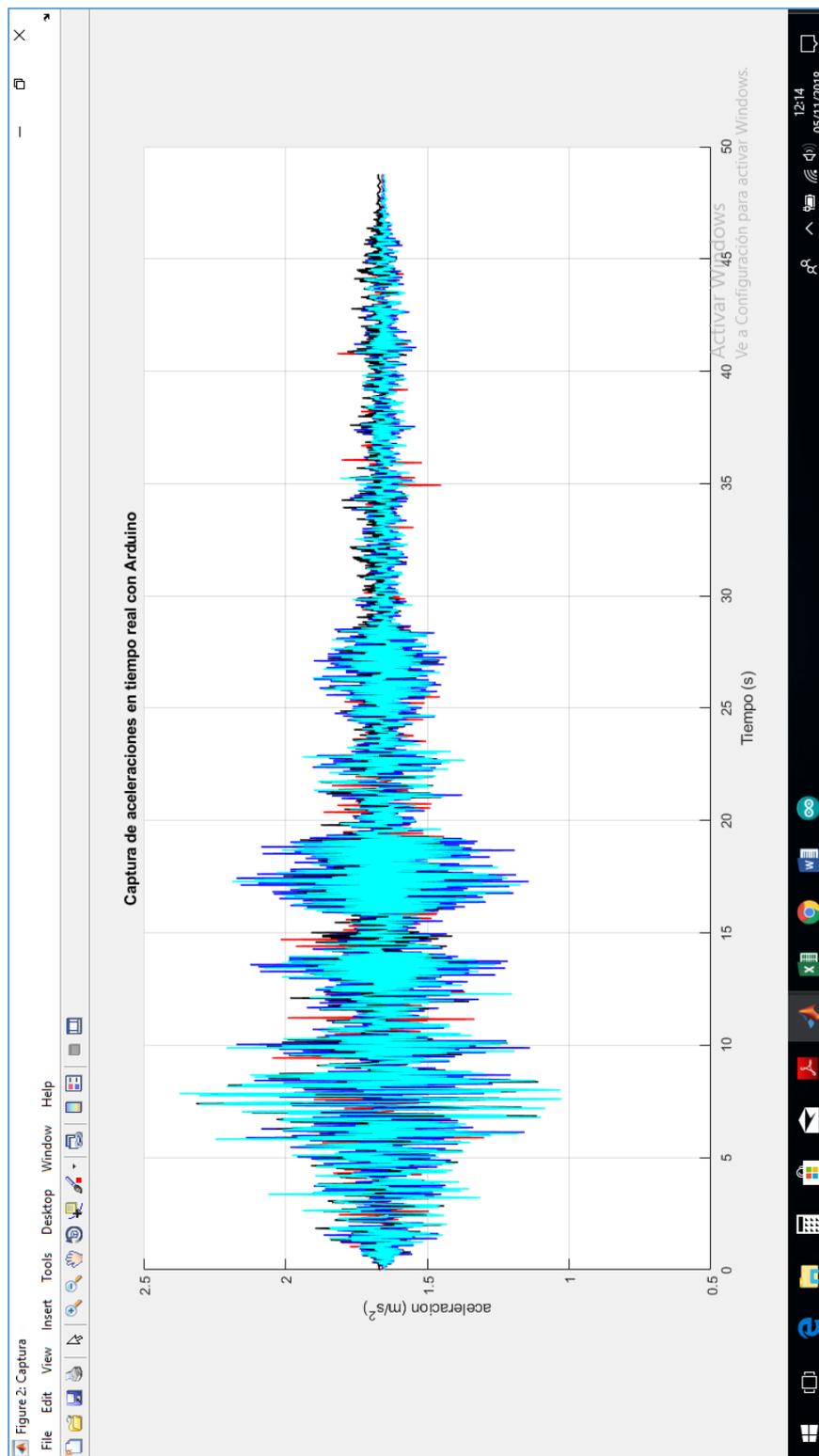


Figura 080: Captura superpuesta de señales captadas en los 3 niveles.

Fuente: Propia

4.2.2.1 Obtención de Aceleraciones, Velocidades y Desplazamientos:

El software matemático MATLAB tras la recepción de una señal a través de una línea temporal en este caso, las aceleraciones, permite la opción de copiar estos datos, para después guardarlos en el formato .txt. Estas señales, en este caso aceleraciones, sirven para calcular las velocidades y desplazamientos en el software SeismoSignal que mediante el proceso de integración de aceleraciones calcula las velocidades y posteriormente integrando las velocidades calcula los desplazamientos.

En la siguiente imagen se observa que la aceleración máxima que capturó el sensor ADXL335 colocado en el Primer Nivel del modelo experimental es $108.23\text{cm}/\text{s}^2$ luego de haber aplicada la corrección de línea base con el software SeismoSignal V 4.3.0, como se observa en el gráfico el valor pico absoluto está ubicado en el espacio temporal 5.3s.

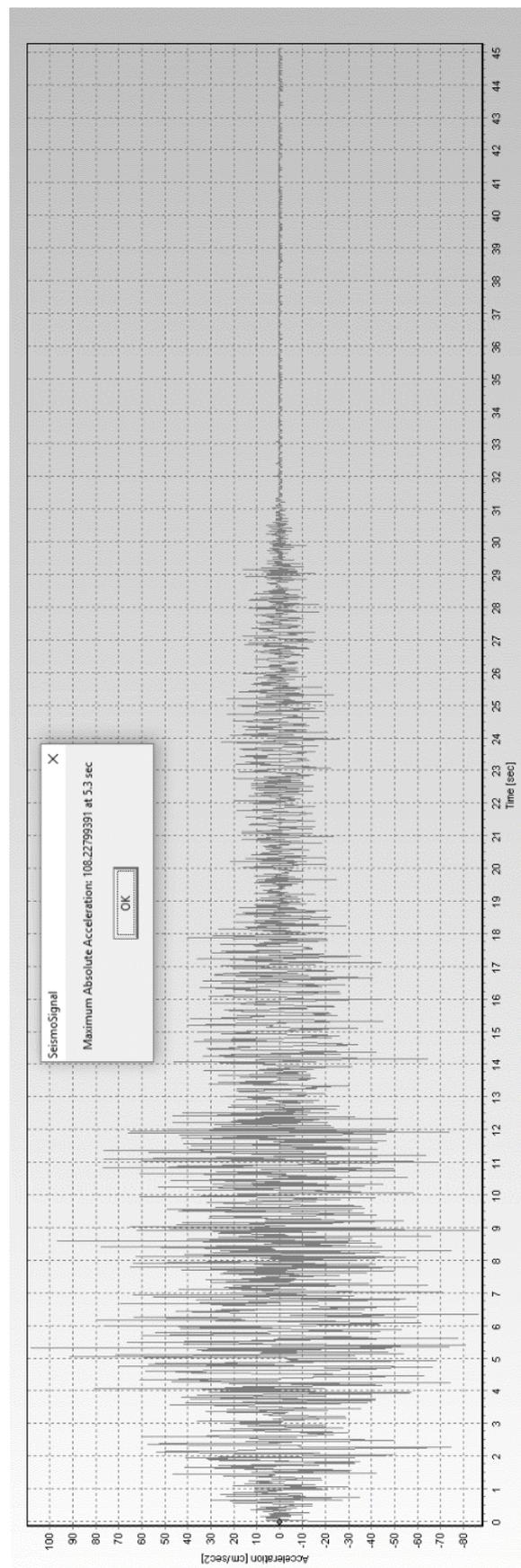


Figura 081: Aceleraciones obtenidas para el primer nivel.
Fuente: Propia

En la siguiente imagen se observa que la Velocidad máxima que capturó el sensor ADXL335 colocado en el Primer Nivel del modelo experimental es 2.67cm/s datos obtenidos por la integración de la aceleración, proceso automático efectuado por el software SeismoSignal V 4.3.0.

La forma poco alineada al eje de las abscisas se debe a la irregularidad de las aceleraciones, debido a que se trata de un sismo real y no uno sintético el que se utilizó para el análisis.

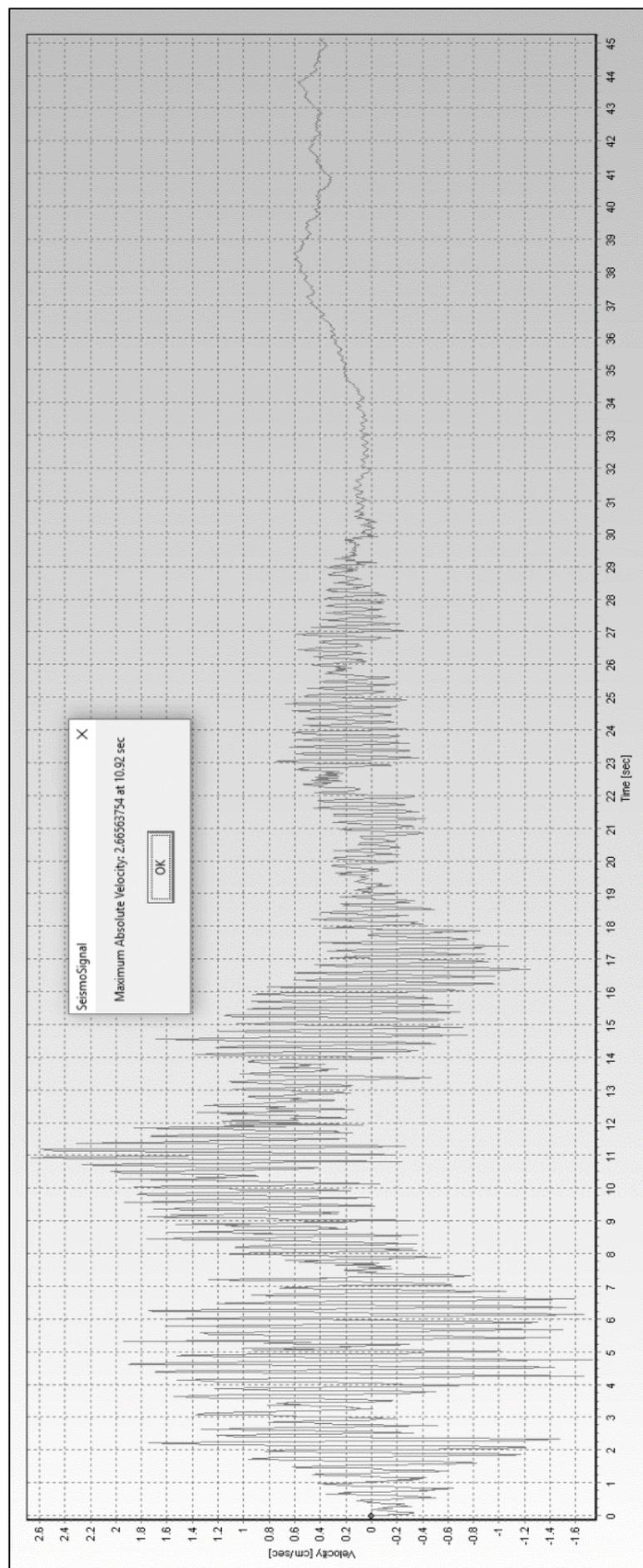


Figura 082: Velocidades obtenidas para el primer nivel.

Fuente: Propia

La siguiente imagen pertenece al gráfico resultante de la integración de las velocidades que se calcularon integrando las aceleraciones que capturó el sensor ADXL335 colocado en el Primer Nivel del modelo experimental.

La forma poco alineada al eje de las abscisas se debe a la irregularidad de las aceleraciones, debido a que se trata de un sismo real y no uno sintético el que se utilizó para el análisis, para determinar el desplazamiento máximo y su ocurrencia en la línea temporal se necesita analizar los picos y determinarlos visualmente. Para estos resultados se concluye que el desplazamiento máximo es 6.51cm y acontece en el segundo 16 del ensayo sísmico.

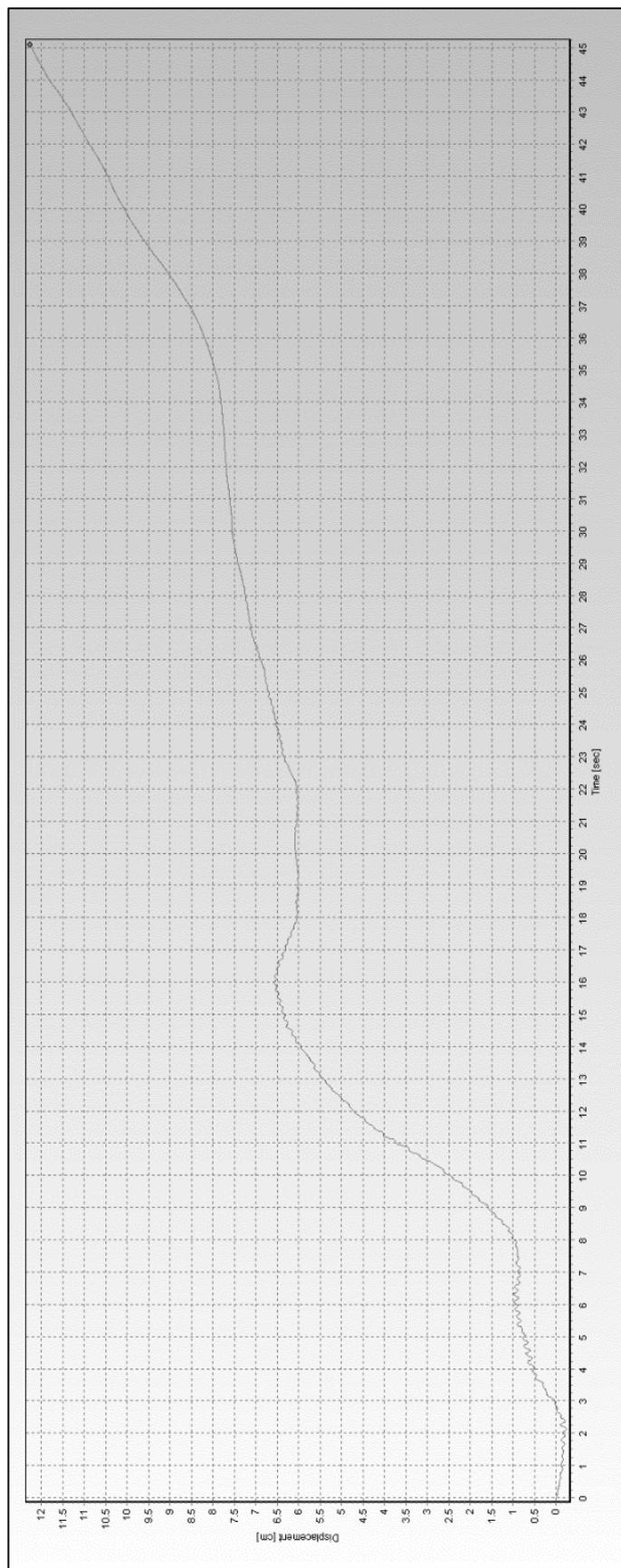


Figura 083: Desplazamientos obtenidos para el primer nivel.
Fuente: Propia

En la siguiente imagen se observa que la aceleración máxima que capturó el sensor ADXL335 colocado en el Segundo Nivel del modelo experimental es $118.63\text{cm}/\text{s}^2$ luego de haber aplicada la corrección de línea base con el software SeismoSignal V 4.3.0, como se observa en el gráfico el valor pico absoluto está ubicado en el espacio temporal 11.32s.

Se puede observar que la aceleración pico acontece 6.02s más tarde que en el primer nivel, y que la excitación sísmica es mayor prematuramente con respecto al segundo nivel.

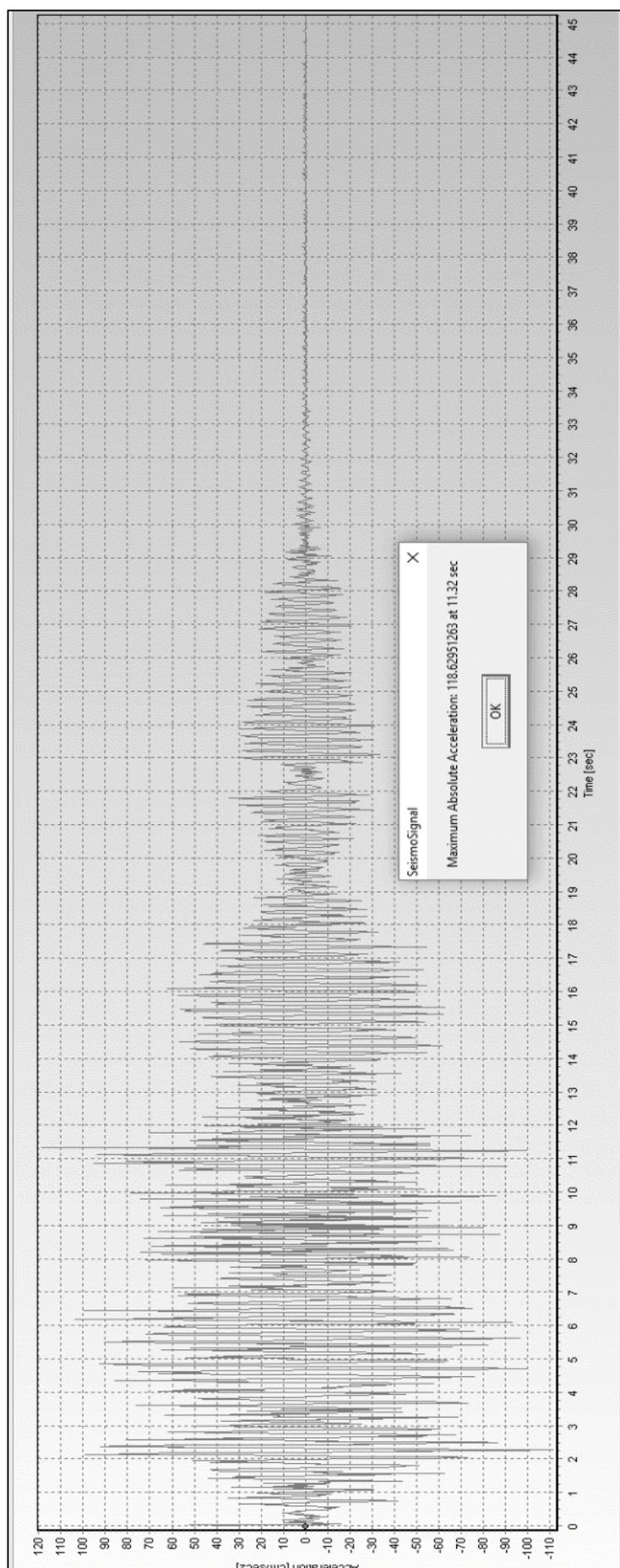


Figura 084: Aceleraciones obtenidas para el segundo nivel.
Fuente: Propia

En la siguiente imagen se observa que la Velocidad máxima que capturó el sensor ADXL335 colocado en el Segundo Nivel del modelo experimental es 4.29cm/s datos obtenidos por la integración de la aceleración, proceso automático efectuado por el software SeismoSignal V 4.3.0.

La forma poco alineada al eje de las abscisas se debe a la irregularidad de las aceleraciones, debido a que se trata de un sismo real y no uno sintético el que se utilizó para el análisis.

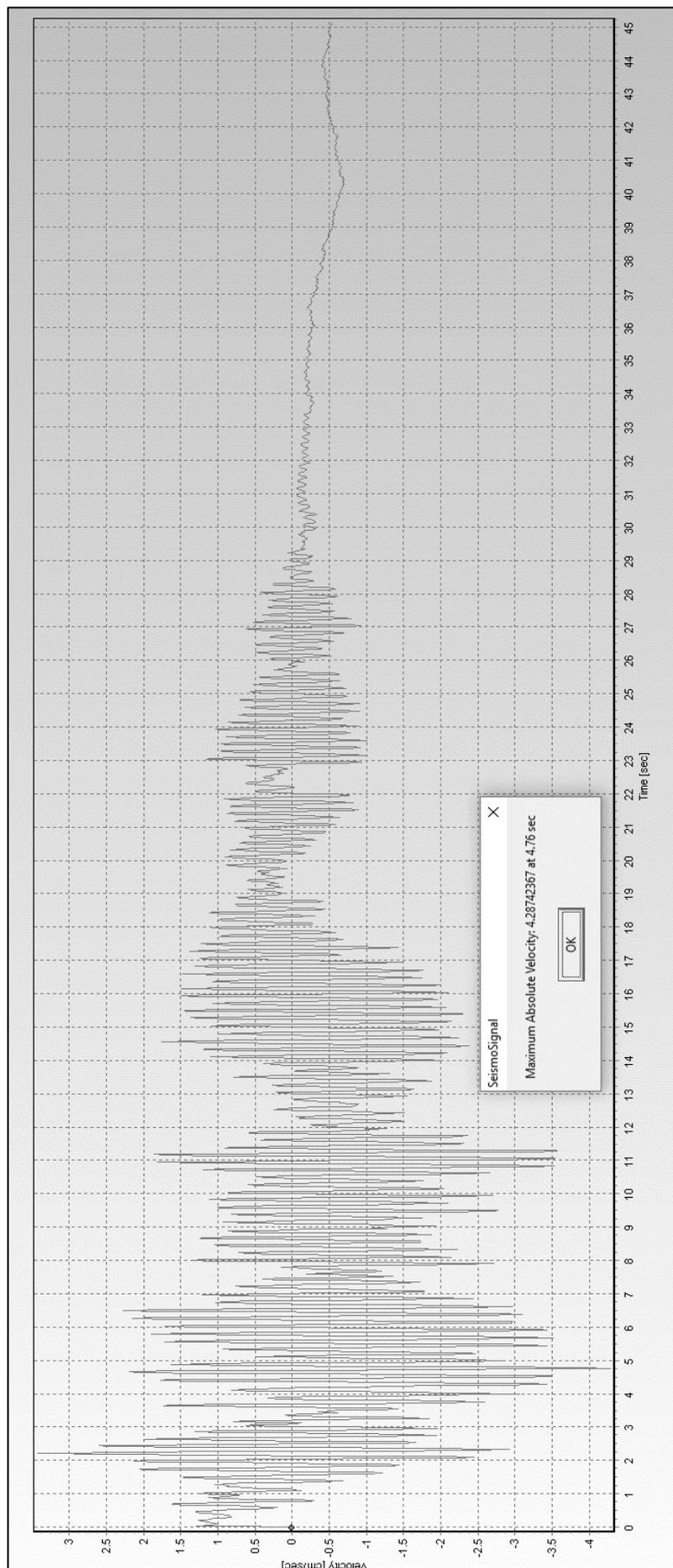


Figura 085: Velocidades obtenidas para el segundo nivel.
Fuente: Propia

La siguiente imagen pertenece al gráfico resultante de la integración de las velocidades que se calcularon integrando las aceleraciones que capturó el sensor ADXL335 colocado en el Segundo Nivel del modelo experimental.

La forma poco alineada al eje de las abscisas se debe a la irregularidad de las aceleraciones, debido a que se trata de un sismo real y no uno sintético el que se utilizó para el análisis, para determinar el desplazamiento máximo y su ocurrencia en la línea temporal se necesita analizar los picos y determinarlos visualmente. Para estos resultados se concluye que el desplazamiento máximo es 7.40cm y acontece en el segundo 16.80 del ensayo sísmico.

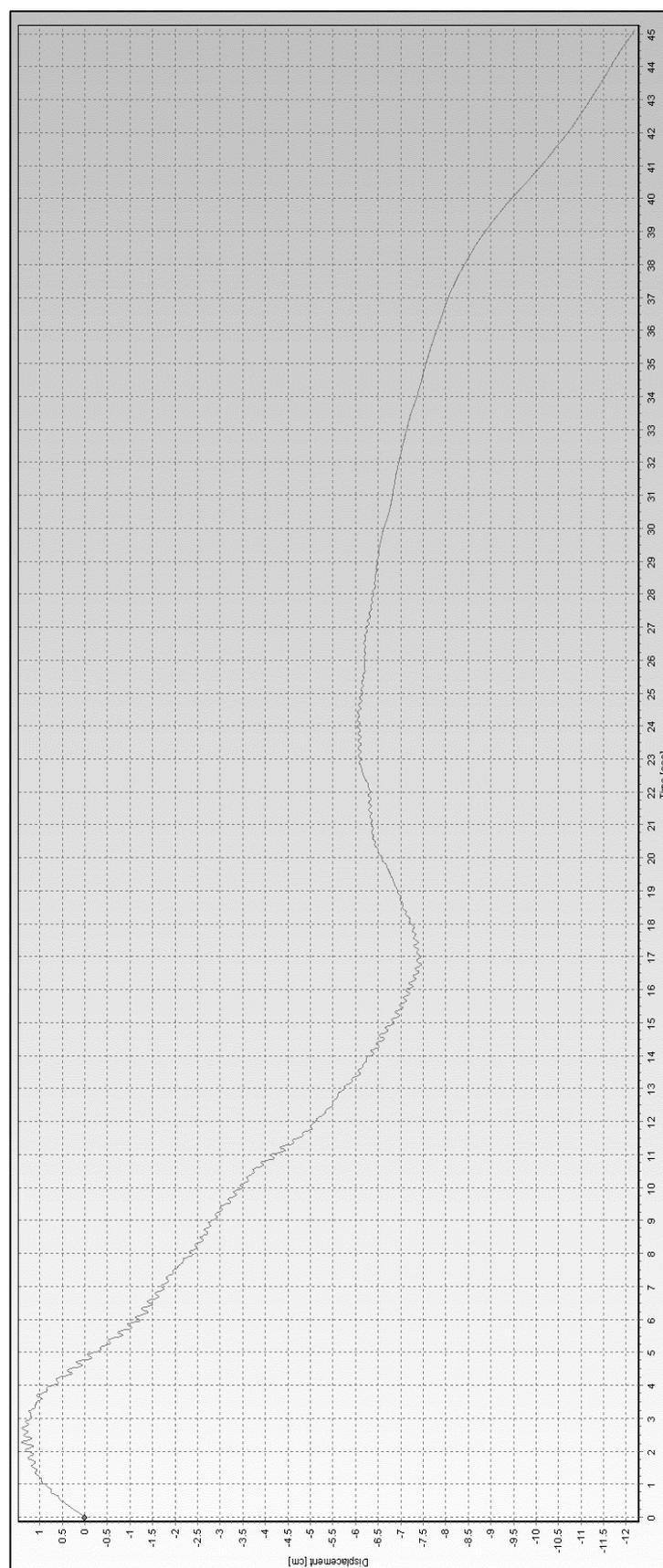


Figura 086: Desplazamientos obtenidos para el segundo nivel.

Fuente: Propia

En la siguiente imagen se observa que la aceleración máxima que capturó el sensor ADXL335 colocado en el Tercer Nivel del modelo experimental es $132.04\text{cm}/\text{s}^2$ luego de haber aplicada la corrección de línea base con el software SeismoSignal V 4.3.0, como se observa en el gráfico el valor pico absoluto está ubicado en el espacio temporal 4.82s.

Se puede observar que la aceleración pico acontece 0.48s más antes que en el primer nivel, y que la excitación sísmica es mayor tempranamente con respecto al segundo nivel.

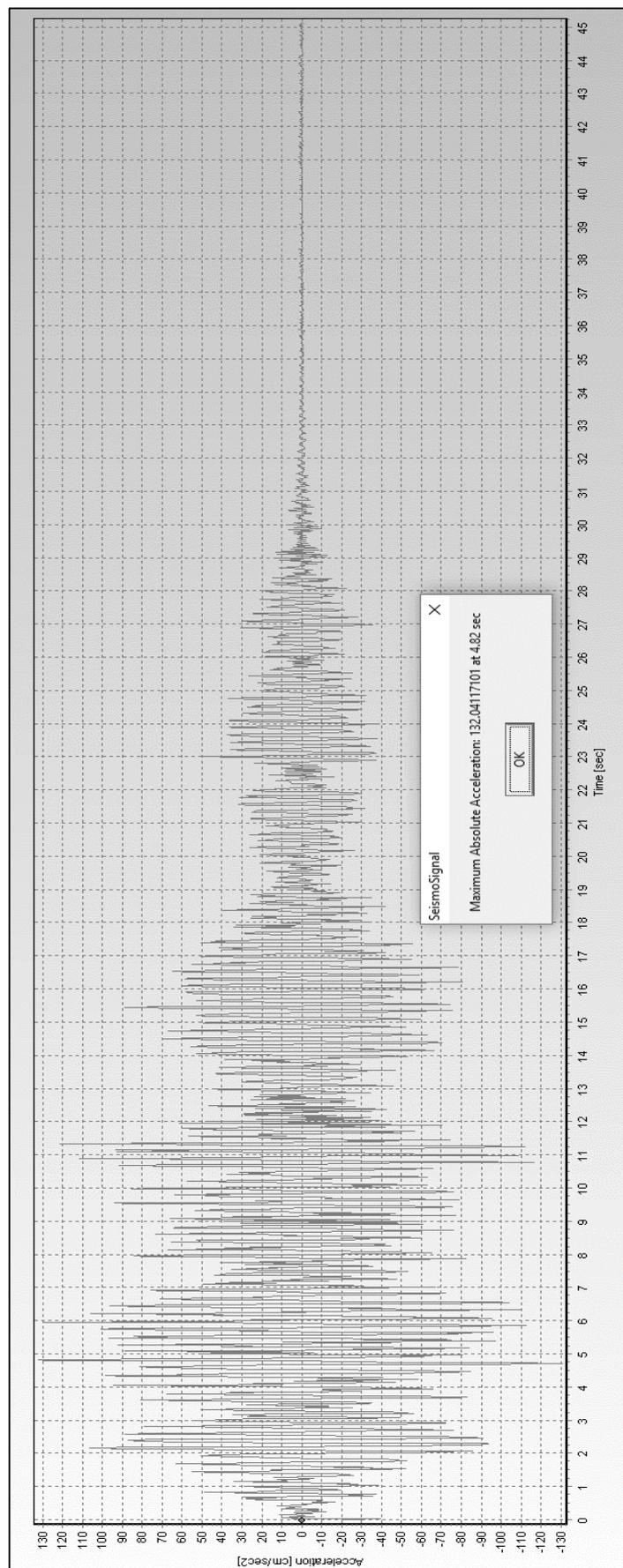


Figura 087: Aceleraciones obtenidas para el tercer nivel.

Fuente: Propia

En la siguiente imagen se observa que la Velocidad máxima que capturó el sensor ADXL335 colocado en el Segundo Nivel del modelo experimental es 4.59 cm/s datos obtenidos por la integración de la aceleración, proceso automático efectuado por el software SeismoSignal V 4.3.0.

La forma poco alineada al eje de las abscisas se debe a la irregularidad de las aceleraciones, debido a que se trata de un sismo real y no uno sintético el que se utilizó para el análisis.

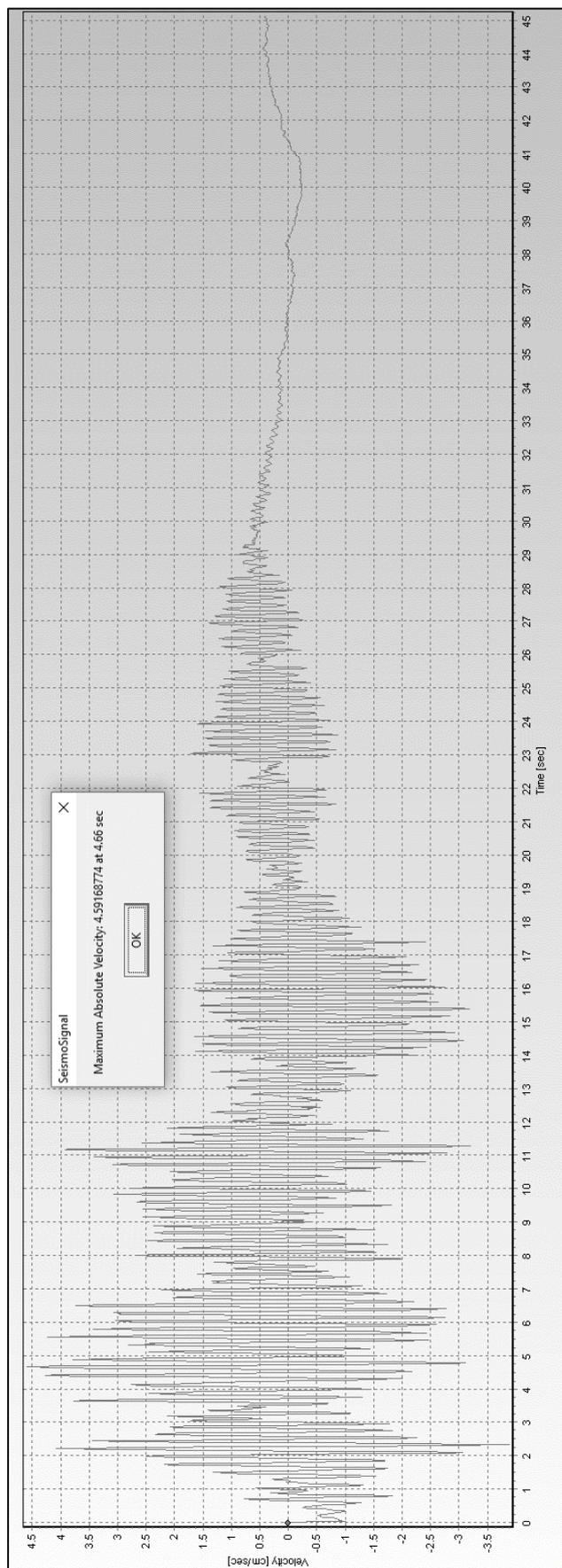


Figura 088: Velocidades obtenidas para el tercer nivel.
Fuente: Propia

La siguiente imagen pertenece al gráfico resultante de la integración de las velocidades que se calcularon integrando las aceleraciones que capturó el sensor ADXL335 colocado en el Tercer Nivel del modelo experimental.

La forma poco alineada al eje de las abscisas se debe a la irregularidad de las aceleraciones, debido a que se trata de un sismo real y no uno sintético el que se utilizó para el análisis, para determinar el desplazamiento máximo y su ocurrencia en la línea temporal se necesita analizar los picos y determinarlos visualmente. Para estos resultados se concluye que el desplazamiento máximo es 8.10cm y acontece en el segundo 36 del ensayo sísmico.

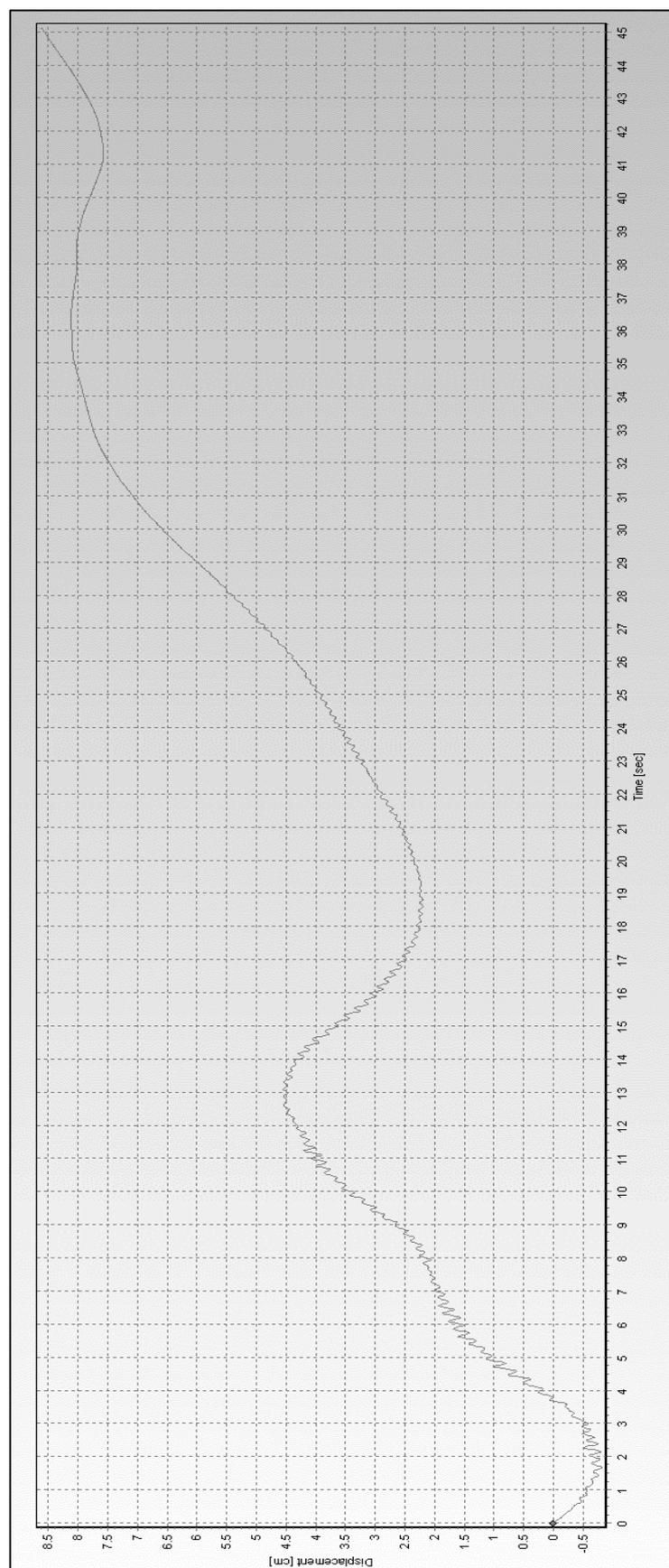


Figura 089: Desplazamientos obtenidos para el tercer nivel.
Fuente: Propia

4.2.3 Discusión de Resultados Teóricos y Experimentales:

Se observan los datos teóricos y experimentales para probar que guardan correlación entre sí, utilizando los coeficientes de correlación de Pearson.

Tabla 13
Resultados Teóricos

		Primer Nivel	Segundo Nivel	Tercer Nivel
Aceleraciones	(cm/s^2)	63.56	69.90	69.72
Velocidades	(cm/s)	0.82	0.94	0.95
Desplazamientos	(cm)	4.59	5.37	5.68

Resultados obtenidos con el software SAP2000 en el Modelo Teórico.

Fuente: Propia

Tabla 14
Resultados Experimentales

		Primer Nivel	Segundo Nivel	Tercer Nivel
Aceleraciones	(cm/s^2)	108.23	118.63	132.04
Velocidades	(cm/s)	2.67	4.29	4.59
Desplazamientos	(cm)	6.51	7.40	8.10

Resultados obtenidos con el software SeismSignal del Modelo Experimental.

Fuente: Propia

Tabla 15
Coefficientes de correlación Pearson obtenidos

	Aceleraciones		Velocidades		Desplazamientos	
	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental
1° Nivel	63.56	108.23	0.82	2.67	4.59	6.51
2° Nivel	69.9	118.63	0.94	4.29	5.37	7.4
3° Nivel	69.72	132.04	0.95	4.59	5.68	8.10
Coefficiente Pearson R	0.81306822		0.99706982		0.98470789	

Resultados correspondientes a los Modelos Teóricos y Experimentales.

Fuente: Propia

Para determinar si existe una correlación entre los datos obtenidos se toma los parámetros establecidos siguientes:

Tabla 16

Intervalos de Coeficientes de Correlación de Pearson

$R = -1$	Correlación inversa perfecta
$-1 < R < 0$	Correlación inversa
$R = 0$	No hay correlación
$0 < R < 1$	Correlación Directa
$R = 1$	Correlación Directa Perfecta

Recuperado de: https://www.uv.es/webgid/Descriptiva/31_coeficiente_de_pearson.html

De los coeficientes de correlación de Pearson mencionados en la tabla anterior concluimos que, para los resultados obtenidos en el modelo Teórico y Experimental; las Aceleraciones, Velocidades y Desplazamientos guardan correlación entre sí, pero son diferentes, comprobando que la hipótesis es correcta.

V CONCLUSIONES

Primera: En la elaboración del sistema mecánico se tuvo problemas para lograr concetricidad entre el eje del husillo y el eje de ambos motores.

Segunda: Durante la replicación de movimiento sísmico basado en acelerogramas existe un desfase de tiempo entre la orden enviada del ordenador hacia la placa Arduino Mega, esto se debe a que la velocidad del ordenador no es la suficiente para procesar de manera inmediata la totalidad de líneas de código en el proceso de compilación, así como en su reproducción.

Tercera: Durante el proceso de adquisición de señales, la velocidad de procesamiento del ordenador puede significar un retraso en la ejecución del programa Matlab al momento de ejecutar las líneas de código encargadas de la captura de señales.

Cuarta: Durante la implementación de sensores ADXL335 en el modelo experimental para la obtención de aceleraciones se debe tener especial cuidado en que el eje X del este en el mismo sentido que la dirección de movimiento, es imperante la precisión en el momento de su colocación.

Quinto: Las aceleraciones, velocidades y desplazamientos para obtenidas entre un modelo estructural experimental y uno teórico en sus diferentes niveles o pisos, distan mucho de ser iguales, es posible que el factor anisotrópico que conlleva la madera balsa y demás imperfecciones relacionados a la precisión estuvieran presentes.

Sexto: En la emulación de los acelerogramas de la onda senoidal, onda senoidal de diferentes amplitudes y de un sismo real, se probó estadísticamente por el Método del valor crítico y el Método del p -valor que los datos de entrada y los datos de salida son iguales.

VI RECOMENDACIONES

Primera: Recomiendo realizar ensayos con modelos estructurales experimentales con propiedades mecánicas poco variables, ya que la madera balsa no siempre presentará físicamente las propiedades teóricas que se le atribuyen.

Segunda: Recomiendo mejorar el sistema de sujeción de la plataforma con el actuador mecánico responsable del movimiento sísmico, para evitar movimiento ortogonal a la dirección del movimiento, así como vibraciones que puedan ocasionar interferencia en la exactitud de captura de datos de responsabilidad de los acelerómetros ADXL335.

Tercera: Recomiendo mejorar el sistema de sujeción de la mesa vibratoria a una superficie fija y así evitar posible interferencia por vibración perpendicular a las señales capturadas con los sensores ADXL335, así como precisión al fijar la dirección de este sensor a la superficie de contacto, ya que deberá tener el mismo sentido que el movimiento de excitación sísmica.

Cuarta: Recomiendo implementar una interfaz que facilite la rápida captura de datos en cuanto inicie el movimiento de los motores responsables del movimiento sísmico emulado, y así no depender de la habilidad del ejecutor y la rapidez de sus reflejos para capturar los datos en tiempo real.

Quinta: Recomiendo realizar un contraste estadístico con datos obtenidos de una mesa vibratoria calibrada.

Sexta: Recomiendo poner en funcionamiento la Mesa Vibratoria de la marca Quanser que posee la Escuela Profesional de Ingeniería Civil en el Laboratorio de Estructuras.

VII REFERENCIAS

- Aruhuanca, C. (2016). *Análisis del Comportamiento Dinámico en Estructuras a Escala Reducida Empleando Mesa Vibratoria Diseñada y Fabricada en la UNA Puno*. Universidad Nacional del Altiplano, Perú.
- Barbat, A. & Oller, S. (1998). *Conceptos de cálculo de estructuras en las normativas de diseño sismorresistente*. España: Editor A.H. Barbat
- Barnes, J. (2012). *Seismic modeling with an Earthquake Shake Table (Tesis de Bachelor of Science)*. Linfield College, United States.
- Brown, S. (2007). *Seismic analysis and shake table modeling: Using a shake table for building analysis (Tesis de Master of Building Science)*. University of Southern California, United States.
- Carrillo, J. (2013) *Evaluación del Diseño de una Pequeña Mesa Vibratoria para Ensayos de Ingeniería Sismo-Resistente*. Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- Cassano, A. (2009) *Análisis de Estructuras Bajo Acciones Dinámicas*. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- García, L. (1998). *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Colombia: Universidad de los Andes.
- Goytia, I. & Villanueva, R. (2001). *Texto Guía de Ingeniería Antisísmica*. Recuperado de: <https://www.udocz.com/read/texto-guia-de-ingenieria-antisismica-por-ivan-richard-goytia-torrez>
- Lázaro, L. (2015). *Ensayo a escala de edificio de dos alturas sometido a desplazamientos horizontales (Tesis de Máster)*. Escola de Camins, España.

- Mojiri, S. (2013). *Shake table seismic performance assessment and fragility analysis of lightly reinforced concrete block shear walls (Tesis de Master of Applied Science)*, McMaster University, Canada.
- Muhlenkamp, M. (1997). *Analysis, design, and construction of a shaking table facility (Tesis de Master of Science)*. Rice University, United States.
- Romero, K. (2016). *Implementación de una mesa vibratoria para el análisis dinámico de estructuras civiles a escala en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato (Tesis de pregrado)*. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- Uribe, J. (1991) *Análisis de Estructuras*. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

ANEXOS

1. CAPTURA DE SEÑALES:

Instalar el software de laboratorio de matrices *MATLAB R2017b* o superior que trae consigo los permisos necesarios de Windows para su ejecución, a diferencia de versiones anteriores.

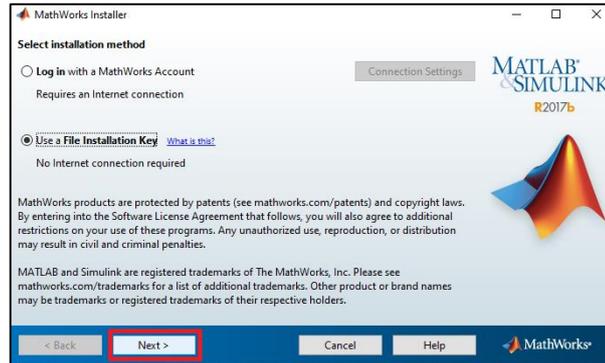


Figura 090: Inserción de licencia de software para finalizar instalación.
Fuente: Propia

Se recomienda utilizar una versión con licencia adquirida de *MathWorks®*, hasta este punto se da por supuesta la instalación de *MATLAB R2017b*.

Instalar la extensión para Arduino mediante la opción “Add-Ons”, no olvidar Ejecutar como administrador el software *MATLAB R2017b*.

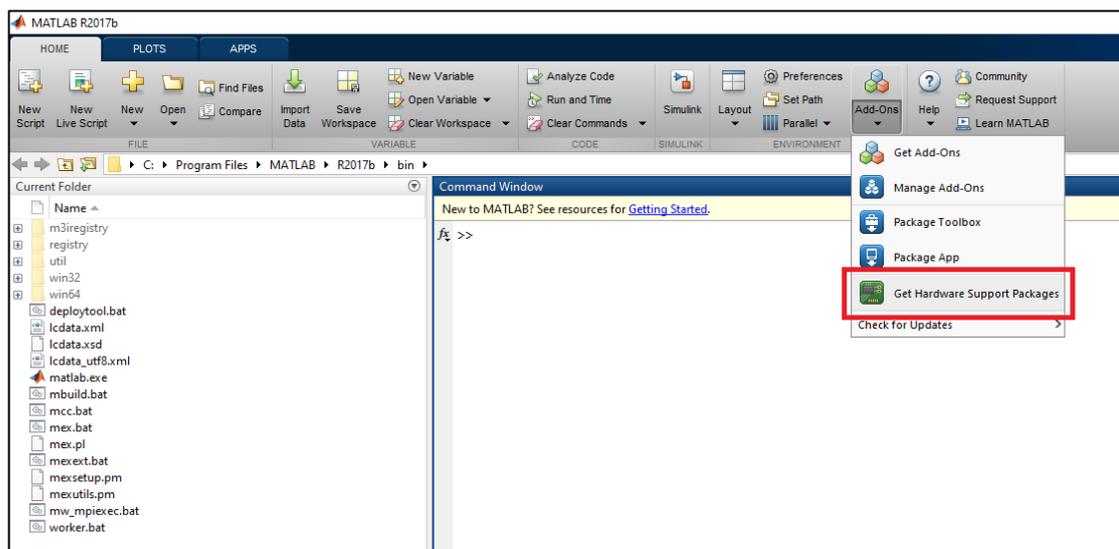


Figura 091: Instalación de la extensión para Arduino.
Fuente: Propia

Una vez desplegado el menú Add-Ons seleccionar la opción “Get Hardware Support Packages”.

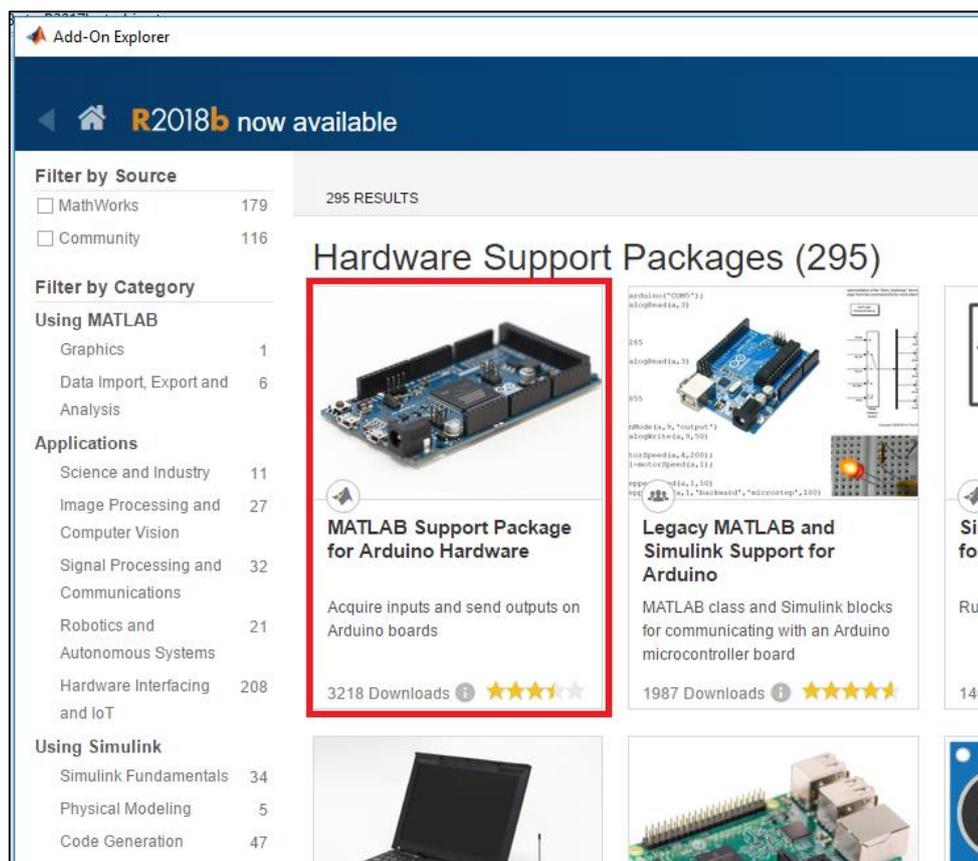


Figura 092: Explorador de Extensiones.
Fuente: Propia

Dentro de esta ventana seleccionar la opción “MATLAB Support Package for Arduino Hardware”.



Figura 093: Instalación de la extensión para Arduino.
Fuente: Propia

Inmediatamente se le pedirá insertar la cuenta que previamente debió crear en la página de *MathWorks*®: <https://la.mathworks.com/mwaccount/register> y una vez registrada su cuenta deberá abrir el e-mail de confirmación.

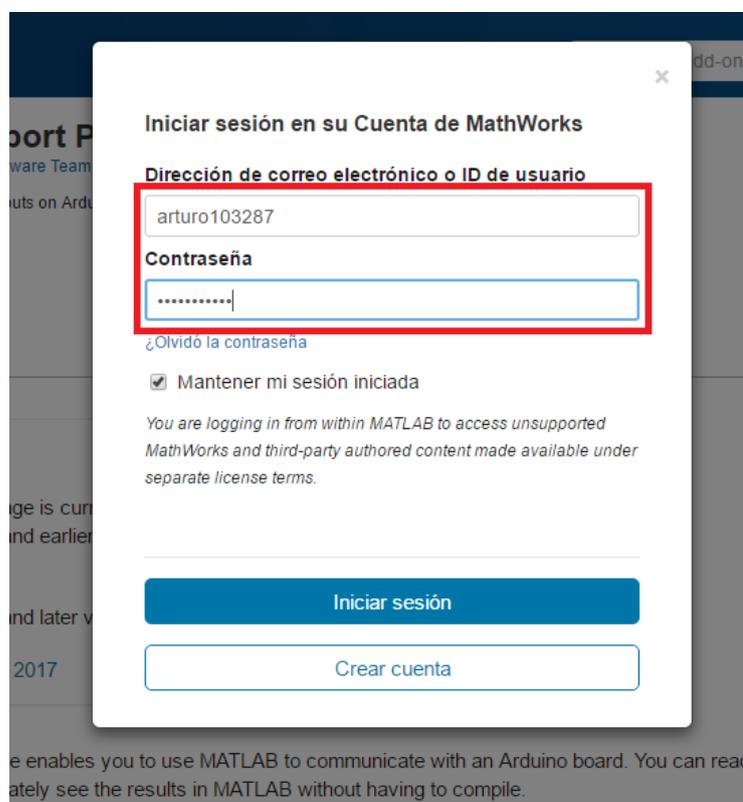


Figura 094: Inicio de sesión en *MathWorks*®
Fuente: Propia

Dar los permisos necesarios para su instalación, la instalación es intuitiva y no presenta mayor grado de complejidad.

Una vez instalada la extensión para Arduino, copiar el archivo dentro del folder contenido en la siguiente dirección:

C: \Users \“NombreDeUsuarioDeWindows”\Documents\MATLAB

Esto con la finalidad de que el archivo esté enlazado con la librería de programas de *MATLAB R2017b*, el archivo se puede generar a partir de una extensión “.m”, esto se logra copiando el siguiente código dentro de un Bloc de notas y guardándolo con la extensión antes mencionada.

```

close all
clear all
clc
% Captura de aceleraciones en tiempo real con Arduino
% TESIS 2018
%% Apertura del serie (COM)
% borrar previos
delete(instrfind({'Port'},{'COM3'}));
% crear objeto serie
s = serial('COM3','BaudRate',9600,'Terminator','CR/LF');
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
% abrir puerto
fopen(s);
%% Preparar medida
% parámetros de medidas
tmax = 46; % tiempo de captura en s
rate = 50; % resultado experimental (comprobar)
% preparar la figura
f = figure('Name','Captura');
a = axes('XLim',[0 tmax],'YLim',[0.5 2.5]);
l1 = line(nan,nan,'Color','r','LineWidth',1);
l2 = line(nan,nan,'Color','b','LineWidth',1);
l3 = line(nan,nan,'Color','black','LineWidth',1);
l4 = line(nan,nan,'Color','c','LineWidth',1);
l5 = line(nan,nan,'Color','y','LineWidth',1);
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('aceleracion (m/s^2)')
title('Captura de aceleraciones en tiempo real con Arduino')
grid on
hold on
%% Bucle
% inicializar
v1 = zeros(1,tmax*rate);
v2 = zeros(1,tmax*rate);
v3 = zeros(1,tmax*rate);
v4 = zeros(1,tmax*rate);
v5 = zeros(1,tmax*rate);
i = 1;
t = 0;
% ejecutar bucle cronometrado
tic
while t<tmax
t = 0.02;
% leer del puerto serie
a = fscanf(s,'%d,%d,%d,%d,%d');
v1(i)=a(1)*5/1024;
v2(i)=a(2)*5/1024;
v3(i)=a(3)*5/1024;
v4(i)=a(4)*5/1024;
v5(i)=a(4)*5/1024;
% dibujar en la figura
x = linspace(0,i/rate,i);
set(l1,'YData',v1(1:i),'XData',x);
set(l2,'YData',v2(1:i),'XData',x);
set(l3,'YData',v3(1:i),'XData',x);
set(l4,'YData',v4(1:i),'XData',x);
set(l5,'YData',v5(1:i),'XData',x);
drawnow
% seguir
i = i+1;
end
% resultado del cronometro
clc;
fprintf('%g s de captura a %g cap/s \n',t,i/t);
%% Limpiar la escena del crimen
fclose(s);
delete(s);
clear all;

```

Se guarda las líneas de código dentro de esta dirección y si ya se posee el archivo solamente se copia en dicha dirección el archivo. El archivo no debe tener la letra “ñ” contenida en su nombre.

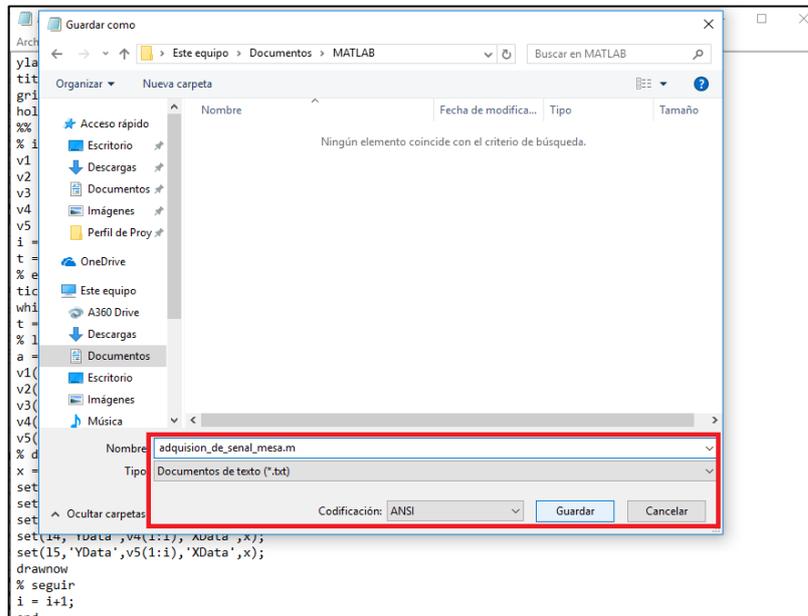


Figura 095: Cómo generar el archivo de captura de datos.
Fuente: Propia

Una vez cargado nuestro archivo procedemos a modificar a nuestro gusto las siguientes líneas de código:

```

Editor - C:\Users\ARTURO\Documents\MATLAB\adquisicion_de_senal_mesa.m
adquisicion_de_senal_mesa.m
This file can be opened as a Live Script. For more information, see Creating Live Scripts.
11 warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
12 %abrir puerto
13 fopen(s);
14 %% Preparar medida
15 % parámetros de medidas
16 tmax = 46; % tiempo de captura en s
17 rate = 50; % resultado experimental (comprobar)
18 % preparar la figura
19 f = figure('Name','Captura');
20 a = axes('XLim',[0 tmax],'YLim',[0.5 2.5]);

30 hold on
31 %% Bucle
32 % inicializar
33 v1 = zeros(1,tmax*rate);
34 v2 = zeros(1,tmax*rate);
35 v3 = zeros(1,tmax*rate);
36 v4 = zeros(1,tmax*rate);
37 v5 = zeros(1,tmax*rate);
38 i = 1;
39 t = 0;
40 % ejecutar bucle cronometrado
41 tic
42 while t<tmax
43     t = 0.02;
44     % leer del puerto serie
45     a = fscanf(s,'%d,%d,%d,%d,%d');
46     v1(i)=a(1)*5/1024;
47     v2(i)=a(2)*5/1024;
    
```

Figura 096: tmax, rate y t.
Fuente: Propia

En la línea de código 16 ($t_{max} = 46$), definimos el tiempo máximo de captura de datos, en la línea 17 ($rate = 50$) se define la cantidad de capturas por segundo, en este caso coincidentemente el valor es 50, ya que en un 1s tenemos 50 intervalos de 0.02s (línea 43: $t = 0.02$);).

Una vez definido el tiempo total de captura y los intervalos en los que se desea obtener estos datos (aceleraciones), se procede a dar en el botón “Run”:

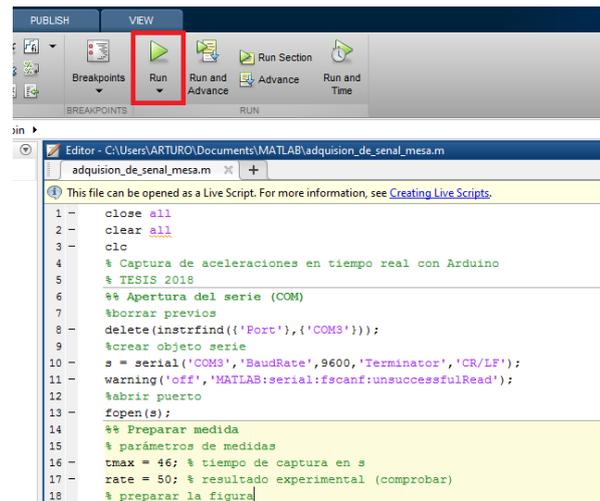


Figura 097: Proceder a ejecutar el archivo adquirente de señales.

Fuente: Propia

IMPORTANTE: Antes de dar en el botón “Run” conectar la placa Arduino Uno interconectada con los sensores ADXL335 al ordenador mediante un puerto USB.

Una vez puesto en marcha el programa se abrirá una ventana en la cual se podrá observar la captura de señales (aceleraciones).

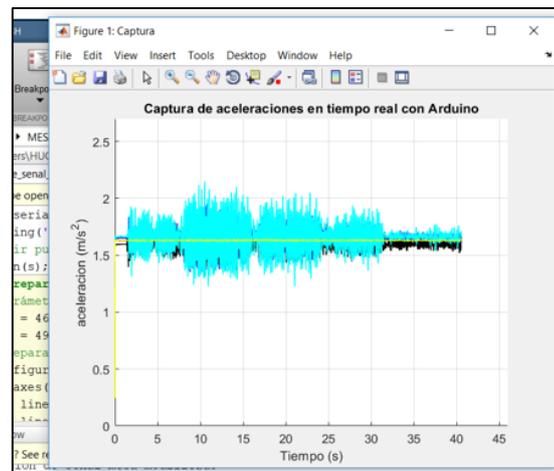


Figura 098: Captura de señales.

Fuente: Propia

Seguidamente se procede a retirar las señales guardadas para su posterior estudio, las señales guardadas se presentan de forma matricial, para lo cual se puede copiar y llevar a una hoja Excel para posteriormente transponer esa matriz.

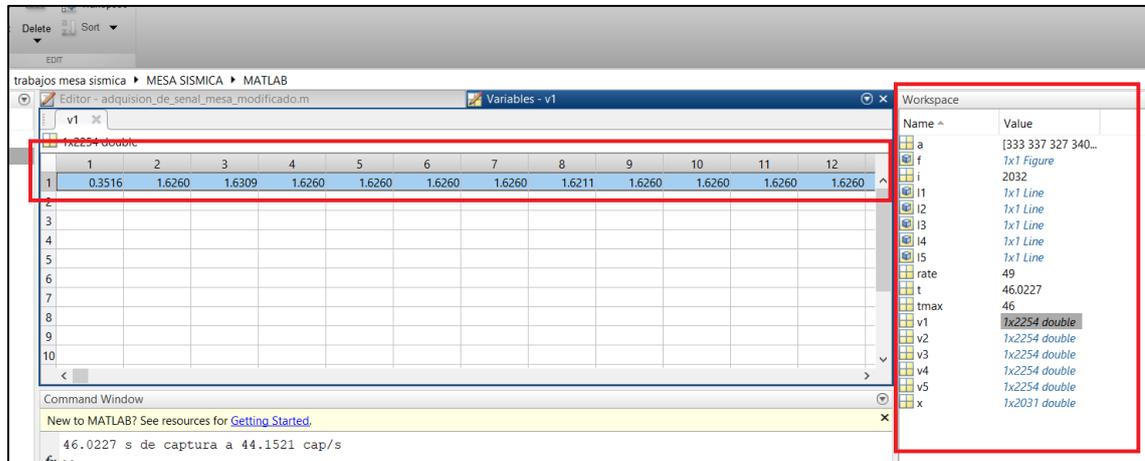


Figura 099: Matriz de datos obtenida.

Fuente: Propia

Como en la figura anterior se puede observar, se tiene las señales obtenidas mediante el uso del primer sensor ADXL335, en la columna “Workspace” se observa de donde se extrajeron dichos datos (v1).

1. REPRODUCCIÓN DE ACELEROGRAMAS:

Instalar el software Arduino IDE y configurar los puertos, la instalación no debe presentar mayor dificultad debido a la ingente información al respecto en internet.

Seguidamente se detallará el uso de la interfaz del software y el cambio de acelerogramas a la plataforma para su posterior reproducción.

El programa encargado del movimiento de los motores se presenta de la siguiente forma, se copia la siguiente programación dentro de la interfaz del programa, solamente se modifican las líneas de código que están sombreadas con color gris:

```
// Estructura sistema 31 mayo 1970 código 7058 – Tesis Arturo 2018
```

```
int RPWM = 5;
int LPWM = 6;
// Declarar pines utilizados en arduino mega
void setup() {
  // pines de salida
  pinMode(RPWM, OUTPUT);
  pinMode(LPWM, OUTPUT);

  analogWrite(RPWM,0);
  analogWrite(LPWM,0);
  delay(2000);
  // Espera de inicio
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,14); delay(20);
  analogWrite(RPWM,13); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,2); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,8); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,4); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,11); delay(20);
  analogWrite(RPWM,1); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,3); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,11); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,2); delay(20);
  analogWrite(RPWM,13); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,10); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,3); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,7); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,14); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,26); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,32); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,20); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,21); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,24); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,10); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,1); delay(20);
  analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,17); delay(20);
```

2234 líneas de programación restantes

```
analogWrite(RPWM,6); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
//fin del movimiento
analogWrite(RPWM,0);
analogWrite(LPWM,0);
delay(2000);
}
void loop() {
  // esta fue la secuencia repetitiva
}
```

Donde RPWM indica las aceleraciones positivas y LPWM las aceleraciones negativas, se puede utilizar algunos atajos como colocar la programación a cambiar (sólo las líneas de código sombreadas en gris) en una hoja Excel y mediante filtros o formulas condicionantes copiar las aceleraciones deseadas dentro de los corchetes.

Dentro de la casilla sombreada color celeste las aceleraciones positivas mientras que para la casilla sombreada color rojo las negativas.

```
analogWrite(RPWM,2); analogWrite(LPWM,0); delay(20);
analogWrite(RPWM,0); analogWrite(LPWM,8); delay(20);
```

Importante recordar que no puede haber dos valores numéricos dentro de una misma fila, a excepción del cero “0”.

Un atajo muy útil es el de copiar en una hoja Excel de la siguiente forma los valores deseados, como se puede observar en el 0.48s la aceleración 3.760cm/s^2 es positiva entonces se enlaza a la columna “D” con la condicionante =SI(B1>=0;B1;0). Para la aceleración “0” sigue siendo “0” tanto para la columna “D” y “G”. Mientras que la aceleración -3.760cm/s^2 se enlaza a la columna “G” con la condicionante =ABS(SI(B3<=0;B3;0)).

Todo esto mientras se observa el intervalo de tiempo de 20 milisegundos (delay(20)) constante entre aceleraciones.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0.48	3.760	analogWrite(RPWM,	3.76);	analogWrite(LPWM,	0.00);	delay(20);		
2	0.5	0.000	analogWrite(RPWM,	0.00);	analogWrite(LPWM,	0.00);	delay(20);		
3	0.52	-3.760	analogWrite(RPWM,	0.00);	analogWrite(LPWM,	3.76);	delay(20);		

Figura 100: Atajo para programar pulsaciones en Excel.
Fuente: Propia

Seguido a esto se copia todos estos valores a un bloc de notas para luego volver a copiar a un archivo Word, esto con la finalidad de perder el formato columna que brinda una hoja de cálculo en Excel.

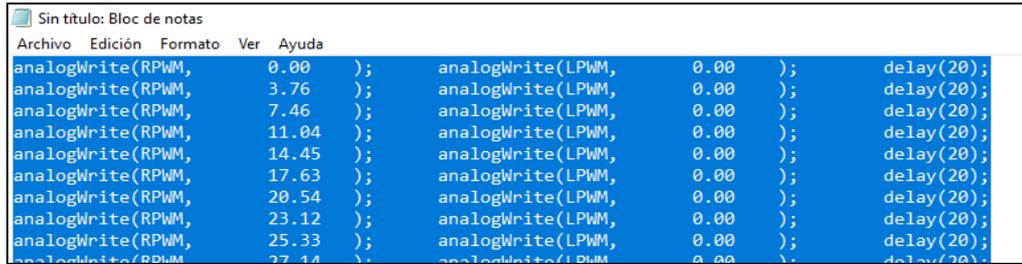


Figura 101: Eliminación de formato Excel con bloc de notas.
Fuente: Propia

Luego se borra los espacios que no permitan compilar la programación en Arduino de la siguiente forma, utilizando la opción “Reemplazar” de Word.

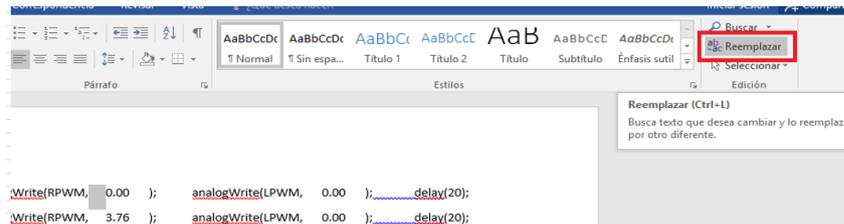


Figura 102: Eliminación de espacios con Word.
Fuente: Propia.

Una vez eliminados esos espacios se procede a copiar la programación a Arduino para proceder a compilar y ejecutar las ordenes a los motores, previamente conectada la placa Arduino uno ordenador mediante cable USB.

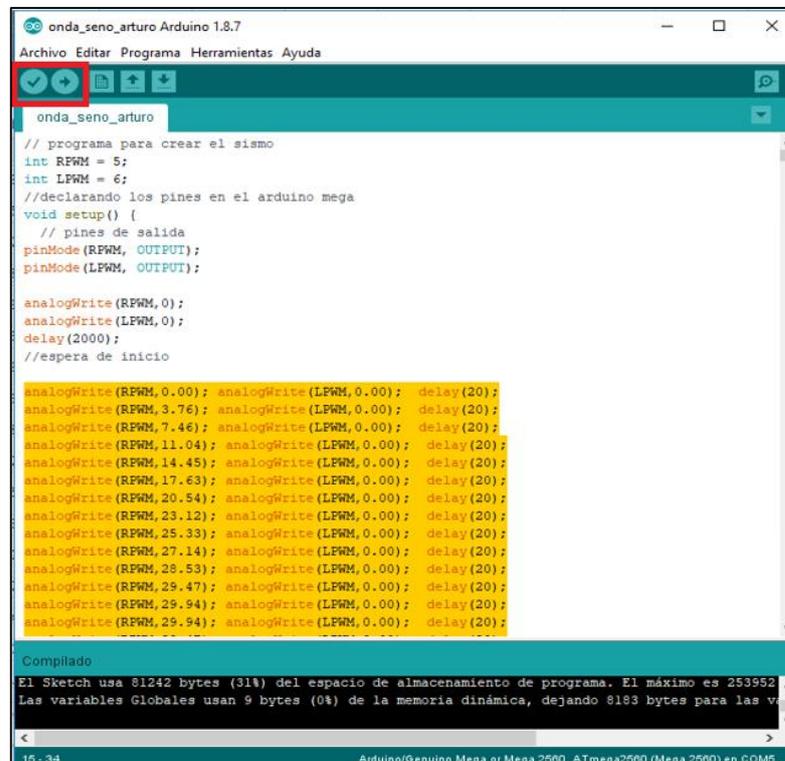
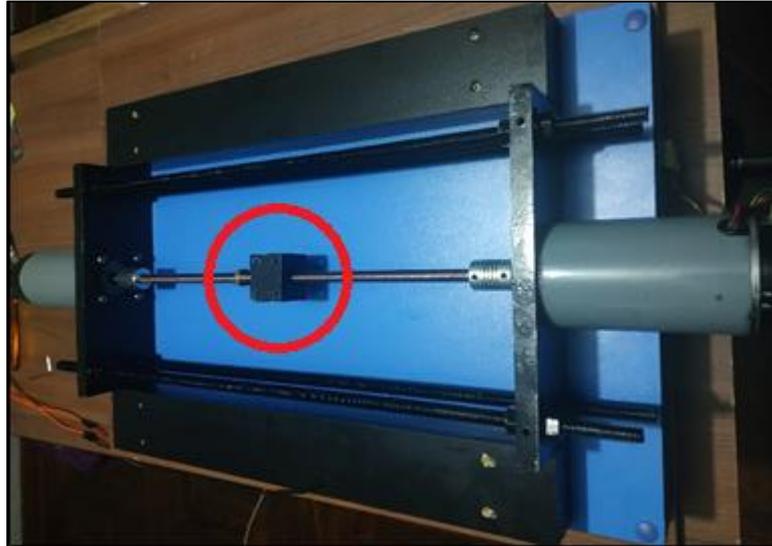


Figura 103: Compilación y ejecución de la programación en Arduino Uno.
Fuente: Propia

La compilación se ejecuta con el botón en forma de “aspa” mientras que la ejecución del programa se hace con el botón en forma de flecha direccionada para la derecha “→”.

IMPORTANTE: Luego de replicar el movimiento sísmico y capturada la señal objeto de estudio en los diferentes niveles de la estructura a escala se recomienda manualmente volver a colocar la camisa en el centro de la amplitud de movimiento de la mesa vibratoria.



*Figura 104: Vista de la camisa encargada de transmitir el movimiento
Fuente: Propia*

Esto con la finalidad de que en un eventual futuro no este comprometido a daños la camisa junto al husillo debido a que la amplitud de movimiento de la mesa sobrepase sus límites ya determinados por las placas de acero.