

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

" Diseño y construcción de un equipo de laboratorio para el estudio de
vibraciones en edificaciones."

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera Mecánica

Presentado por:

Andrea Mariela Dávila Campos

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mi madre, ya que todo lo que soy y lo que sé, se lo debo a ella; a mi familia, profesores y amigos.

En especial al Ing. José Hidalgo y la Profesora Tania Crespo, por su ayuda y consejos que siempre estaban ahí cuando los necesitaba; a Freddy, Lorena, Manuel y Jonathan por su ayuda.

A mi abuelo y mis tías con quienes siempre he contado.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia.

DECLARACIÓN EXPRESA

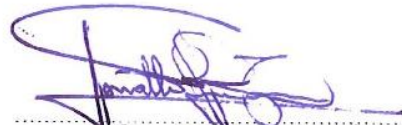
"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Andrea Mariela Dávila Campos* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"


Andrea Mariela Dávila Campos

EVALUADORES



MSc. Jorge Marcial
PROFESOR DE LA MATERIA



MSc. Jonathan León
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En la actualidad los estudiantes de la carrera Ingeniería Mecánica no poseen las herramientas para medir las vibraciones de sistemas reales, en consideración a esta necesidad el trabajo integrador que se presenta consistió en la fabricación de un prototipo de bajo costo que permita medir vibraciones en edificaciones con el fin de analizar modelos reales sometidos a excitaciones en un ambiente controlado, además de su importancia en los fenómenos de resonancia.

Para la construcción del prototipo se elaboraron tres modelos de estudio, el modelo matemático, el modelo en ANSYS y el modelo físico de sistemas de 1 y 2 grados de libertad. Con el modelo matemático se obtuvieron las ecuaciones que describen a los sistemas y así obtener las frecuencias naturales teóricas, luego se elaboró el modelo en ANSYS con el objetivo de establecer un rango de valores de frecuencias dentro de los cuales se realizaron las pruebas en el shaker con los modelos físicos a escala.

Se logró observar y graficar los datos obtenidos para su posterior discusión con respecto al fenómeno de resonancia y el amortiguamiento pasivo. Para la elaboración del prototipo se realizó un diseño portátil con sensores de medición tales como extensómetros y acelerómetros para la obtención de mediciones de deformación y aceleración respectivamente, por último; la adquisición de datos se lo realizó con una tarjeta Arduino, luego se lo procesó con Matlab, las frecuencias de resonancia registradas fueron muy cercanas a las obtenidas mediante los cálculos matemáticos; además se realizaron pruebas variando el amortiguamiento del sistema, esto se lo hizo aumentando la masa de los dos modelos, posteriormente; se generó un impulso inicial a los sistemas para registrar simultáneamente deformación unitaria y aceleración vs. tiempo.

Complementariamente, se redactó la guía de laboratorio por medio de la cual podrán utilizar el dispositivo y obtener resultados de la respuesta de los diferentes sistemas y así poner en práctica lo aprendido en el aula de clases.

Para finalizar, se realizó el diseño y selección de los elementos para la construcción de una mesa vibratoria, para que en un futuro pueda ser fabricada y así los estudiantes tengan la facilidad de realizar sus prácticas.

Palabras Clave: vibraciones, frecuencias naturales, diseño.

ABSTRACT

At present, the students of Mechanical Engineering don't have the necessary tools to measure vibrations of real systems. Considering this event, the integrating project presented consisted on the manufacture of a low cost prototype that allows the measuring of vibrations in buildings with the purpose of analyzing real models subjected to excitations in a controlled environment, in addition to their importance in the resonance phenomena.

For the construction of this prototype, three study models were elaborated: the mathematical model, the model in ANSYS and the physical model of 1- 2 degrees of freedom systems. The mathematical model allowed us to obtain the equations which describe the systems and thus obtain the theoretical natural frequencies. Then, the model was analyzed in ANSYS with the objective of establishing a range of values of frequencies within which the tests were performed in the shaker with physical models to scale.

It was possible to observe and graph the data obtained for further discussion regarding the phenomenon of resonance and passive damping. For the elaboration of the prototype, a portable design was made with measurement sensors such as extensometers and accelerometers to obtain measurements of deformation and acceleration respectively. Finally; the data acquisition was done with an Arduino card, then it was processed with Matlab, the recorded resonance frequencies were very close to those obtained by mathematical calculations. In addition, tests were performed varying the damping of the system, this was done by increasing the mass of the two models. Later, an initial impulse was generated for the systems to simultaneously record unit deformation and acceleration vs. weather.

Furthermore, the laboratory guide was written by means of which they will be able to use the device and obtain results of the response of the different systems and thus put into practice what they have learned in classroom.

Finally, the design and selection of the elements for the construction of a vibrating table was carried out, so that in the future it could be manufactured, and the students could have the facility to do their practices.

Keywords: *vibrations, natural frequencies, design.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Partes elementales de un Sistema vibratorio	4
1.4.2 Grados de libertad	5
1.4.3 Clasificación de las Vibraciones	6
1.4.3.1 Vibración libre	6
1.4.3.2 Vibración Forzada	6
1.4.3.3 Tipos de amortiguamiento	7
1.4.3.4 Resonancia	8
1.4.4 Dinámica estructural	8
1.4.4.1 Modos de vibración de un Edificio	8
1.5 Equipos para medir vibraciones	9
1.5.1 Tipos de Sensores	10
1.5.1.1 Sensor de desplazamiento	10

1.5.1.2	Sensor de Aceleración	10
1.6	Equipos para adquisición de datos	13
1.6.1	Tipos de tarjetas de adquisición de datos	13
1.6.1.1	Tarjeta Arduino	13
1.6.1.2	Tarjeta de adquisición de datos	13
1.7	Mesas Vibratorias	14
1.7.1	Alternativas de excitación	15
CAPÍTULO 2		18
2.	Metodología	18
2.1	Diseño del prototipo del equipo	18
2.1.1	Procedimiento esquemático	18
2.1.2	Requerimientos de diseño	19
2.1.2.1	Costo	19
2.1.2.2	Espacio	20
2.1.2.3	Peso	20
2.1.2.4	Disponibilidad	20
2.1.2.5	Fácil funcionamiento	20
2.1.3	Identificación de las alternativas de diseño para el prototipo	21
2.1.4	Selección de alternativa	21
2.1.5	Diseño de forma del prototipo	24
2.1.5.1	Diseño detallado del prototipo	24
2.1.5.2	Estructura de una edificación	26
2.2	Diseño de la mesa vibratoria	27
2.2.1	Procedimiento esquemático	27
2.2.2	Identificación de las alternativas de diseño	29
2.2.3	Requerimientos de diseño	29
2.2.3.1	Costo	29

2.2.3.2	Espacio	30
2.2.3.3	Peso	30
2.2.4	Identificación de las alternativas de diseño para la mesa vibratoria	30
2.2.5	Selección de alternativa	30
2.2.6	Diseño de forma de la mesa vibratoria	33
2.2.6.1	Diseño de selección de los elementos de la mesa vibratoria	33
2.2.6.2	Diseño de diámetro mínimo para la manivela	35
2.3	Experimentación	37
2.3.1	Descripción del shaker	37
2.3.1.1	Datos técnicos	39
2.3.2	Comprobación del Prototipo	39
2.3.3	Ecuaciones del movimiento del sistema	40
2.3.3.1	Constante elástica del sistema	43
2.3.4	Prototipo del equipo	44
2.3.5	Modelo matemático del sistema en Simulink	45
2.3.5.1	Algoritmo para graficar datos obtenidos del prototipo	46
CAPÍTULO 3		47
3.	Resultados y Análisis	47
3.1	Resultados	47
3.1.1	Resultados obtenidos para Modelo de 1 GDL	48
3.1.1.1	Frecuencia natural del sistema	48
3.1.1.2	Frecuencia de resonancia	48
3.1.2	Resultados obtenidos para modelo de 2 GDL	51
3.1.2.1	Frecuencia natural del sistema 2 GDL	51
3.1.2.2	Frecuencia de resonancia (1er y 2do modo)	52
3.1.2.3	Amortiguamiento del sistema	55
CAPÍTULO 4		57

4. Conclusiones y Recomendaciones	57
4.1 Conclusiones	57
4.2 Recomendaciones	58

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GDL	Grados de libertad
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
FIMCBOR	Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánica y Recursos naturales

SIMBOLOGÍA

Hz	Hertz
k	Constante elástica
E	Módulo de Young
ω	Frecuencia angular [rad/s]
I	Momento de Inercia de área
c	constante de amortiguación
F_0	Amplitud de fuerza
ξ	Relación de amortiguamiento

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Partes de una onda	4
Figura 1. 2: Partes de un sistema vibratorio.	5
Figura 1. 3: Ejemplos de sistemas con 1 GDL.	5
Figura 1. 4: Movimientos amortiguados y no amortiguados.	7
Figura 1. 5: Modos de vibración de una estructura.....	9
Figura 1. 6: Equipos para medir vibraciones	10
Figura 1. 7: Partes de un acelerómetro	12
Figura 1. 8: Modelo de una tarjeta Arduino	13
Figura 1. 9: Modelo de una tarjeta de adquisición de datos.	14
Figura 1. 10: Partes principales de una mesa vibratoria.....	14
Figura 2. 1: Procedimiento esquemático de diseño.	19
Figura 2. 2: Diseño de forma del equipo.....	24
Figura 2. 3: Diagrama del equipo montado en la estructura	25
Figura 2. 4: Diseño de forma de la estructura para 1GDL	27
Figura 2. 5: Equipo generador de vibraciones	27
Figura 2. 6: Procedimiento esquemático de diseño para la mesa vibratoria.	28
Figura 2. 7: Esquema general de una mesa vibratoria	29
Figura 2. 8: Diseño de forma del sistema	33
Figura 2. 9: Vista 3D de la mesa vibratoria.....	35
Figura 2. 10: Prueba de durabilidad en un shaker.....	38
Figura 2. 11: Controlador del Shaker.....	38
Figura 2. 12: Modelo Matemático para 1 GDL.....	40
Figura 2. 13: Modelo Matemático para 2 GDL.....	41
Figura 2. 14: Modelo utilizado para cálculo de la constante de resorte	44
Figura 2. 15: Prueba del prototipo en estructura	45
Figura 2. 16: Diagrama de bloque del sistema de 1 GDL.....	45
Figura 2. 17: Diagrama de bloque del sistema de 2 GDL.....	46
Figura 3. 1: Estructuras de 1 y 2 GDL montadas en el shaker.	48
Figura 3. 2: Modelo en ANSYS (1 GDL).....	48
Figura 3. 3: Gráficas para 1 GDL.....	50
Figura 3. 4: Deformación Unitaria vs. Tiempo para 1GDL.....	51
Figura 3. 5: Modelo en ANSYS (2GDL).....	52

Figura 3. 6: Gráficas para 2 GDL-1er modo	52
Figura 3. 7: Gráficas para 2 GDL-2do modo.....	54
Figura 3. 8: Deformación Unitaria vs. Tiempo para 2GDL	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1: Características de mesas vibratorias en el mundo.	15
Tabla 1. 2: Tipos de sistemas utilizados en mesas vibratorias	16
Tabla 2. 1: Alternativas de diseño para los elementos del equipo	21
Tabla 2. 2: Criterios de evaluación	21
Tabla 2. 3: Criterio de ponderación cuantitativo	22
Tabla 2. 4: Matriz de decisión para el tipo de sensor.	22
Tabla 2. 5: Matriz de decisión para el tipo de acelerómetro	23
Tabla 2. 6: Matriz de decisión para Sist. de adquisición de datos	23
Tabla 2. 7: Características de la tarjeta Arduino UNO	26
Tabla 2. 8: Alternativas de diseño	29
Tabla 2. 9: Alternativas de tipos de sistemas para la mesa vibratoria	31
Tabla 2. 10: Criterios de evaluación	31
Tabla 2. 11: Criterio de ponderación cuantitativo	31
Tabla 2. 12: Matriz de decisión para el tipo de sistema.	32
Tabla 2. 13: Matriz de decisión para el tipo de motor	32
Tabla 2. 14: Datos de las especificaciones de los límites de operación del equipo de vibración	39
Tabla 2. 15: Datos técnicos de las pletinas de acero	43
Tabla 3. 1: Calculo de frecuencias naturales del modelo	48
Tabla 3. 2: Calculo de frecuencias naturales del modelo para 2 GDL	52

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El movimiento de un cuerpo puede darse de forma simple o complicada; este movimiento puede generar vibraciones en más de una sola dirección. Si conocemos de manera básica el movimiento, se puede realizar el estudio de las vibraciones, así mismo en el diseño de edificaciones entre más conocimiento adquiramos en cuanto a la respuesta y su comportamiento de ante temblores, menor será el peligro al cual se someta la edificación; con todo esto en cuenta, se reconoce la importancia del estudio del comportamiento y las características reales de las edificaciones bajo alguna acción dinámica.

El modelo analítico de ciertas estructuras puede ser complejo, por lo que la experimentación en laboratorios de dichos modelos de las estructuras utilizando escalas reales, es la mejor forma en la que se puede realizar estos tipos de estudios. En el estudio de las vibraciones en edificaciones, se pueden realizar algunas pruebas variando el tipo de excitación bajo la cual se excite al sistema que se esté analizando; siendo éstas:

- Vibración libre
- Vibración ambiental
- Vibración forzada

Si se realizan pruebas de vibración forzada, la excitación se puede generar ya sea por actuadores mecánicos o algún otro equipo como por ejemplo una mesa vibratoria.

En la ingeniería los valores o mediciones que se registren en un análisis de vibraciones sean estos de frecuencia, aceleración, velocidad o desplazamiento; son evaluados acorde a los efectos que generen, es decir; si son o no tolerables y si se encuentran dentro de los límites permisibles.

Los análisis de vibraciones pueden realizarse mediante diversos equipos existentes en el mercado, estos varían desde el formato hasta el número de canales, sin embargo, siempre habrá un modelo que se adapte a las necesidades de ensayo o aplicación. Actualmente las versiones más avanzadas de estos dispositivos son los

que pueden registrar datos durante largos periodos, analizar múltiples variables al mismo tiempo, análisis modales, vibraciones rotacionales, etc.

En términos generales, un laboratorio debe poseer varios equipos e instrumentos en los cuales los estudiantes y profesionales puedan desarrollar investigaciones o experimentos con fines académicos o industriales.

En la docencia, los ejercicios que se realizan dentro de laboratorios son utilizados como métodos prácticos y eficaces en los procesos de enseñanza, de manera que los estudiantes puedan aprender algo nuevo mediante la experimentación o reforzar los conocimientos que adquieren en las aulas de clases.

Las universidades de prestigio alrededor del mundo poseen el respaldo de equipos e instrumentos de laboratorio, todo esto con el fin de proporcionar a los estudiantes herramientas esenciales en términos de investigación y desarrollo del conocimiento. El experimentar provee a los estudiantes la experiencia de demostrar y realizar mediciones estándares, básicas y fundamentales en sus áreas de estudio, no es necesario un equipo muy complejo, sin embargo, si es necesario contar con herramientas de calidad.

Los instrumentos para medir vibraciones en la práctica profesional, en laboratorios y en escuelas superiores; existen muchas variedades y para diferentes usos como por ejemplo en la industria para realizar los mantenimientos preventivos de las máquinas de producción. Estos instrumentos se usan para mediciones instantáneas o para comprobar el estado de los sistemas.

1.1 Descripción del problema

En la actualidad los estudiantes de ingeniería mecánica no cuentan con equipos de laboratorio con los cuáles realizar las prácticas relacionadas al estudio de los diversos tipos de vibraciones que se plantean en los contenidos teóricos, de ahí surge la necesidad de diseñar un prototipo que permita a los estudiantes poner en práctica lo aprendido en el aula de clases.

1.2 Justificación del proyecto

En la Escuela Superior Politécnica del Litoral en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción se dicta la materia Dinámica de Maquinarias a los estudiantes que siguen la carrera de Ingeniería mecánica,

en este curso se imparte una sección dedicada al estudio de las vibraciones mecánicas, esta es una materia muy importante para un ingeniero mecánico por lo que deberían contar de un Laboratorio para estudio de vibraciones dentro de la facultad, actualmente los conceptos y demás teoría se imparte sólo en el aula de clases; en esta tesis se va ampliar la importancia del estudio de vibraciones en específico al estudio del comportamiento de edificaciones bajo la acciones de la misma.

Para la realización de un experimento con un sistema real y medir las vibraciones es necesario contar con un hardware y un software adecuado, en este caso para el diseño del modelo con el uso de ANSYS (MODAL) y Matlab para el procesamiento de los datos obtenidos del prototipo, la mesa vibratoria (Shaker) y el modelo a utilizar para la edificación.

Todo esto para poder colaborar en la comprensión más completa de los diferentes medios que existen para el estudio de vibraciones, ayudando así a complementar de mejor manera la formación de los estudiantes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar un dispositivo para laboratorio de dinámica de maquinarias para estudiar las vibraciones periódicas o aleatorias en edificaciones, además de la obtención teórica y experimental de las frecuencias naturales y su importancia en fenómenos de resonancia.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Elaborar un modelo matemático de la edificación a estudiar.
- Elaborar un prototipo del equipo para el estudio de vibraciones.
- Proveer a los estudiantes de la materia Dinámica de Maquinarias una herramienta que les permita poner en práctica y a su vez reforzar lo aprendido en el aula de clases.
- Desarrollar un manual de laboratorio correspondiente a la primera práctica de laboratorio de estudio de vibraciones.

1.4 Marco teórico

En general, cualquier movimiento que en un intervalo de tiempo dado se repite es conocido como *vibraciones*, un ejemplo común puede ser la oscilación de un péndulo o el movimiento de una cuerda.

En la práctica es muy complicado evitar las vibraciones. En los sistemas mecánicos se pueden producir debido a la fabricación de los elementos, es decir, tolerancias, fricción entre los elementos o desbalances en elementos rotatorios. En ocasiones, pequeñas fuerzas pueden generar resonancia en los elementos estructurales y convertirse en una fuente de considerables vibraciones y ruidos.

En la vida diaria, las vibraciones pueden ser usadas de forma que no afecten su entorno, son usadas por ejemplo para transportar elementos, en vibraciones de hormigón, en limpieza (baños de limpieza por ultrasonido).

Los parámetros característicos de las vibraciones son: Desplazamiento, periodo, frecuencia, velocidad, aceleración.

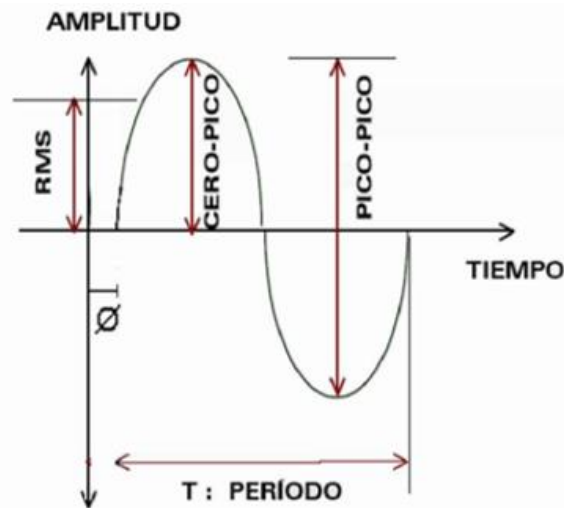


Figura 1. 1: Partes de una onda [Fuente: Elaboración propia.]

1.4.1 Partes elementales de un Sistema vibratorio

Comúnmente un sistema vibratorio incluye un elemento para almacenar energía potencial elástica (resorte), un elemento para conservar energía cinética (masa) y otro por el cual la energía sea disipada (amortiguador). (Arosemena)

En un sistema vibratorio la transformación de energía, la energía potencial en cinética y de ésta en energía potencial, de manera alterna. Si el sistema es amortiguado, parte de la energía es disipada en cada ciclo de vibración y si se desea que la vibración se mantenga en un estado estable, se le debe reemplazar por una fuente externa.

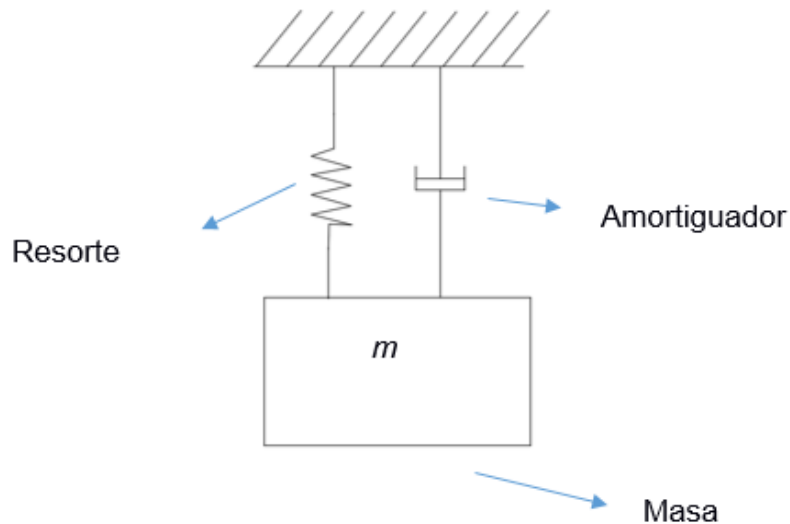


Figura 1. 2: Partes de un sistema vibratorio. [Fuente: Elaboración propia]

1.4.2 Grados de libertad

Los grados de libertad de un sistema representan el mínimo de coordenadas independientes que se necesitan para poder describir su comportamiento en cualquier instante de tiempo. Los sistemas que poseen un grado de libertad se los puede representar cómo se muestra en la figura 1.3.

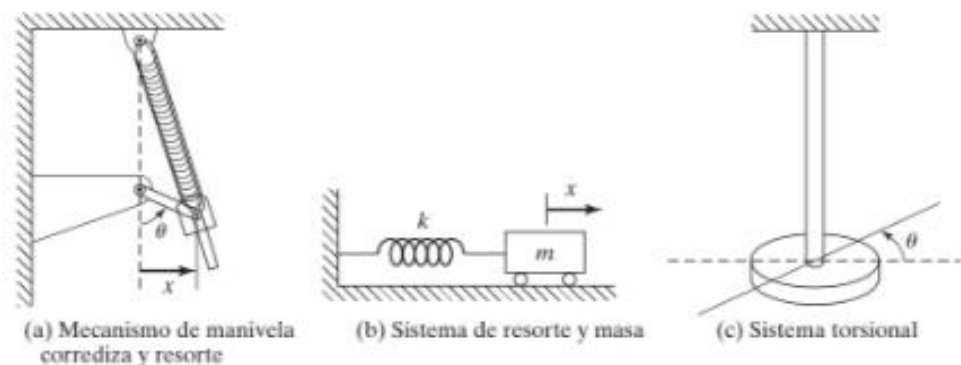


Figura 1. 3: Ejemplos de sistemas con 1 GDL. [Fuente: (Rao S. S., 2012)]

En el caso de la figura 1.3 (a) se puede escoger la coordenada θ o la coordenada X para describir el comportamiento del sistema. En la figura 1.3 (b) se puede utilizar la coordenada X . Para el sistema torsional que se muestra en la figura 1.1 (c) la coordenada θ describiría perfectamente el movimiento del sistema. (Rao S. , 2012)

Los sistemas con 2 GDL poseen dos coordenadas independientes que definen su comportamiento en cualquier instante de tiempo dado. Por lo que, se pueden generar las ecuaciones que los describen y a partir de éstas obtener las frecuencias naturales y calcular las amplitudes de vibración.

Si los elementos elásticos y los amortiguadores tienen características lineales, se puede obtener un sistema de ecuaciones diferenciales lineales simultáneas.

En el análisis de sistemas con dos o más grados de libertad la complejidad de la resolución aumenta entre más grados aumentemos al sistema, para obtener las ecuaciones de movimiento, se pueden utilizar la segunda ley de Newton o métodos energéticos basados en las ecuaciones de Lagrange.

1.4.3 Clasificación de las Vibraciones

1.4.3.1 *Vibración libre*

Este tipo de vibraciones aparecen si un sistema vibra bajo la acción de fuerzas ajenas al mismo, y cuando no existen fuerzas externas que lo exciten. Este sistema vibrará a una o más de sus frecuencias naturales o modos de vibración, que representan las propiedades del sistema dinámico que dependen de cómo está distribuida la masa y rigidez. (Rao S. , 2012)

1.4.3.2 *Vibración Forzada*

Si se ejerce una fuerza externa sobre un sistema, la vibración que se genera se conoce como vibración forzada. Existen casos cuando la frecuencia de la fuerza externa coincide con la frecuencia natural del sistema, se genera el fenómeno conocido como resonancia, y en estos casos las oscilaciones se vuelven más grandes provocando que el sistema se vuelva peligroso.

Una vibración forzada puede ser periódica, aperiódica o aleatoria. Un movimiento periódico es aquel que se repite a intervalos regulares de tiempo, mientras que, en movimientos aperiódicos o aleatorios, no existe esa repetición regular. (Rao S. , 2012)

1.4.3.3 Tipos de amortiguamiento

El amortiguamiento de un sistema vibratorio es la capacidad que posee éste para poder disipar energía. Existen algunos tipos de amortiguamiento, como:

- Amortiguamiento viscoso o de fluido: Se genera cuando un fluido se resiste a que un cuerpo lo traspase, esta resistencia depende directamente de la viscosidad del fluido y es proporcional a la velocidad de desplazamiento.
- Amortiguamiento de fricción: cuando se presenta resistencia al movimiento debido a alguna fuerza de fricción.
- Amortiguamiento estructural: Se produce debido a la fricción interna entre las partículas del material. (Rao S. , 2012)

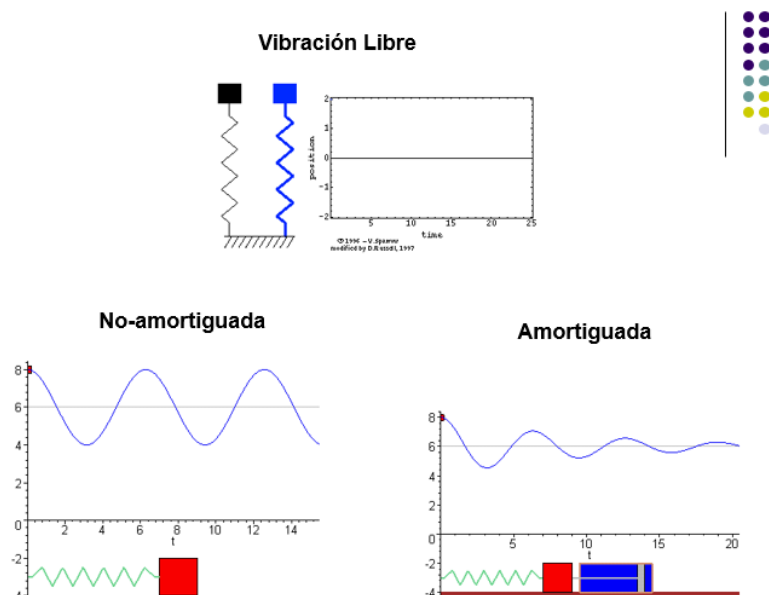


Figura 1. 4: Movimientos amortiguados y no amortiguados. [(Hurel, 2017)]

1.4.3.4 Resonancia

La resonancia se puede definir como la tendencia de un sistema a incrementar su amplitud de oscilación bajo la acción de algunas frecuencias. Si la diferencia entre la frecuencia excitadora y la frecuencia propia del sistema es grande la amplitud del mismo será mínima. Al igual que cuanto más diferentes sean las frecuencias excitadoras con las frecuencias naturales de los sistemas, se necesitará más energía para crear determinadas amplitudes de oscilación. En condición de resonancia, incluso una pequeña fuerza aplicada por el excitador puede generar grandes amplitudes de oscilación en un sistema.

1.4.4 Dinámica estructural

La intensidad sísmica es un parámetro con el cual podemos medir los efectos de los terremotos en el medio en el que ocurren, particularmente sobre las estructuras. Existen algunas escalas de intensidades que describen los efectos que se producen el terremoto.

Los efectos en las estructuras pueden ser: fisuración, agrietamiento colapso total o parcial, fallas en cimientos o grietas en el terreno.

1.4.4.1 Modos de vibración de un Edificio

Los edificios, al igual que todos los cuerpos, pueden vibrar de diferentes formas si son sometidos a excitaciones que, durante un terremoto, pueden afectar a los mismos en mayor o menor escala. Estas formas se conocen como modos de vibración.

De forma general, las estructuras oscilan de un lado a otro (modo fundamental o modo 1). La base se mueve mucho menos que la parte superior. Durante un sismo, este movimiento de vibración de una edificación aumenta. Además del modo 1 como se muestra en la figura 1.5, las edificaciones se ven sometidos también a vibraciones de Modo 2, 3,4, etc. (Lázaro, 2015)

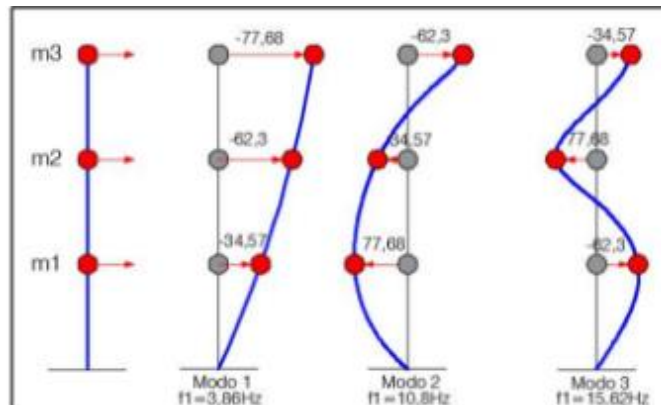


Figura 1. 5: Modos de vibración de una estructura plana de 3 GDL dinámicos [(Luna, 2015)]

1.5 Equipos para medir vibraciones

Al realizar un análisis teórico de los sistemas no siempre detecta exactamente todas las variables, y esto se debe a que los parámetros del modelo teórico son ideales, pero en la realidad existen muchos factores que provocan que el modelo real sea diferente. En la vida real, es muy peligroso si un sistema sea este una máquina o un edificio trabajan en frecuencias cercanas a la de resonancia.

Utilizando sensores de vibración se pueden registrar la aceleración, la velocidad o el desplazamiento. Estos sensores de vibración pueden ser utilizados en la industria o en laboratorios, por lo cual deben ser seleccionados adecuadamente, conociendo el tipo de medición que se desea realizar y las condiciones ambientales.

Para cumplir los diferentes requerimientos los sensores de vibración poseen, diferentes sensibilidades, además de un amplio rango de medición y de frecuencia.



Figura 1. 6: Equipos para medir vibraciones [(S.L, 2014)]

1.5.1 Tipos de Sensores

1.5.1.1 *Sensor de desplazamiento*

Los sensores de desplazamiento realizan medidas de desplazamiento lineal, generalmente estas mediciones se realizan en magnitudes de distancia. Los sensores de desplazamiento pueden ser de tipo:

- Lineal
- Láser
- Por hilo

El rango de frecuencias útiles para los sensores de desplazamiento va desde 10 [Hz] hasta 1000 [Hz] o desde 600 [RPM] hasta 60000 [RPM].

En caso de los valores que se deseen medir estén fuera de estos rangos, dichas medidas no serán confiables por lo que, resultarán inservibles para identificar la condición del sistema.

1.5.1.2 *Sensor de Aceleración*

Los rangos de medida son amplios, los rangos de frecuencias disponibles van desde 0 [Hz], para aplicaciones de bajas frecuencias, hasta Mega hertzios para altas frecuencias de vibración, además de sensores con diferentes sensibilidades para diferentes aplicaciones.

Existen algunos tipos:

➤ Piezoresistivos: Un acelerómetro piezo-resistivo utiliza un sustrato, en esta tecnología las fuerzas que ejerce la masa sobre el sustrato varían su resistencia, que forma parte de un circuito que mediante un puente de Wheatstone mide la intensidad de la corriente. (Búrdalo, 2015)

➤ Piezoeléctricos: Al momento de utilizar estos sensores se pueden encontrar diferentes tipos en el mercado; con diferentes valores de sensibilidad, alcance de la medida, banda de frecuencia de uso, etc. Tiene mayores características que cualquier otro tipo de transductor de vibraciones:

a) Rangos dinámicos con buena linealidad a lo largo de todo el rango de valores, es relativamente fuerte y fiable gracias a sus características que lo mantienen estable durante un largo período de tiempo.

b) Rango de frecuencias: Los sistemas mecánicos tienden a tener gran parte de su energía de vibración contenida en una gama de frecuencias relativamente estrecha, entre 10 y 1000 Hz, pero las mediciones se hacen a menudo hasta 10 kHz porque hay componentes interesantes en estas frecuencias altas. Hay que asegurar, por lo tanto, al seleccionar un acelerómetro, que el rango de frecuencia del transductor de aceleración pueda cubrir el rango de interés. El rango de frecuencias sobre las que el acelerómetro proporciona una salida verdadera está limitado en el extremo de la baja frecuencia en la práctica, por dos factores:

✓ El primero es la baja frecuencia de corte del amplificador, que le sigue. Esto no suele ser un problema, ya que el límite está por lo general muy por debajo de un Hertzio.

✓ La segunda es el efecto de las fluctuaciones de temperatura ambiente, a la que el acelerómetro es sensible. El acelerómetro piezoeléctrico es auto-generador, de modo que no necesita una fuente de alimentación, no hay partes móviles que se desgasten, y la obtención a su Estudio de la Vibración en Baja Frecuencia de Motor Eléctrico página 78 salida de una aceleración proporcional se puede integrar para dar velocidad y desplazamiento a señales proporcionales.

- c) En cuanto a la sensibilidad, debe de ser alta, ya que normalmente implica un conjunto piezoeléctrico relativamente grande y en consecuencia una unidad pesada. En circunstancias normales, la sensibilidad no es un problema crítico ya que están diseñados para aceptar estas señales de bajo nivel.
- d) Los acelerómetros piezoeléctricos tienen muchos usos entre ellos para la supervisión de maquinarias industriales, que miden niveles de vibración en micro-g's desde 60 rpm. hasta unos 900,000 rpm (1 a 15,000 Hz. (Búrdalo, 2015)

➤ Capacitivos: Modifican la posición relativa de las placas de un micro condensador cuando está sometido a aceleración. Los acelerómetros capacitivos están basados en la variación de la capacidad entre dos o más conductores entre los cuales está un dieléctrico, en respuesta a la variación de la aceleración. (Búrdalo, 2015) Los sensores capacitivos en forma de circuito integrado en un chip de silicio se emplean para la medida de la aceleración.

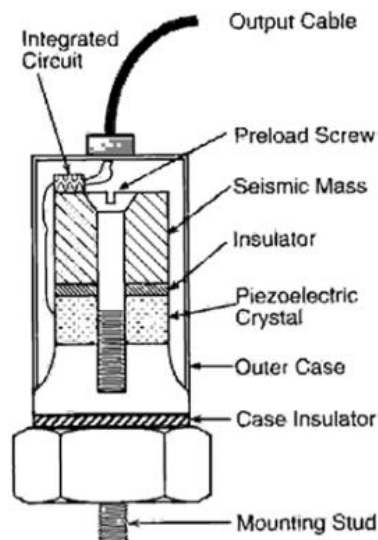


Figura 1. 7: Partes de un acelerómetro

El rango de los acelerómetros de uso general es de 1- 10000 Hz. Sin embargo, pueden encontrarse acelerómetros ultrasónicos que trabajan a frecuencias de hasta 1 MHz. Las aceleraciones que leen por este tipo de sensores suelen venir expresadas en términos de aceleración de la gravedad.

1.6 Equipos para adquisición de datos

La adquisición de datos o señales consiste en la toma de datos de variables físicas para generar datos que manipularse en un computador.

Es necesaria una etapa de acondicionamiento, en la cual la señal se haga compatible con el elemento que realiza la transformación a señal digital, este elemento es la tarjeta de adquisición de datos.

1.6.1 Tipos de tarjetas de adquisición de datos

1.6.1.1 Tarjeta Arduino

Es una placa electrónica con un microcontrolador de código abierto basada en hardware y software flexible de fácil uso. El microcontrolador de la placa se programa usando Arduino programming language y Arduino development environment. (Lázaro, 2015)



Figura 1. 8: Modelo de una tarjeta Arduino [(Ojeda, s.f.)]

1.6.1.2 Tarjeta de adquisición de datos

Las tarjetas de adquisición de datos son la interfaz entre una computadora y señales físicas, esto significa que la información registrada por el sensor es transformada a valores compatibles con una computadora, las tarjetas de adquisición de datos hacen de intérpretes que traduce de un lenguaje a otro.

Las tarjetas de adquisición de datos están compuestas por tres elementos: por un lado, está el circuito de acondicionamiento de señales, después está el convertidor analógico-digital y, finalmente, el bus del ordenador.



Figura 1. 9: Modelo de una tarjeta de adquisición de datos.

1.7 Mesas Vibratorias

Son plataformas que se construyen normalmente de metal y soportadas en una base de concreto, para reproducir movimientos oscilatorios (sísmicos) o de otras características y utilizando controladores, actuadores (hidráulicos, mecánicos o electromagnéticos).

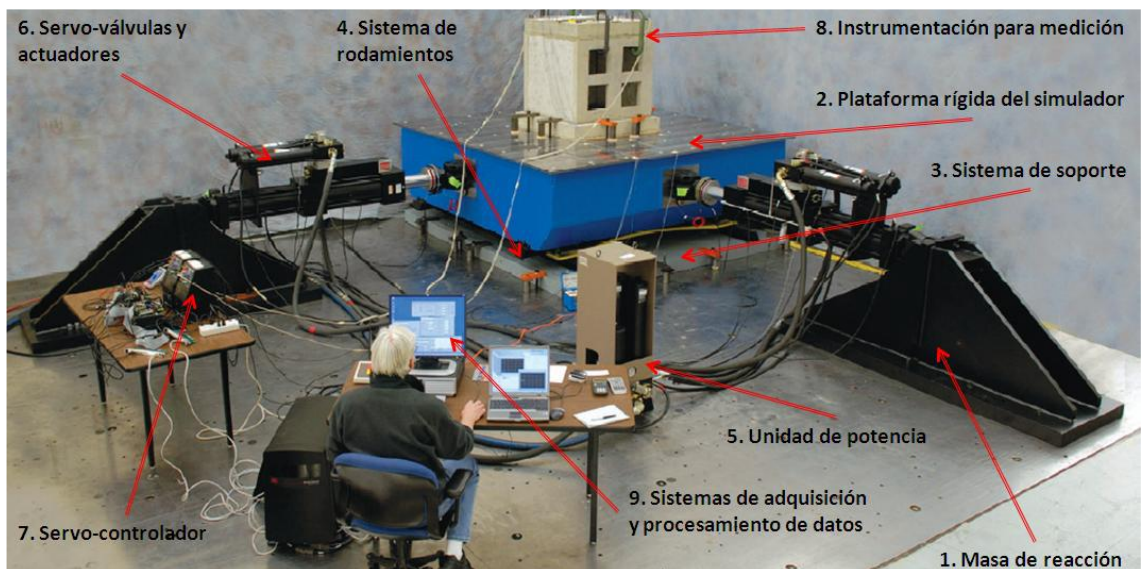


Figura 1. 10: Partes principales de una mesa vibratoria

Fuente: (Sp., 2018)

A continuación, se presenta una tabla con los datos de las mesas vibratorias existentes a nivel mundial con sus características.

Tabla 1. 1: Características de mesas vibratorias en el mundo. [Elaboración Propia]

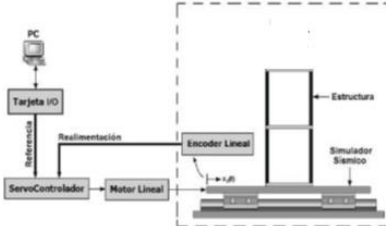
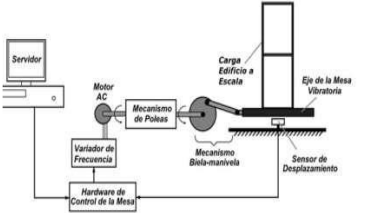
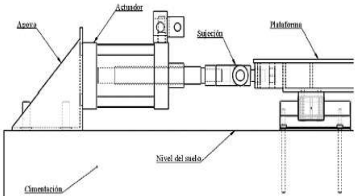
Mesas Vibratorias	Dimensiones [m]	Límite de carga [KN]	a max g ²		d máx [cm]		F max [Hz]
			Hor	Ver	Hor	Ver	
Pequeñas (-3 m)							
Universidad de Stanford	1.5x1.5	22.2	5	-	6.35	-	50
Universidad Rice	1.5x1.5	6.67	6	-	7.62	-	70
Universidad de Calgary	1.4x1.4	8.9	20	-	7.62	-	-
Medianas (3-9 m)							
Universidad de California en Berkeley	6.1x6.1	444.8	1.5	1	12.7	5.08	15
Universidad de Illinois	3.65x3.65	44.8	7	-	10.16	-	100
Universidad estatal de Nueva York	3.65x3.65	195.7	1.2	8.7	15.24	7.62	60
Grandes (+9 m)							
Centro Nacional de Investigaciones de Japón	15.24x15.24	4448.2	0.6	1.0	30.48	-	16

Las mesas vibratorias que se controlan en lazo cerrado pueden llegar a disponer de 6 GDL, que corresponden a los tres desplazamientos y tres giros de un sólido rígido. Las características técnicas de las mesas sísmicas se definen principalmente por sus dimensiones, números de grados de libertad, aceleraciones, velocidades, y desplazamientos máximos, capacidad portante, entre otros.

1.7.1 Alternativas de excitación

En la actualidad existen diversos tipos de sistemas para la fabricación una mesa vibratoria, se presenta a continuación la tabla 1.2:

Tabla 1. 2: Tipos de sistemas utilizados en mesas vibratorias [Elaboración Propia]

Tipo de Sistema	Fuente de Potencia	Excitador	Características Generales
<p>a) Mecánico</p>  	<p>Motores eléctricos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - de rotación fija - variable 	<ul style="list-style-type: none"> - Levas - brazos articulados - biela-manivela 	<ul style="list-style-type: none"> - Frecuencias muy limitadas (5-60 Hz) - Funcionan a Desplazamiento constante - Carencia de servo control
<p>b) Electrohidráulico</p> 	<p>Fuente hidráulica</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Actuador hidráulico instrumentado y controlado mediante servoválvulas de altas prestaciones que modulan el paso de aceite al pistón. - La superficie de vibración puede alcanzar grandes dimensiones 	<ul style="list-style-type: none"> - Rangos de frecuencia típicos desde 0.1Hz hasta 500Hz. - Aplicaciones especiales hasta 1000 [Hz]. - Prestaciones reducidas en frecuencias superiores. - Grandes desplazamientos. - Grandes superficies de ensayo. - Sistemas muy amortiguados, permiten ensayos con cargas descentradas, elevadas y piezas sueltas.
<p>c) Electrodinámico</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Amplificador electrónico de potencia con salida conform 	<ul style="list-style-type: none"> - Elemento rígido con bobina móvil que vibra en presencia de un campo electromagnético producido por un electroimán o un imán permanente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Permiten operar a altas frecuencias (2000 Hz y mayores) - Altos niveles de aceleración y de velocidad.

	<p>ada en corriente de alto nivel</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Convierte potencia eléctrica en potencia mecánica por métodos electromagnéticos 	<ul style="list-style-type: none"> - Desplazamientos limitados (25 mm, 50 mm, 75 mm). - Funcionamiento muy condicionado a bajas frecuencias (< 5Hz) - Resistencia limitada a momentos laterales. - Baja distorsión (<5%) - Poco inerciales (en búsqueda de resonancias) y poco amortiguados (malo para ensayos con piezas sueltas)
--	---------------------------------------	---	---

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La investigación se efectúa para poder realizar un esquema electrónico para medir frecuencia de forma simple y económica con la que se pueda medir un rango de frecuencias de oscilación de una estructura, en este caso edificación en cuestión. Este también debe poder ser reconfigurable fácilmente.

Los sensores de vibración pueden registrar la aceleración, la velocidad o el desplazamiento. Muchos de estos sensores son utilizados en diferentes aplicaciones, sean estas industriales o el laboratorio, por lo que se debe tener en cuenta el tipo de medición o las condiciones ambientales.

Para cumplir con todos los posibles requisitos, los sensores de vibración poseen, diversas sensibilidades, abarcan un amplio rango de medición y de frecuencia, considerando lo anterior, se seleccionaron los sensores adecuados y se elaboraron modelos de guías de laboratorios con el fin de que los estudiantes puedan utilizarlas para sus prácticas:

- Determinación de frecuencias naturales y de resonancia para sistemas de 1 y 2 GDL.
- Determinación de las frecuencias naturales de oscilación de sistemas de 1 GDL y 2 GDL con amortiguamiento pasivo

2.1 Diseño del prototipo del equipo

2.1.1 Procedimiento esquemático

La metodología de diseño que se implementó para realizar este proyecto se muestra en la Figura 2.1 el cual inicia con la definición del problema, seguido del análisis de alternativas de diseño, y finaliza con la simulación y elaboración de planos de construcción de la máquina.

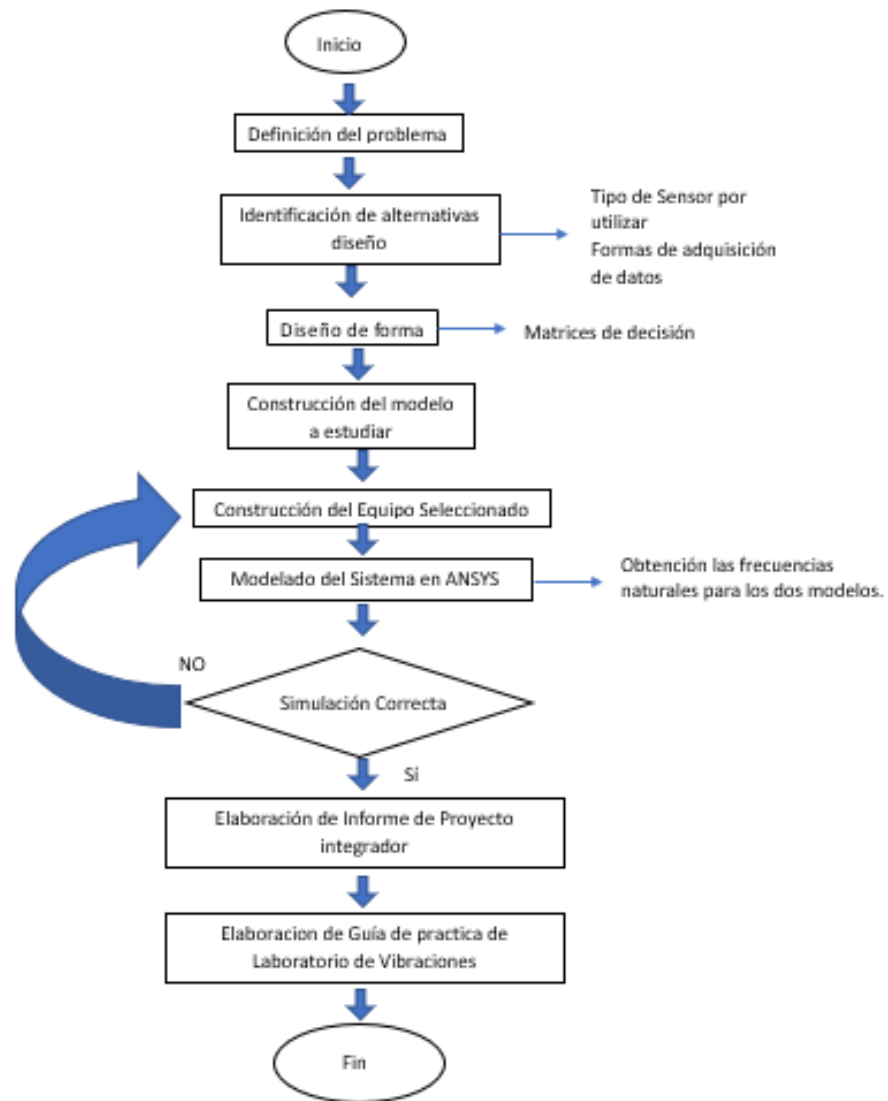


Figura 2. 1: Procedimiento esquemático de diseño. [Elaboración Propia]

2.1.2 Requerimientos de diseño

2.1.2.1 Costo

Este factor es importante dado que en el mercado existen dispositivos para medir vibraciones, pero su costo es elevado, por lo que se deben buscar opciones igual de útiles, pero con elementos más económicos.

EQUIPO DE ESTUDIO DE VIBRACIONES	
Sensor	5-100 [\$]
Tarjeta de adquisición de datos	1-50 \$]

2.1.2.2 **Espacio**

Dado que se necesita acoplar a la estructura a estudiar, y ésta a su vez está en función del tamaño de la mesa vibratoria en donde se realizarán las pruebas, el tamaño de esta no debe ser exagerado.

2.1.2.3 **Peso**

Debe que tener el peso adecuado para poderse trasladar si es necesario y que su masa no afecte a la masa total del sistema, además es un factor importante para la elaboración de la estructura de soporte del mecanismo.

1-50 [gramos]

2.1.2.4 **Disponibilidad**

La construcción debe realizarse con elementos que se encuentren disponibles en el mercado nacional, es decir, que no sean importados.

2.1.2.5 **Fácil funcionamiento**

Dado que son los estudiantes los que van a manipular el equipo este debe ser de fácil uso de tal manera que no se necesite ser un experto ni tener entrenamiento en el área para poder utilizarlo.

Previo a la realización de las matrices de decisión es necesario conocer entre que valores se encuentran los datos para evaluar los criterios:

- Para los tipos de sensores

Costo	5-100 [\$]
Peso	1-15 [gramos]
Disponibilidad nacional	Si – NO
Rango de medida	±1g - ±24 g
Sensibilidad	1-1000 [Hz]
Ejes de medida	Hasta 3

- Para las tarjetas de adquisición

Costo	1-50 [\$]
Tamaño	25-200 [cm ²]
Forma de Comunicación	USB

2.1.3 Identificación de las alternativas de diseño para el prototipo

La evaluación que se realizará a continuación tiene que ver con las alternativas propuestas teóricamente. En este proyecto se busca construir un equipo que permita estudiar las vibraciones en edificaciones y que a su vez se garantice que los datos tomados sean correctos.

Considerando todo esto, se tomará en cuenta las siguientes categorías al evaluar las alternativas:

- Tipo de medición
- Tipo de adquisición de datos

2.1.4 Selección de alternativa

En la tabla 2.1 se presentan las alternativas para el diseño del equipo para estudiar vibraciones, en base a estas alternativas se procedió a realizar una matriz de decisión para selección el diseño de funcionamiento adecuado al equipo.

Tabla 2. 1: Alternativas de diseño para los elementos del equipo

Tipo de Sensor	Método de adquisición de datos
Sensor de desplazamiento	Tarjeta Arduino
Sensor de aceleración	Tarjeta de adquisición de datos

La tabla 2.2 muestra los criterios que se evaluarán para cada tipo de diseño a su vez se muestra la ponderación de cada criterio que se utilizaron para la calificación de la matriz de decisión.

Tabla 2. 2: Criterios de evaluación [Elaboración Propia]

Tipo de Sensor		Método de adquisición de datos	
Criterios	Ponderación	Criterios	Ponderación
Costo	0.2	Costo	0.6
Tamaño	0.05	Tamaño	0.2
Peso	0.1	Forma de comunicarse con el computador	0.2
Disponibilidad nacional	0.15		
Rango de medida	0.2		
Sensibilidad	0.2		
Ejes de medida	0.1		

A continuación, se detalla en la tabla 2.3 un criterio de ponderación cuantitativo, según el grado de importancia en un rango de [1,5].

Tabla 2. 3: Criterio de ponderación cuantitativo [Elaboración Propia]

Condición	Calificación
Malo	1
Regular	2
Bueno	3
Muy bueno	4
Excelente	5

Por último, se muestran las tablas 2.4 y 2.5 para seleccionar la mejor manera de construir el equipo, en la tabla 2.4 se encuentra la mejor decisión para el tipo de sensor a utilizar, y en la tabla 2.5 se muestra la mejor decisión para el tipo de adquisición de datos. El puntaje total se lo encontró con el producto del criterio y la ponderación de la condición para la matriz de decisión, siendo 1 (malo) la ponderación más baja y 5 (excelente) la más alta.

Tabla 2. 4: Matriz de decisión para el tipo de sensor. [Elaboración Propia]

Criterios de selección para alternativas	Factor de Peso	Alternativa A (Sensor de desplazamiento)		Alternativa B (Sensor de velocidad)		Alternativa C (Sensor de aceleración)	
		Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado
Costo	0.25	2	0.5	4	1	5	1.25
Sensibilidad	0.1	4	0.4	4	0.4	4	0.4
Precisión	0.1	4	0.4	5	0.5	5	0.5
Ejes de medida	0.1	3	0.3	4	0.4	5	0.5
Rango de medida	0.15	4	0.6	5	0.75	5	0.75
Disponibilidad	0.15	2	0.3	2	0.3	5	0.75
Tamaño	0.15	5	0.75	5	0.75	5	0.75
		Total A	3.25	Total B	4.1	Total C	4.9

Dado que en la matriz de decisión se halló que los sensores de aceleración cumplen de la mejor manera con los criterios de selección que se seleccionaron, pero dado que existen algunos tipos de sensores de aceleración se procedió a realizar una matriz de decisión para decidir qué tipo se utilizará.

Tabla 2. 5: Matriz de decisión para el tipo de acelerómetro [Elaboración Propia]

Criterios de Selección	Factor de peso	a) Piezoresistivo		b) Capacitivo		c) Piezoeléctrico	
		Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado
Rango de medición	0.25	3	0.75	4	1	3	0.75
Disponibilidad	0.15	3	0.45	4	0.6	1	0.15
Tamaño	0.1	4	0.4	4	0.4	4	0.4
Costo	0.5	3	1.5	3	1.5	1	0.5
		Total A	3.1	Total B	3.5	Total C	1.8

Posteriormente, una vez seleccionado el tipo de sensor a utilizar se debe seleccionar de qué forma leeremos los datos del sensor; esto se lo realizará con una tarjeta de adquisición de datos por este motivo se debe seleccionar también cuál de éstas utilizaremos.

Tabla 2. 6: Matriz de decisión para Sist. de adquisición de datos [Elaboración Propia]

Método de adquisición de datos	Ponderación	Arduino UNO		Tarjeta de adquisición de datos	
		Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado
Costo	0.6	5	3	2	1.2
Tamaño	0.2	4	0.8	4	0.8
Forma de comunicarse con el computador	0.2	4	0.8	4	0.8
	1		4.6		2.8

2.1.5 Diseño de forma del prototipo

El diseño de forma del equipo montado en la estructura a analizar (los datos de la cual se especificará más adelante) se muestra continuación:

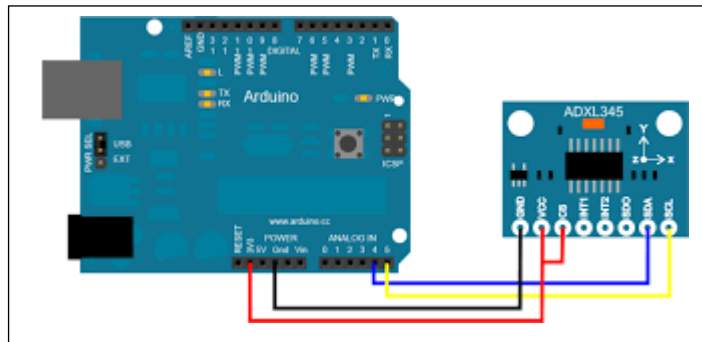


Figura 2. 2: Diseño de forma del equipo [Elaboración Propia]

El sistema con el cual se probará el equipo es una estructura tipo edificio. Esta estructura consta de diversos componentes que se detallarán más adelante. Dicha configuración es conveniente porque se puede modelar muchos sistemas diferentes, como por ejemplo sistemas mecánicos más grandes o bien estructuras civiles.

Dado que se analizarán 2 GDL se colocará dos acelerómetros, uno en cada piso de la estructura para poder leer los datos del comportamiento de cada piso.

2.1.5.1 *Diseño detallado del prototipo*

Para la construcción del equipo, partiendo de los resultados obtenidos en la matriz de decisión se obtuvo que:

- El sensor será un acelerómetro capacitivo.
- Se utilizará una tarjeta Arduino debidamente configurada para la obtención de los datos.

- Elaboración del modelo en ANSYS
- Comparación de resultados obtenidos
- Procesamiento de datos (Matlab)

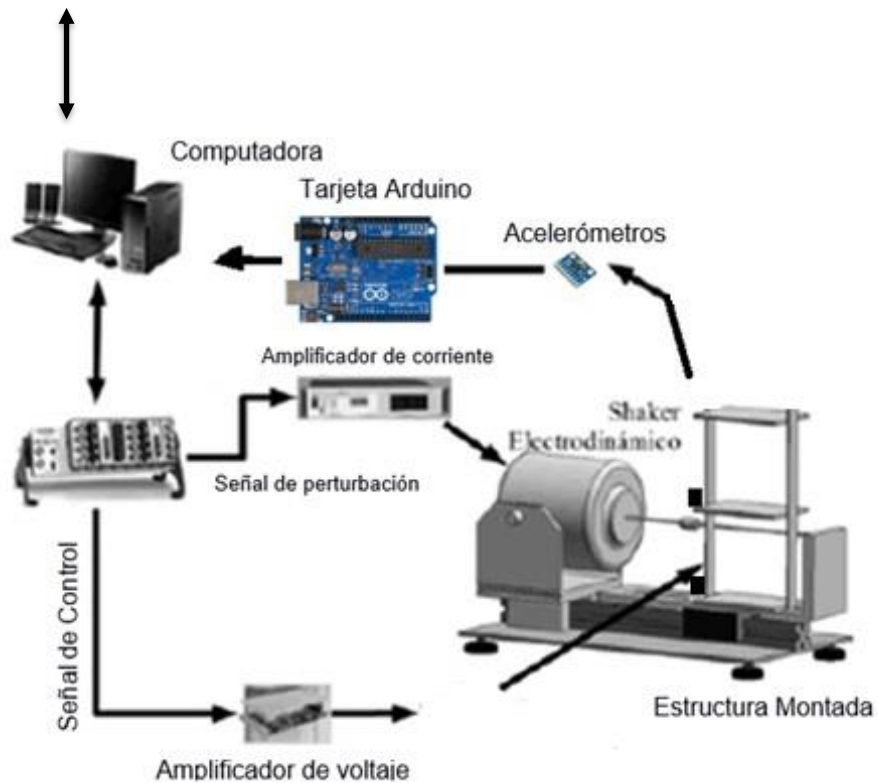


Figura 2. 3: Diagrama del equipo montado en la estructura [Elaboración Propia]

El acelerómetro que se utilizará es el ADXL345, un acelerómetro capacitivo, que será conectado a un Arduino Uno y que posee las siguientes características:

- Detecta la aceleración en los ejes [x,y,z]
- Rango de medición ajustable: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$
- Alta resolución: hasta 13 bits.
- Sensibilidad: 40mg/LSB en todos los rangos, equivale a una precisión superior a un 1° .
- Consumo: 45 μA cuando está en uso y 0.1 μA en standby

El acelerómetro posee dos pines de interrupciones configurables para responder a ciertos eventos. Estos eventos pueden ser detección de movimientos rápidos, golpes y vibraciones, en uno o dos pulsos, y detección de condiciones de caída libre.

Además, dispone de un bloque de memoria FIFO que almacena hasta 32 conjuntos X, Y, Z.

Para la tarjeta Arduino se utilizará el entorno de programación de ésta para crear un sketch que nos permita leer los datos que genere el acelerómetro.

Tabla 2. 7: Características de la tarjeta Arduino UNO [Elaboración Propia]

Microcontrolador ATmega328.
Voltaje de entrada 7-12V.
14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
6 entradas análogas
32k de memoria Flash
Reloj de 16MHz de velocidad

2.1.5.2 Estructura de una edificación

A lo largo de todos estos años se han realizado muchos estudios, y con estos se ha determinado y probado que las estructuras más simples poseen un mejor comportamiento al momento de un sismo. La simetría en una estructura es importante dado que si esta no existe se podrían producir efectos torsionales lo que son complicados de evaluar y pueden ser muy perjudiciales.

Algunos de los materiales que se utilizaron fueron los siguientes:

- Pletinas de acero (e=3 mm): Soportaran la estructura, simulan las columnas de una edificación.
- Cemento
- Lamina de acero 30x30x0.5 mm

La estructura que se utiliza tiene una altura total de 350 mm (1 GDL) y de 600 mm (2GDL) con una base cuadrada de 30x30 cm.

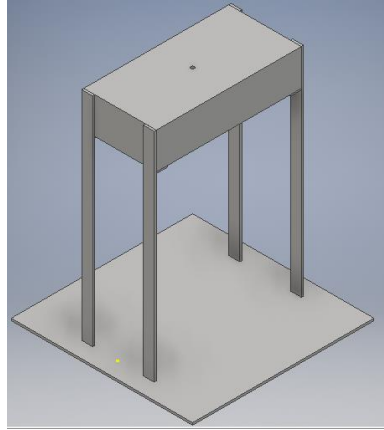


Figura 2. 4: Diseño de forma de la estructura para 1GDL [Elaboración Propia]

Toda la estructura está soportada por una corredera de baja fricción y la base está acoplada rígidamente a un shaker, éste excitará al sistema con barridos frecuenciales sinusoidales. Todo el sistema se conecta a una computadora personal mediante un sistema de adquisición de datos. El shaker se encuentra ubicado en la oficina de profesores de FIMCBOR a cargo del Dr. Marín, profesor de la materia de Vibraciones dictada en la carrera de Ingeniería Naval.



Figura 2. 5: Equipo generador de vibraciones

2.2 Diseño de la mesa vibratoria

2.2.1 Procedimiento esquemático

Para realizar el diseño de la mesa se seguirá la siguiente metodología que se muestra en la figura 2.6, la cual inicia con la identificación de las alternativas de diseño y se finaliza con el diseño detallado de la mesa vibratoria.

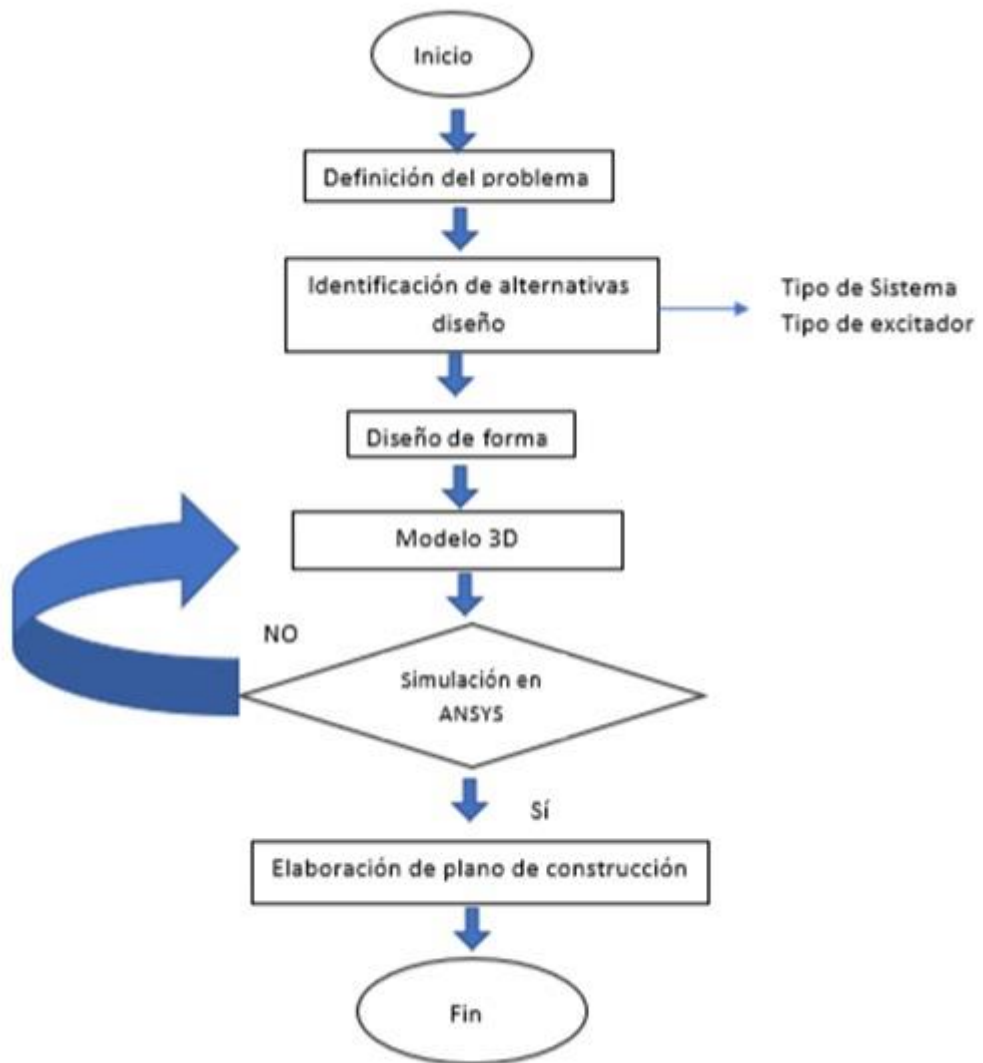


Figura 2. 6: Procedimiento esquemático de diseño para la mesa vibratoria.

[Elaboración Propia]

En la figura 2.7 se muestra una mesa vibratoria, es una plataforma construida por lo general de metal y soportada por una base de concreto, que puede reproducir movimientos sísmicos o con otras características por medio de controladores y actuadores ya sean estos hidráulicos, mecánicos o electromagnéticos.

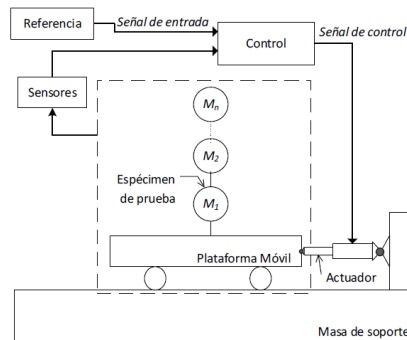


Figura 2. 7: Esquema general de una mesa vibratoria
[Elaboración Propia]

2.2.2 Identificación de las alternativas de diseño

Para la elaboración de la mesa vibratoria se debe escoger con qué tipo de sistema se trabajará se han identificado 3 tipos de sistemas los cuales se detallarán en la tabla a continuación:

Tabla 2. 8: Alternativas de diseño [Elaboración Propia]

Alternativa	Tipo de sistema	Fuente de potencia	Excitador
A)	Mecánico	Motores eléctricos	Levas, biela-manivela
B)	Electrohidráulico	Fuente hidráulica	Actuador hidráulico
C)	Electrodinámico	Amplificador	Elemento rígido con bobina móvil que vibra en presencia de un campo electromagnético.

2.2.3 Requerimientos de diseño

2.2.3.1 Costo

Este factor es importante ya que la mesa debe ser completamente funcional y el costo podría ser un poco elevado por la cantidad de componentes que requiere el ensamble de la misma, por lo que debe buscar opciones que sean accesibles económicamente y a su vez reducir los costos de construcción lo más posible.

Componentes	\$ 350,00-\$800
Ensamble	\$ 150,00
TOTAL (aproximadamente):	\$ 950,00

2.2.3.2 Espacio

Dado que la estructura a estudiar posee de base 30x30 [cm], la mesa debe poseer un área más grande. Para futuras modificaciones en las prácticas en cuanto al modelo de estudio, sobreestimaré el tamaño que deberá tener.

2.2.3.3 Peso

Dado que la estructura ira montada en el suelo no hay restricciones en cuanto al mismo.

2.2.4 Identificación de las alternativas de diseño para la mesa vibratoria

La evaluación que se realizará a continuación tiene que ver con las alternativas propuestas teóricamente. Se busca diseñar una mesa de vibraciones que permita estudiar las vibraciones en edificaciones.

Considerando todo esto, se tomará en cuenta las siguientes categorías al evaluar las alternativas:

- Tipo de sistema
- Tipo de excitador
-

2.2.5 Selección de alternativa

En la tabla 2.9 se presentan las alternativas para el tipo de sistema para estudiar vibraciones, en base a estas alternativas se procedió a realizar una matriz de decisión para seleccionar el sistema de funcionamiento adecuado para la mesa vibratoria.

**Tabla 2. 9: Alternativas de tipos de sistemas para la mesa vibratoria
[Elaboración Propia]**

Tipo de Sistema	Fuente de Potencia
Mecánico	Motores eléctricos
Electrohidráulico	Fuente hidráulica
Electrodinámico	Amplificador electrónico

La tabla 2.10 muestra los criterios que se evaluarán para cada tipo de sistema a su vez se muestra la ponderación de cada criterio que se utilizaron para la calificación de la matriz de decisión.

**Tabla 2. 10: Criterios de evaluación
[Elaboración Propia]**

Tipo de Sistema		Tipo de Motor	
Criterios	Ponderación	Criterios	Ponderación
Costo	0.5	Costo	0.6
Frecuencia	0.3	RPM	0.2
Desplazamiento	0.2	Fuente de alimentación	0.2

A continuación, se detalla en la tabla 2.11 un criterio de ponderación cuantitativo, según el grado de importancia en un rango de [1,5].

Tabla 2. 11: Criterio de ponderación cuantitativo [Elaboración Propia]

Condición	Calificación
Malo	1
Regular	2
Bueno	3
Muy bueno	4
Excelente	5

Por último, se muestran las tablas 2.12 y 2.13 para seleccionar la mejor manera de construir el equipo, en la tabla 2.12 se encuentra la mejor decisión para el tipo de sistema a utilizar, y en la tabla 2.13 se muestra la mejor decisión para el tipo de motores. El puntaje total se lo encontró con el producto del criterio y la ponderación de la condición para la matriz de

decisión, siendo 1 (malo) la ponderación más baja y 5 (excelente) la más alta.

Tabla 2. 12: Matriz de decisión para el tipo de sistema. [Elaboración Propia]

Criterios de selección para alternativas	Ponderación	Alternativa A (Sistema Mecánico)		Alternativa B (Sistema electrohidráulico)		Alternativa C (Sensor electrodinámico)	
		Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado
Costo	0.5	5	2.5	1	0.5	2	1
Frecuencia	0.3	2	0.6	3	0.9	4	1.2
Desplazamiento	0.2	4	0.8	4	0.8	3	0.6
		TOTAL A	3.9	TOTAL B	2.2	TOTAL C	2.8

Posteriormente, una vez seleccionado el tipo de sistema a utilizar se debe seleccionar el tipo de conexión con el que se va a trabajar; esto quiere decir el tipo de motor por lo que se debe seleccionar cuál de estos utilizaremos.

Tabla 2. 13: Matriz de decisión para el tipo de motor [Elaboración Propia]

Tipo de Motor		Monofásico		Trifásico		Motores DC	
Criterios	Ponderación	Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado
Costo	0.6	5	3	2	1.2	4	2.4
RPM	0.2	3	0.6	4	0.8	3	0.6
Fuente de alimentación	0.2	4	0.8	2	0.4	4	0.8
	1		4.6		2.4		3.8

2.2.6 Diseño de forma de la mesa vibratoria

El diseño de forma del sistema de la mesa vibratoria se muestra a continuación:

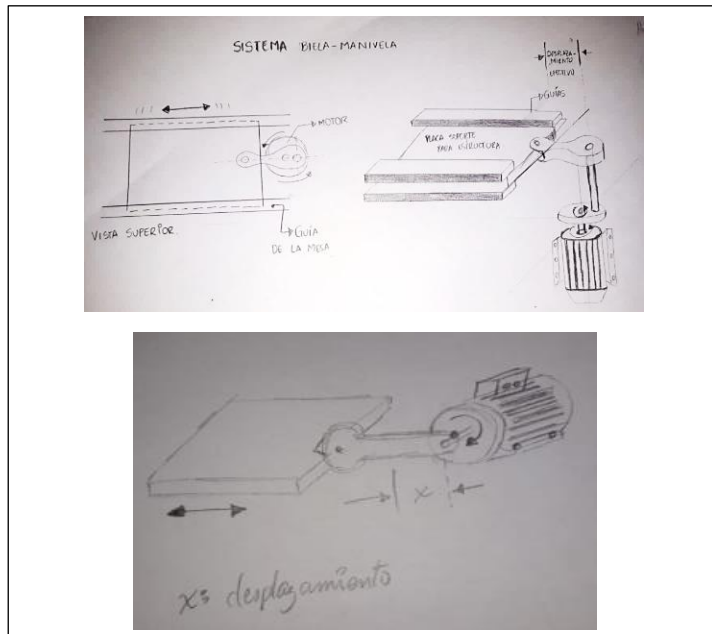


Figura 2. 8: Diseño de forma del sistema [Elaboración Propia]

Este sistema mecánico es el más básico y funcional dado que su fabricación es relativamente fácil además sus componentes accesibles y conocidos para los estudiantes.

2.2.6.1 Diseño de selección de los elementos de la mesa vibratoria

Para el diseño de selección de la mesa se deben identificar los componentes que la conforman:

Opción 1	Opción 2
a) Motor trifásico: 0.25 [HP]	
b) Variador de velocidad	
c) Manivela	
d) Elementos de sujeción [pernos, tuercas]	
e) Base rígida de acero estructural 800x800x800 [mm]	
f) Perfiles en C	
g) Placa metálica 600x600x3[mm]	
h) Disco metálico de Ø200 [mm] x 3 [mm]	

Proveedor: SKF

- Eje

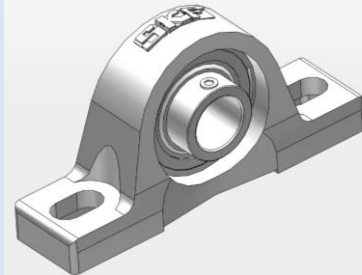


Proveedor: Thomson Linear

- Guía lineal (eje incluido)



- Chumaceras de pie



- Cojinete de bolas



- Rodamiento lineal



En base a estas opciones se escogerá la que sea más fácil de ensamblar acorde al número de elementos necesarios la opción 2 es la más práctica al momento de ensamblar, en la figura 2.9 se muestra el ensamble de la mesa vibratoria con todos los elementos antes descritos.

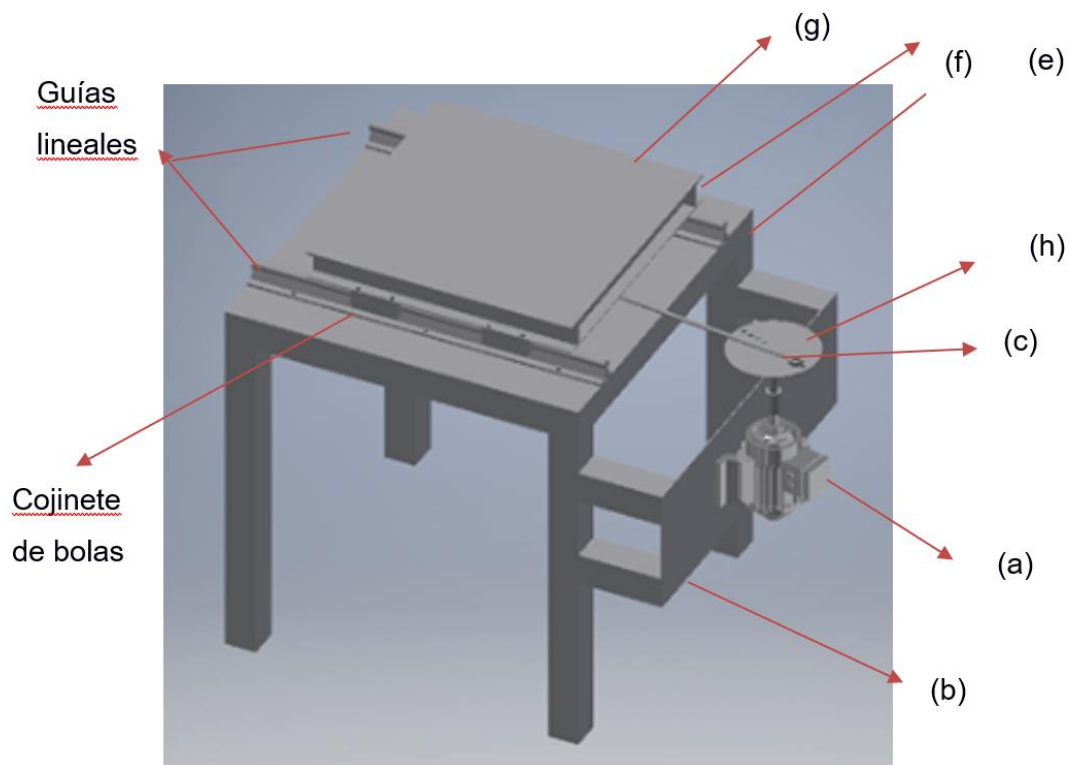


Figura 2. 9: Vista 3D de la mesa vibratoria [Elaboración Propia]

2.2.6.2 Diseño de diámetro mínimo para la manivela

En el diseño de la mesa vibratoria se identificó que este elemento de transmisión de movimiento es crítico en todo el sistema, por tanto, fue necesario aplicar criterios de diseño para poder seleccionar el diámetro mismo para que no existan fallas en el mecanismo.

Asumiendo un motor de potencia mayor a la escogida:

$$P = 1 [Hp] = 745.7 [Watt]$$

Se obtiene la frecuencia:

$$P = T\omega ; \text{ con una frecuencia } \rightarrow f = 20 [hz]$$

$$\omega = 2\pi f = 125.66 \frac{rad}{seg} \times \frac{60 seg}{1 min} \times \frac{1 rev}{2\pi rad}$$

$$\omega = 1200 [rpm]$$

$$T = \frac{Pot}{\omega} = \frac{745.7 J/s}{125.66 rad/s}$$

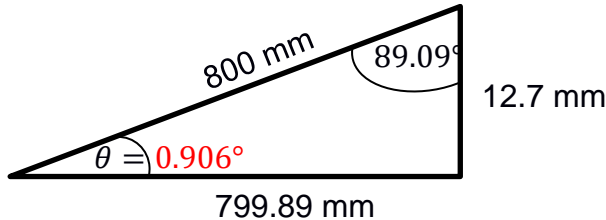
$$T = 5.93 [Nm]$$

$$T = d \times F \Rightarrow F = \frac{T}{d} = \frac{5.93 Nm}{12.7 \times 10^{-3} m}$$

Se obtuvo entonces la fuerza que ejerce el motor sobre la manivela.

$$F = 466.92 \text{ [N]}$$

Nota: Amplitud pico a pico es igual a 25.4 [mm]



$$\therefore \tan\theta \approx \theta$$

Entonces la fuerza a la que está sometida la manivela es de 466.92 [N]

Para un acero AISI 1010:

$$AISI\ 1010 \begin{cases} S_y = 179 \text{ [MPa]} \\ S_{ut} = 324 \text{ [MPa]} \end{cases}$$

Diseño Estático:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} \quad ; \quad \sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d^2}$$

$$\eta = \frac{S_y}{\frac{4F}{\pi d^2}} \Rightarrow \eta = \frac{\pi d^2 S_y}{4F} \Rightarrow d^2 = \frac{\eta(4F)}{\pi S_y}$$

$$d = \sqrt{\frac{\eta(4F)}{\pi S_y}} = \sqrt{\frac{3 \times 4 \times 466.92}{\pi(179 \times 10^6)}} = 0.003 \text{ [m]}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} d = 3.16 \text{ [mm];} & \eta = 3 \\ d = 5 \text{ [mm];} & \eta = 7 \end{cases}$$

- $f = 10 \text{ [hz]} \Rightarrow \omega = 62.83 \text{ [rad/s]} = 600 \text{ [rpm]}$

$$T = 11.87 \text{ [Nm]}$$

$$F = 934.53 \text{ [N]}$$

Asumiendo:

$$\eta = 7 \Rightarrow d = 6.83 \text{ [mm]} \approx 7 \text{ [mm]}$$

Diseño Dinámico:

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{sup} C_{temp} C_{conf} \times (S_e')$$

$$S_e' = 0.5 S_{ut} = 0.5(324 \text{ MPa}) \Rightarrow S_e' = 162 \text{ [MPa]}$$

- $C_{temp} = 1$ (temperatura ambiente)
- $C_{conf} = 0.897$ (confiabilidad 90%)

- $C_{sup} = 0.91$ (Rolado en caliente)

- $C_{carga} = 0.7$ (σ_{AXIAL})

Se asume que el diámetro está entre $0.3'' < d < 10''$

- $C_{tamaño} = 0.869d^{-0.097}$

$$d = 7mm$$

$$C_{tamaño} = 0.72$$

$$S_e = 0.7 \times 0.72 \times 0.91 \times 1 \times 0.897 \times (162) [MPa]$$

$$S_e = 66.64 [MPa]$$

Diseño para vida infinita (uniaxial):

$$\eta = \frac{S_e}{\sigma} ; \sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d^2}$$

$$\eta = \frac{S_e}{\frac{4F}{\pi d^2}} \Rightarrow \eta = \frac{\pi d^2 S_e}{4F} \Rightarrow d^2 = \frac{\eta(4F)}{\pi S_e}$$

$$d = \sqrt{\frac{\eta(4F)}{\pi S_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 4 \times 934.5}{\pi(66.64 \times 10^6)}}$$

$$d = 6 [mm]$$

Entonces acorde al análisis realizado el diámetro mínimo que debe poseer la manivela con un factor de seguridad igual a 2 es igual de 6 mm, por tanto, si se escoge uno mayor el sistema no fallará.

Para los elementos: disco metálico, base rígida los planos se encontrarán en la sección de Anexos 4; así como las hojas técnicas del motor, variador de frecuencias, guía lineal y cojinetes de bolas,

2.3 Experimentación

2.3.1 Descripción del shaker

En la práctica, el objeto de prueba es montado mediante soportes a una mesa vibratoria o excitador (shaker). Los Shakers electrodinámicos son ideales para altas frecuencias y cuando se requiere una mayor precisión en las pruebas.

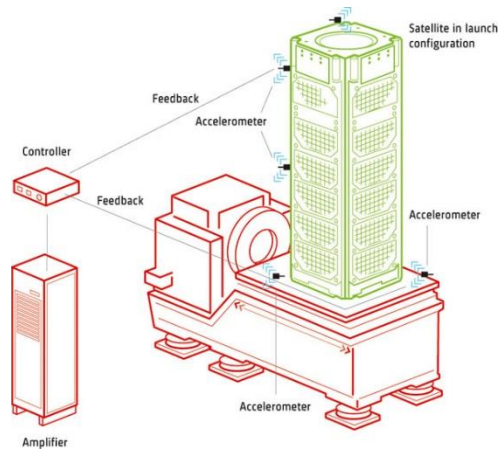


Figura 2. 10: Prueba de durabilidad en un shaker
 [(MB Instrumentos, S.A. de C.V. 2014, 2014)]

Un Shaker electrodinámico funciona como un altavoz, usa una bobina que se mueve en un campo magnético fijo, pueden usarse imanes o electroimanes para generarlo. (MB Instrumentos, S.A. de C.V. 2014, 2014) Se debe poseer un controlador para enviar una señal que el amplificador usará para mover la mesa del Shaker. También es necesario un sensor para medir la respuesta de la vibración del objeto bajo prueba.



Figura 2. 11: Controlador del Shaker

En un shaker generalmente se usan acelerómetros como controladores de señal del sensor, en algunos casos también se usan sensores de fuerza y desplazamiento.

2.3.1.1 Datos técnicos

Tabla 2. 14: Datos de las especificaciones de los límites de operación del equipo de vibración [Elaboración propia]

Marca del equipo: Vibration VIEW (Vibration Research)	
Fuerza senoidal	500 Lbs. pico a pico
Fuerza aleatoria	350Lbs. pico a pico
Rango de frecuencias	DC a 4500 Hz
Aceleración máxima	100 g pico-pico, sin carga
	50 g pico-pico, 5 Lb. de carga
	11 g pico-pico, 40 Lb. de carga
Velocidad máxima	85 pulg./seg pico-pico
Máximo desplazamiento	
Continuo	1.0 pulg, pico-pico, sin carga
Entre interrupciones	1.0 pulg, pico-pico, sin carga
Potencia requerida	6000 VA @208-230V, 1Ø, 50/60 Hz

Los datos que se presentan en la tabla 2.14 fueron obtenidos de las especificaciones del equipo.

2.3.2 Comprobación del Prototipo

Para esta área se utilizará el software ANSYS para modelar el sistema de tal forma que podamos obtener resultados teóricos asignándole las características más cercanas al mismo, conociendo estos resultados podremos excitar al sistema en un rango de frecuencias cercano a lo encontrado y registrar los datos con los acelerómetros.

Para comprobar las lecturas del prototipo se seguirá los siguientes pasos:

- Desarrollar el modelo a estudiar en ANSYS-Modal para obtener valores teóricos de las frecuencias.
- Montar y fijar las estructuras a analizar en la mesa vibratoria.
- Establecer el barrido de frecuencias, siendo éstas cercanas a las obtenidas en la simulación.
- Conectar los acelerómetros a la tarjeta Arduino, y luego ésta a una computadora para la adquisición de datos, así mismo con los extensómetros a la tarjeta de adquisición de datos.
- Registrar los valores.
- Graficar los datos obtenidos en el software Matlab utilizando el código correspondiente. (Ver Anexo 3)

2.3.3 Ecuaciones del movimiento del sistema

Se analizó un sistema con 2 GDL y las ecuaciones que describen al sistema son:

a) Análisis de vibración forzada del sistema 1GDL

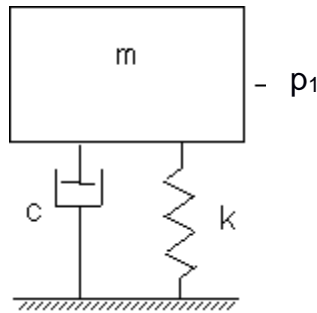


Figura 2. 12: Modelo Matemático para 1 GDL.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p_1 = p\text{sen}(wt) \quad (2. 1)$$

Donde para obtener la frecuencia natural del sistema:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2. 2)$$

Siendo $\lambda_{1,2}$ las raíces de la ecuación 2.2:

$$\lambda_{1,2} = \frac{\pm\sqrt{4mk}}{2m} \quad (2. 3)$$

$$\lambda_1 = \frac{k}{m} \quad (2. 4)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1} \quad (2. 5)$$

$$\therefore f = \frac{\omega_1}{2\pi} [\text{Hz}] \quad (2. 6)$$

b) Análisis de vibración forzada del sistema 2 GDL

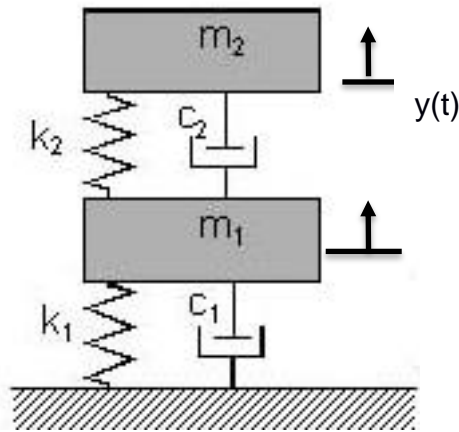


Figura 2. 13: Modelo Matemático para 2 GDL.

Si tenemos que $m_1 = m_2 = m$, $k_1 = k_2 = k$, y si se modela el sistema considerando que la base de éste se mueve de acuerdo a una excitación armónica de la forma $y(t) = Y\text{sen}(\omega t)$, las ecuaciones de movimiento del sistema serían:

$$m\ddot{u}_1 + c_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + k(u_1 - u_2) = f_1(t) = 0 \quad (2.7)$$

$$m\ddot{u}_2 + c_1(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k(u_2 - u_1) + c_2(\dot{u}_2) + k(u_2) = f_2(t) = ky(t) + c\dot{y}(t) \quad (2.8)$$

Donde u_1 y u_2 son las funciones de desplazamiento de las masas 1 y 2 respectivamente, como respuesta al movimiento de la base. Si se considera que las funciones de fuerza $f_1(t)$ y $f_2(t)$ pueden obtenerse a partir de la parte real de la multiplicación de dos amplitudes complejas \bar{F}_1 y \bar{F}_2 multiplicadas por una potencia de la forma $e^{i\omega t}$, puede obtenerse que:

$$\bar{F}_1 = 0 \quad (2.9)$$

$$\bar{F}_2 = Y(k - i\omega c_2) \quad (2.10)$$

Donde \bar{F}_1 y \bar{F}_2 son las amplitudes complejas de fuerza aplicadas a las masas 1 y 2 respectivamente (m_1 y m_2 son iguales). En base a lo anterior y de manera análoga al modelo utilizado para las funciones de fuerza, las funciones de desplazamiento $u_1(t)$ y $u_2(t)$ de las masas del sistema pueden obtenerse a partir de:

$$u_1(t) = \text{Re}(\bar{U}_1 e^{i\omega t}) \quad (2.11)$$

$$\mathbf{u}_2(t) = \text{Re}(\overline{U}_2 e^{i\omega t}) \quad (2.12)$$

Donde \overline{U}_1 y \overline{U}_2 son las amplitudes (complejas) de las funciones de desplazamiento de las masas 1 y 2 respectivamente.

A través de un análisis matricial y si se definen las siguientes variables:

$$A = k^2 + \omega^2 c_1 c_2 \quad (2.13)$$

$$B = -\omega^4 m^2 - 3\omega^2 km - \omega^2 c_1 c_2 + k^2 \quad (2.14)$$

$$C = \omega k(c_1 - c_2) \quad (2.15)$$

$$D = 2\omega k c_1 + \omega k c_2 - 2\omega^3 m c_1 - \omega^3 m c_2 \quad (2.16)$$

$$E = k^2 + \omega^2 c_1 c_2 - \omega^2 km \quad (2.17)$$

$$F = \omega(k(c_1 - c_2) + \omega^2 m c_2) \quad (2.18)$$

Se obtiene que:

$$\overline{U}_1 = \frac{Y}{B^2 + D^2} ((AB + CD) + i(CB - AD)) \quad (2.19)$$

$$\overline{U}_2 = \frac{Y}{B^2 + D^2} ((EB + FD) + i(FB - ED)) \quad (2.20)$$

$$\mathbf{u}_1(t) = \text{Re}(\overline{U}_1 e^{i\omega t}) = \frac{Y}{B^2 + D^2} ((AB + CD) \cos \omega t - (CB - AD) \sin \omega t) \quad (2.21)$$

$$\mathbf{u}_2(t) = \text{Re}(\overline{U}_2 e^{i\omega t}) = \frac{Y}{B^2 + D^2} ((EB + FD) \cos \omega t - (FB - ED) \sin \omega t) \quad (2.22)$$

Entonces para $m_1=m_2=m$ y $k_1=k_2=k$

$$m_1 m_2 \lambda^2 - (m_1(k_1 + k_2) + m_2 k_1) \lambda + k_1 k_2 = 0$$

$$m^2 \lambda^2 - 3(mk) \lambda + k^2 = 0$$

Resolviendo la ecuación de 2 grados se obtiene:

$$\lambda_{1,2} = \frac{3mk \pm \sqrt{5m^2 k^2}}{2m^2}$$

$$\lambda_1 = \frac{3 + \sqrt{5}}{2} \left(\frac{k}{m}\right)$$

$$\lambda_2 = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \left(\frac{k}{m}\right)$$

De donde,

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1}$$

$$\therefore f_{2.1} = \frac{\omega_1}{2\pi} [Hz]$$

$$\omega_2 = \sqrt{\lambda_2}$$

$$f_{2.2} = \frac{\omega_2}{2\pi} [Hz]$$

Por último, para conocer el amortiguamiento del sistema, se utilizará el concepto asociado al decremento logarítmico, que representa la velocidad con que decrece la amplitud de una vibración.

$$\delta = \ln \left(\frac{X_i}{X_{i+1}} \right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2. 23)$$

Donde:

X_i y X_{i+1} : Amplitudes de onda sucesivas (desplazamientos), medidas un ciclo aparte para un sistema.

ζ : Relación de amortiguamiento

ω_n : Frecuencia de oscilación del sistema

2.3.3.1 Constante elástica del sistema

Los resortes del sistema estarán representados por las pletinas, en la tabla 2.15 se muestran los datos:

Tabla 2. 15: Datos técnicos de las pletinas de acero

Dimensiones			
Ancho [mm]	Espesor [mm]	Seccion [mm]	Peso x metro [kg]
15	3	45	0.354
Requisitos mecánicos			
Grado de acero	Fluencia MPa	Resistencia MPa	Alargamiento (%)
SAE-1010	235 (Min)	340 (Min) 470 (Max)	26 (Min)

Como ya se mencionó antes, cualquier elemento elástico o deformable puede ser considerado como un resorte. Por tanto, para hallar la constante de resorte equivalente de una varilla de longitud l , área de sección transversal A y módulo de Young E sujeta a una fuerza como se muestra en la figura 2. 20 entonces k será igual a:



Figura 2. 14: Modelo utilizado para cálculo de la constante de resorte [(Rao S. , 2012)]

Debido a la dirección de la fuerza de excitación que generará el shaker, se puede modelar la constante de resorte de una viga en voladizo, entonces por la facilidad de análisis se asume que el peso de la viga es despreciable y que la carga F se debe al peso de la masa, entonces se conoce que la deflexión en el extremo de una viga es:

$$\delta = \frac{Wl^3}{12EI} \quad (2. 24)$$

Entonces, la constante de resorte del sistema será igual a:

$$k = \frac{W}{\delta} = \frac{48EI}{l^3} \quad (2. 25)$$

Donde:

I : Momento de Inercia

$$I = \frac{1}{12} bh^3 \quad (2. 26)$$

Si dos elementos de resorte respecto de una masa o un punto fijo tienen los mismos puntos inicial y final están en paralelo por lo que la K del sistema será igual a la sumatoria de las k de cada elemento.

2.3.4 Prototipo del equipo

El modelo que se presenta a continuación corresponde al modelo real sujeto a la mesa vibratoria.

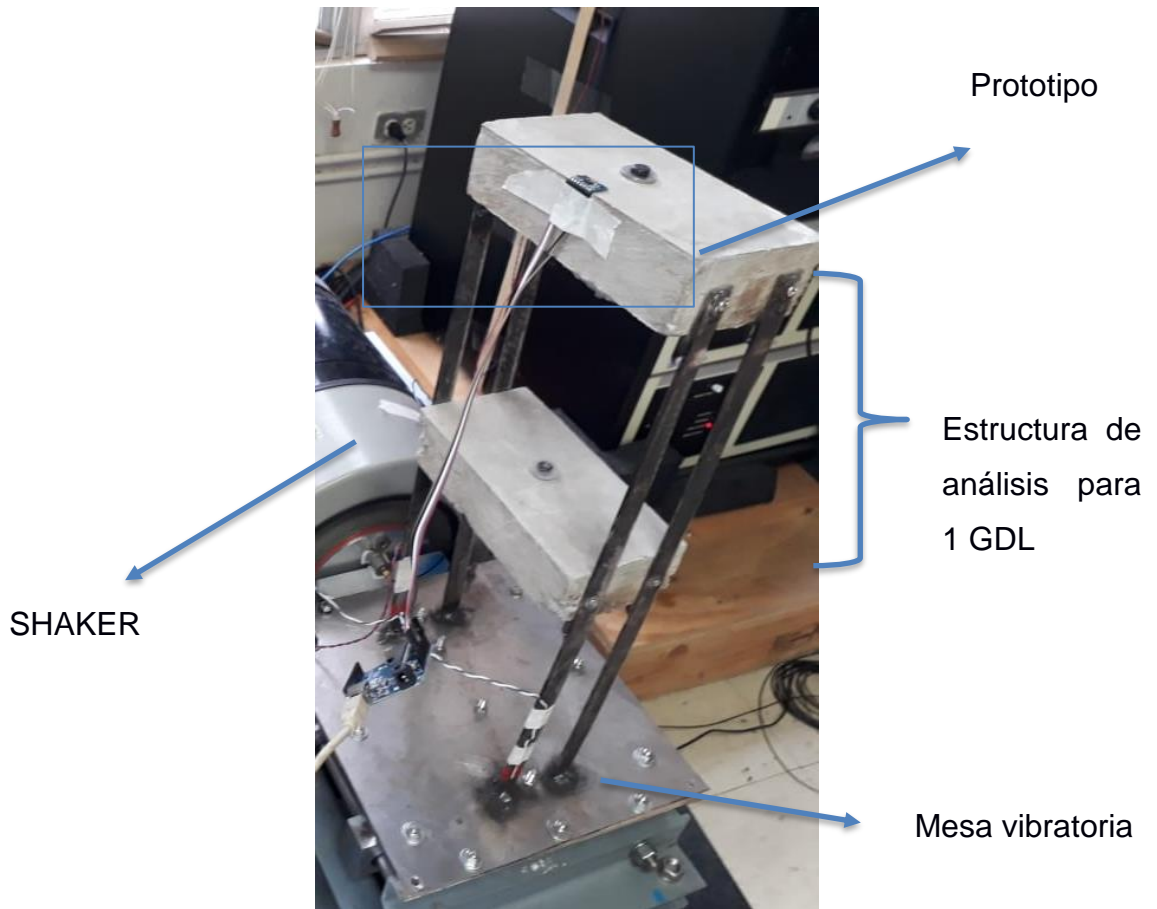


Figura 2. 15: Prueba del prototipo en estructura [Elaboración propia]

2.3.5 Modelo matemático del sistema en Simulink

Con las ecuaciones detalladas anteriormente se procedió a generar el diagrama de bloques, se presenta a continuación:

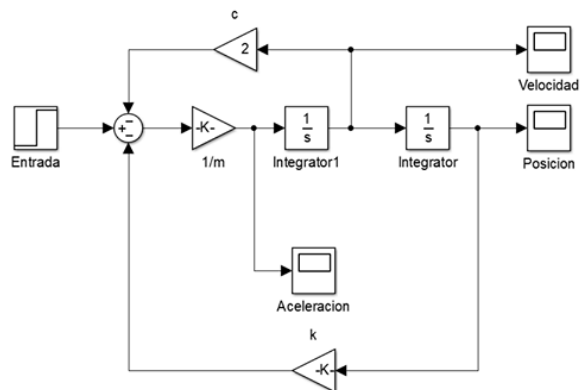


Figura 2. 16: Diagrama de bloque del sistema de 1 GDL

Fuente: Elaboración propia

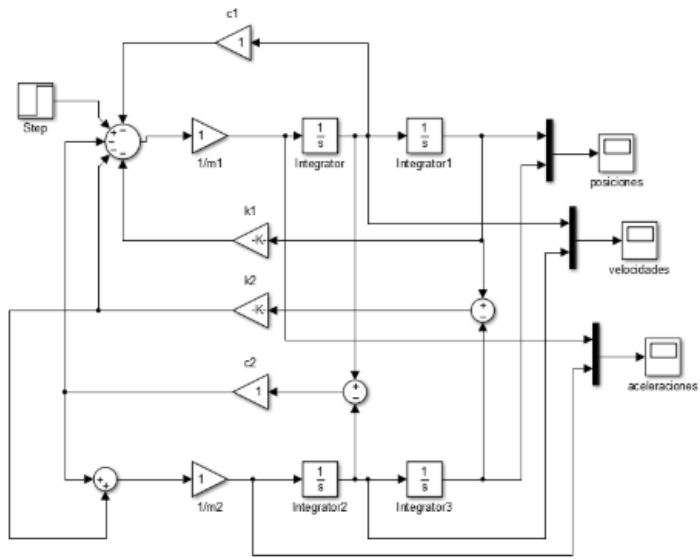


Figura 2. 17: Diagrama de bloque del sistema de 2 GDL

Fuente: Elaboración propia

Una vez que se tiene este modelo se puede generar diferentes tipos de entradas y posteriormente graficar cómo se comporta el sistema; lo cual aportará en gran medida al aprendizaje de los estudiantes.

2.3.5.1 Algoritmo para graficar datos obtenidos del prototipo

El código que se utilizará para graficar los datos obtenidos se encuentra en el Anexo 3.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados

Para determinar las características dinámicas del prototipo elaborado, el cual será usado para las futuras prácticas en el laboratorio de vibraciones (Ver Anexo 1), se utilizó el shaker que se encuentra ubicado en la Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y Recursos Naturales; se realizaron pruebas para la estructura de 1 GDL y otra para la estructura de 2 GDL, una prueba para encontrar la frecuencia natural de los sistemas, la aceleración y desplazamiento para observar el fenómeno de resonancia y el de amortiguamiento pasivo.

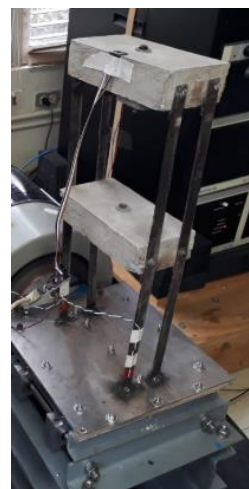
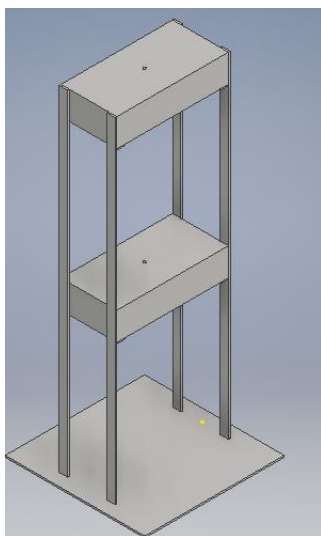
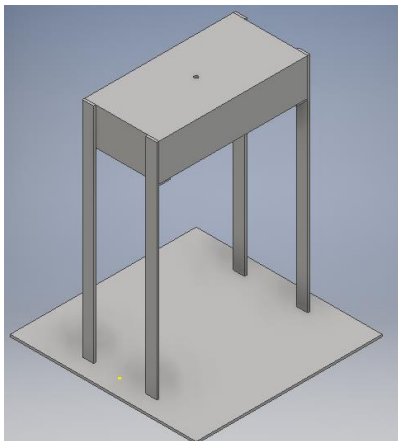


Figura 3. 1: Estructuras de 1 y 2 GDL montadas en el shaker.

3.1.1 Resultados obtenidos para Modelo de 1 GDL

3.1.1.1 Frecuencia natural del sistema

Para hallar la frecuencia natural del sistema se lo hace con la ec. 2.5 y 2.6:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{sist}}{m_{sist}}}$$

Se obtiene:

$$\omega_n = 2\pi f$$

$$f_n \approx 9.5\text{Hz}$$

Con esta frecuencia obtenida de las ecuaciones anteriormente descritas, se puede estimar el barrido de frecuencia que se realizará, ya que conocemos alrededor de que valor se generará la resonancia.

3.1.1.2 Frecuencia de resonancia

Con el software ANSYS se puede establecer en que rango de valores aparece la frecuencia natural del sistema, para luego comparar con los valores experimentales y así corroborar las mediciones.

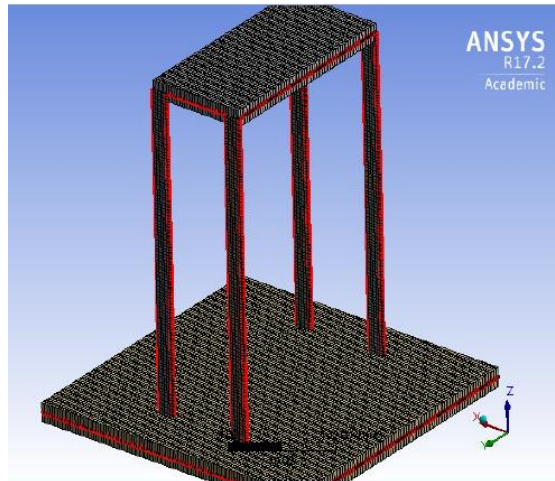


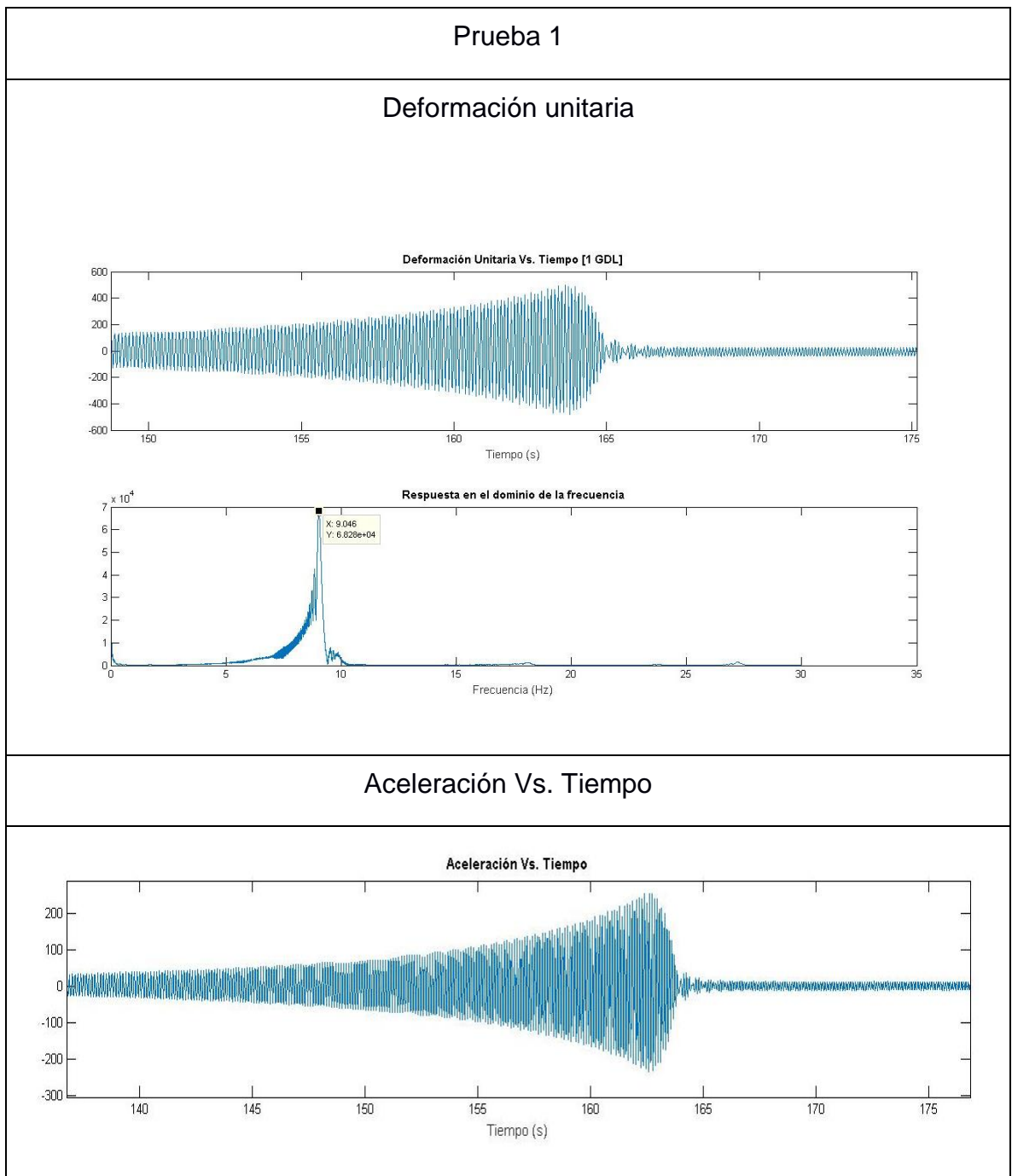
Figura 3. 2: Modelo en ANSYS (1 GDL)

Tabla 3. 1: Calculo de frecuencias naturales del modelo

Elemento analizado	
Cuerpos	6
Nodos	15400
Elementos	14656
Frecuencia natural	8,03 [Hz]

La frecuencia de resonancia experimental (1er modo) de la estructura de 1 GDL ocurrió aproximadamente entre 8 y 9 Hz, lo cual se aprecia en la gráfica del dominio de la frecuencia.

PRUEBA N° 1	
Barrido de frecuencia	1-10 Hz
Desplazamiento pico a pico	0.2 mm



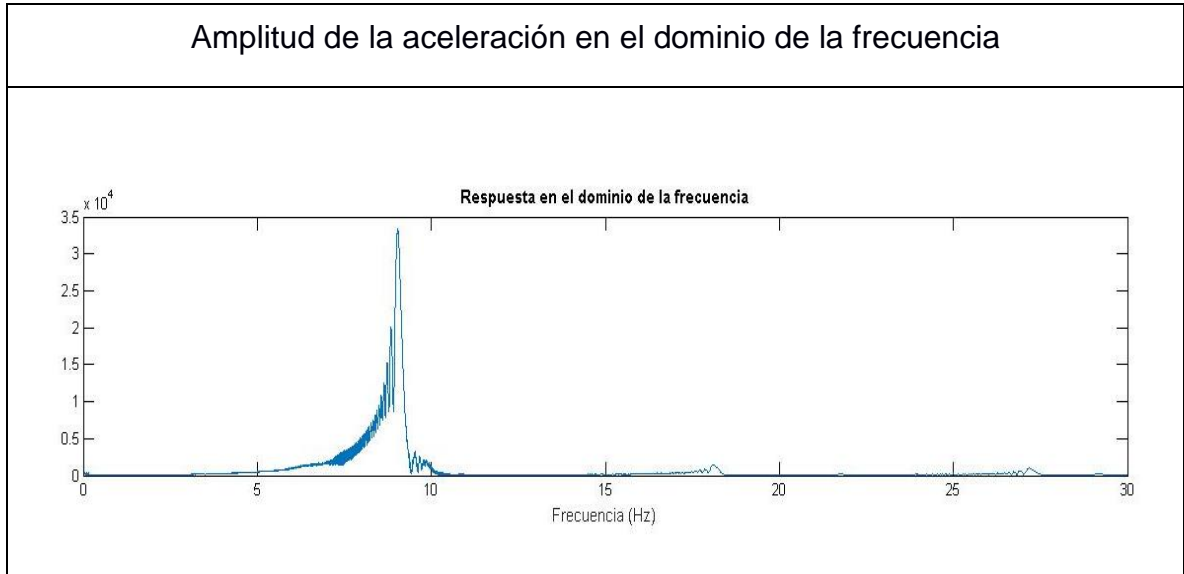


Figura 3. 3: Gráficas para 1 GDL

Para las pruebas que se realizaron se observa que la deformación unitaria y la aceleración tuvieron un incremento notable en sus graficas lo que se espera observar, y que al darse la resonancia las amplitudes de vibración se amplifican alrededor de los 9,03 [Hz].

El porcentaje de error se lo obtiene como:

$$\% \text{ de Error} = \left| \frac{\text{Valor}_{\text{teorico}} - \text{Valor}_{\text{experimental}}}{\text{Valor}_{\text{Teorico}}} \right| \times 100\%$$

$$\% \text{ de Error} \approx 12,45\%$$

3.1.1.3 Amortiguamiento del sistema

Para calcular el amortiguamiento del sistema se le generó un impulso al sistema y con la ayuda de los extensómetros se pudo obtener la deformación unitaria vs. Tiempo.

Para poder encontrar el coeficiente de amortiguamiento del sistema de 1 GDL, se utilizará el concepto asociado al decremento logarítmico, que representa la velocidad con que decrece la amplitud de una vibración.

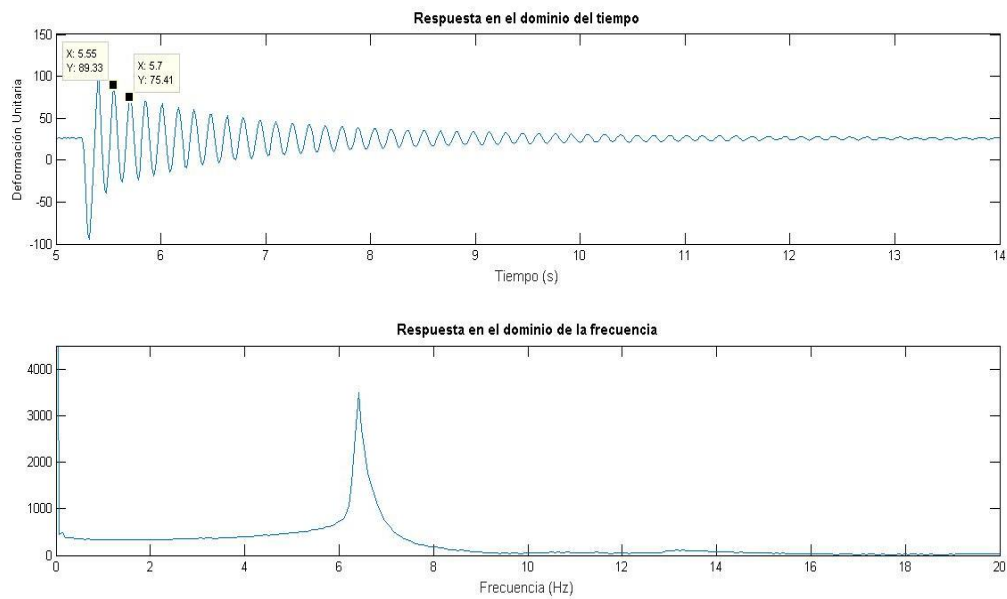


Figura 3. 4: Deformación Unitaria vs. Tiempo para 1GDL

Utilizando la ecuación 2.17 se obtuvo el decremento logarítmico:

Variables	Pico 1
X_i	89,33
X_{i+1}	75,41
δ	0,169
ζ	0,047

Esto indica que la relación de amortiguamiento del sistema para 1GDL equivale al 0,047.

3.1.2 Resultados obtenidos para modelo de 2 GDL

3.1.2.1 Frecuencia natural del sistema 2 GDL

Para hallar la frecuencia natural del sistema de 2 GDL se lo hará utilizando el software ANSYS, ya que sabremos alrededor de que valores podremos encontrar el 1er y 2do modo del sistema, haciendo así más eficientes al momento de realizar el barrido de frecuencias.

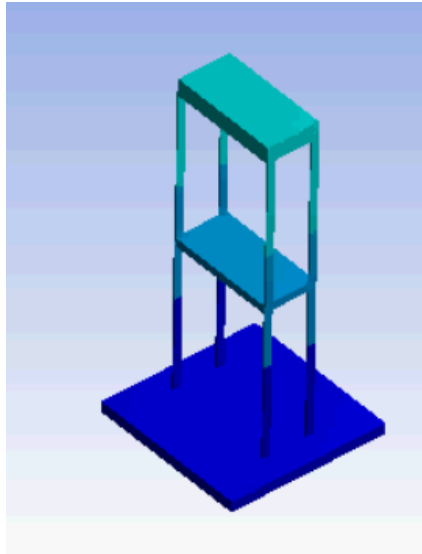


Figura 3. 5: Modelo en ANSYS (2GDL)

Tabla 3. 2: Calculo de frecuencias naturales del modelo para 2 GDL

Elemento analizado	
Cuerpos	11
Nodos	19745
Elementos	18590
Frecuencia natural	$\omega_1 = 5,00[\text{Hz}]$ $\omega_2 = 22,51[\text{Hz}]$

3.1.2.2 Frecuencia de resonancia (1er y 2do modo)

A continuación, se presentan los gráficos experimentales del sistema de 2 GDL.

PRUEBA N° 1	
Barrido de frecuencia	1-10 Hz
Desplazamiento pico a pico	0.2 mm

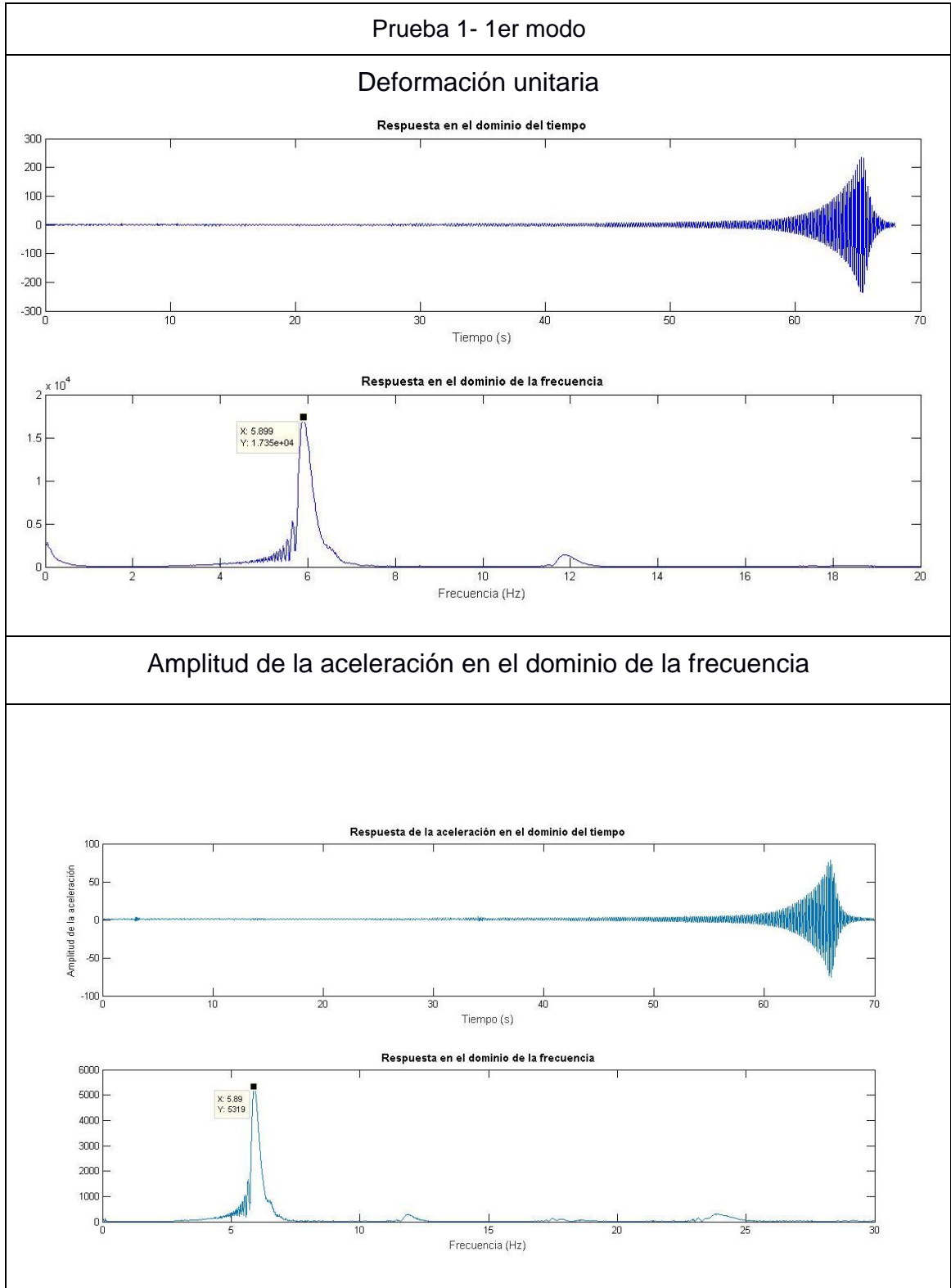


Figura 3. 6: Gráficas para 2 GDL-1er modo

PRUEBA N° 2	
Barrido de frecuencia	15-30 Hz
Desplazamiento pico a pico	0.2 mm

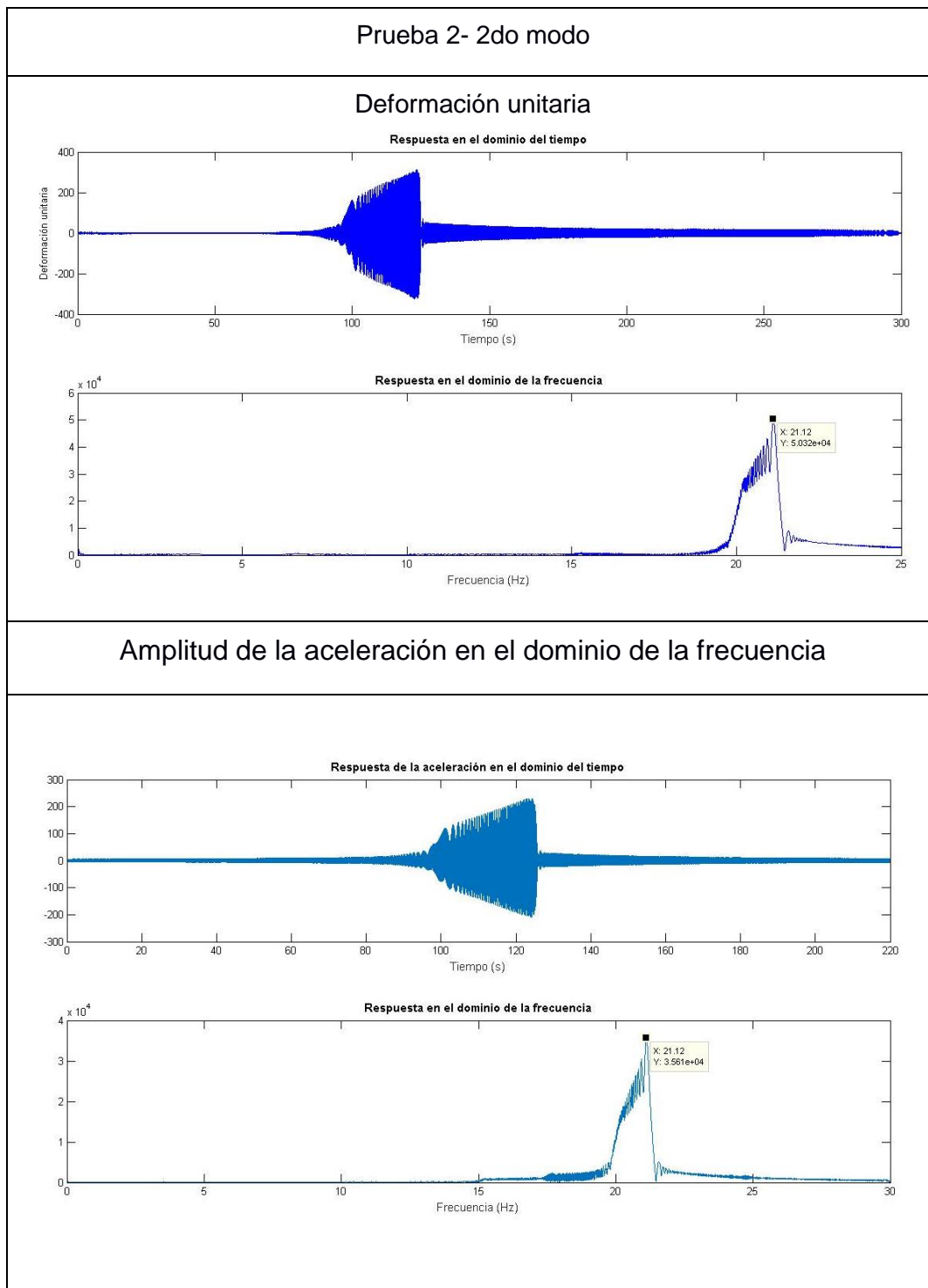


Figura 3. 7: Gráficas para 2 GDL-2do modo

Para las pruebas que se realizaron se observa que la deformación unitaria y la aceleración tuvieron un incremento notable en sus graficas lo que se espera observar, y que al darse la resonancia las amplitudes de vibración se amplifican alrededor de los 5,89 [Hz] para el 1er modo y de 21,12 [Hz] para el 2do modo.

Con el software ANSYS se puede corroborar los datos experimentales obtenidos, es decir, se puede comparar las soluciones del modelo para garantizar que los resultados obtenidos son aceptables:

El porcentaje de error se lo obtiene como:

$$\% \text{ de Error} = \left| \frac{\text{Valor}_{teorico} - \text{Valor}_{experimental}}{\text{Valor}_{Teorico}} \right| \times 100\%$$

$$\% \text{ de Error (1er modo)} \approx 17\%$$

$$\% \text{ de Error (2do modo)} \approx 6\%$$

Los porcentajes de error de 17% y de 6%, podrían deberse a el modelo planteado en ANSYS, ya que la base se la fijó mientras que el modelo real estaba sujeto por medio de pernos de anclaje, además la placa base poseía 3 mm, de espesor lo que pudo provocar variación a la respuesta del sistema, afectando la frecuencia natural del mismo.

3.1.2.3 Amortiguamiento del sistema

Para calcular el amortiguamiento del sistema se le generó un impulso al sistema y con la ayuda de los extensómetros se pudo obtener la deformación unitaria vs. Tiempo.

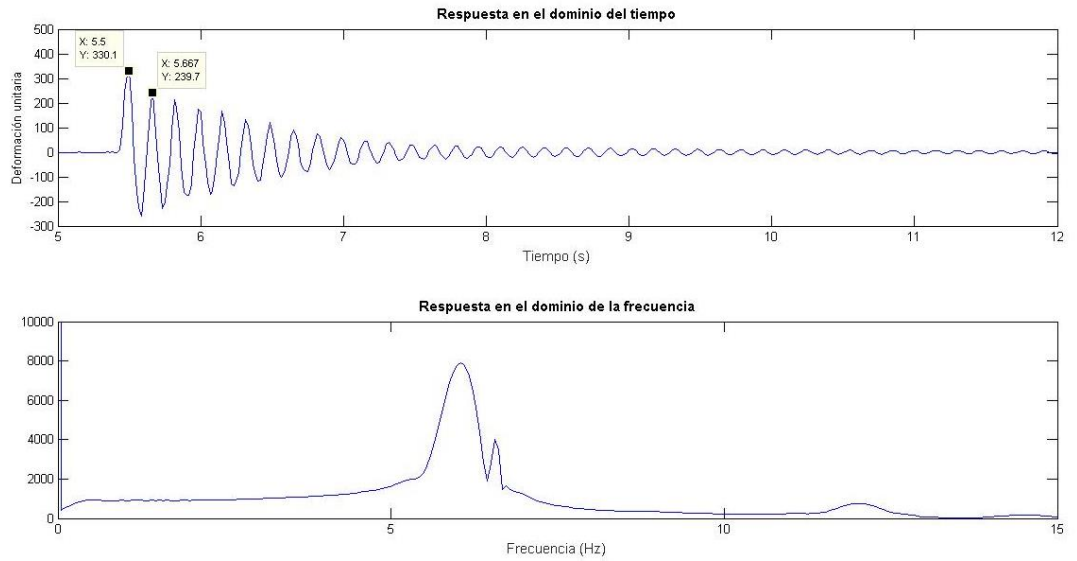


Figura 3. 8: Deformación Unitaria vs. Tiempo para 2GDL

Variables	Pico 1
X_i	330,1
X_{i+1}	239,7
δ	0,32
ζ	0,051

Para la amortiguación del sistema de 2GDL se obtuvo una relación de amortiguamiento de 0,051. Las estructuras físicas se las fabricó de tal forma que sean lo más simétricas posibles, y así no tener inconvenientes con la torsión que se podría generar en el modelo debido a la excitación del shaker.

En general lo que se esperaba era el aumento en el coeficiente de amortiguamiento, debido al aumento de la masa entre los dos modelos, ya que este se relaciona con la constante de amortiguamiento que es diferente para cada sistema.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

En esta tesis se ha construido un equipo para estudiar vibraciones y el diseño de selección de una mesa de vibraciones, los modelos construidos para probar el prototipo corresponden a sistemas de 1 y 2 grados de libertad, se analizó la respuesta de estos sistemas utilizando el método de elementos finitos; para luego comparar los resultados, por tanto, podemos concluir que:

1. El prototipo lee valores muy cercanos a los teóricos, es decir, los datos que estos leen son confiables y pueden ser utilizados para estudiar vibraciones no sólo en modelos de edificaciones sino en otros tipos de estructuras metálicas.
2. Las pruebas que se realizaron fueron generando un impulso y posteriormente un barrido de frecuencias a los sistemas, obteniendo datos de aceleración y deformación unitaria lo que permitió identificar las frecuencias naturales de los modelos que se manifestaron con un incremento en la amplitud de respuesta.
3. Las guías de laboratorio redactadas responden solo a una parte del curso de dinámica de maquinarias por lo que el objetivo a futuro debería elaborar más prácticas para que los estudiantes puedan experimentar con otros tipos de modelos.
4. Los resultados que se obtuvieron de forma experimental y con los modelos teóricos son muy cercanos la diferencia entre ellos, varían acorde por las propiedades de cada material usado en la estructura.
5. Se logró obtener con éxito las frecuencias naturales de los sistemas tanto de forma teórica como práctica, siguiendo los procedimientos planteados en las mismas.

4.2 Recomendaciones

1. Fabricar la mesa vibratoria con los componentes antes detallados para que los estudiantes tengan la facilidad de elaborar sus prácticas en su facultad. Dado que el manejo de la mesa es mucho más sencillo que un shaker los estudiantes podrían variar las frecuencias y experimentar por si mismos las respuestas del sistema a diferentes frecuencias excitadoras.
2. Elaborar un prototipo de equipo para estudiar vibraciones en elementos rotatorios lo cual también es un tema de vital importancia en nuestra vida como ingenieros mecánicos.
3. Así mismo, tal como se diseñó un equipo para estudiar vibraciones en edificaciones, elaborar un banco de pruebas para estudiar las vibraciones en elementos rotatorios.
4. Ampliar el estudio de vibraciones dentro de la carrera, ya que en la industria cada vez es más importante la supervisión de los sistemas mecánicos, sobre todo de elementos de máquinas rotativas.
5. Ampliar el alcance la materia Dinámica de maquinarias, como por ejemplo realizar visitas técnicas a empresas dentro de la ciudad dedicadas a los análisis de vibraciones en industrias.

BIBLIOGRAFÍA

Arosemena, A. (s.f.). *X. Fundamentos de Vibración*.

Búrdalo, G. (2015). *METODOLOGÍA PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS VIBRACIONAL IN SITU DE COMPRESORES FRIGORÍFICOS SEMIHERMÉTICOS ALTERNATIVOS, MEDIANTE EL EMPLEO DE ALGORITMOS DE CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA*. Univesidad de León, León, España.

Lázaro, L. L. (2015). *ENSAYO A ESCALA DE EDIFICIO DE DOS ALTURAS SOMETIDO A DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES*. Escola de Camins, Barcelona, España.

Luna, L. L. (10 de 2015). *ENSAYO A ESCALA DE EDIFICIO DE DOS ALTURAS SOMETIDO A*. BARcelona: Escola de Camins-UPC Barcelona TECH. Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/81054/TFM_LUCY_LAZARO.pdf

MB Instrumentos, S.A. de C.V. 2014. (2014). Recuperado el 2 de 07 de 2018, de <https://midebien.worldsecuresystems.com/inicio-2014>

Ojeda, L. T. (s.f.). *ARDUINO.cl*. Obtenido de <http://arduino.cl/arduino-uno/>

Rao, S. (2012). *VIBRACIONES MECÁNICAS*. México: PEARSON EDUCACIÓN.

Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas*. México: Pearson Educación.

S.A, J. I. (s.f.). *JM Industrial*. Obtenido de <https://www.jmi.com.mx/literatura/blog/item/7-tarjetas-de-adquisicion-de-datos.html>

S.L, C. ©. (30 de 09 de 2014). *PCE Ibérica*. Obtenido de <https://www.pce-iberica.es/>

Sp., E. (2018). *elhys elektronika, hydraulika, systemy*. Obtenido de http://www.elhys.com.pl/badanie_konstrukcji_budowlanych.html

Hurel, J. (2017). *Amortiguamiento*. Presentation, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.

ANEXOS

Anexo 1

Guías de laboratorio

1. GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA LA MEDICIÓN DE LAS FRECUENCIAS NATURALES DE OSCILACIÓN DE SISTEMAS DE 1 GDL y 2 GDL

OBJETIVO

- Determinar la frecuencia natural de vibración de un sistema estructural de 1 grado de libertad.
- Determinar las frecuencias naturales de vibración de un sistema estructural de 2 grados de libertad.

MARCO TEÓRICO

Sistemas de 1 GDL

Una forma efectiva de determinar experimentalmente la frecuencia natural de un sistema de 1 grado de libertad (GDL) puede llevarse a cabo perturbando al sistema y permitiendo que el mismo vibre libremente. Cuando esto ocurre, la frecuencia a la que oscila el sistema se define como la frecuencia natural de vibración del mismo.

El tipo de perturbaciones iniciales que se le puede dar a un sistema de 1 GDL pueden ser deflexiones o impulsos iniciales. Un impulso inicial consiste en darle un golpe muy ligero con una duración muy corta de tiempo al elemento de masa del sistema de 1 GDL o aquella parte del sistema que puede oscilar. Un ejemplo de este tipo de perturbación se muestra en la figura a continuación.

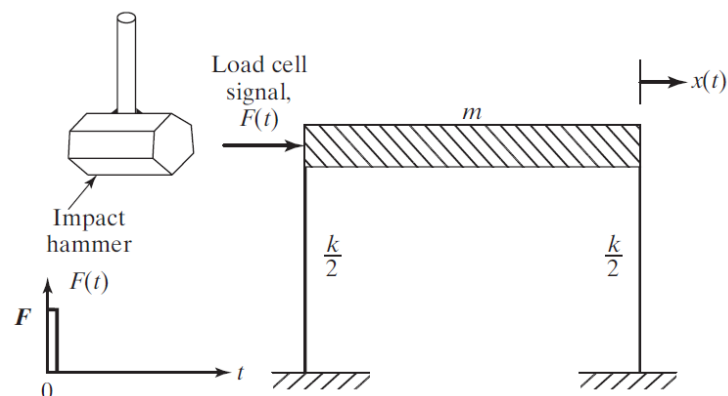


Figura 1. Esquema representativo de un impulso inicial impartido a un sistema de 1 GDL.

Si para la vibración libre puede medirse de forma precisa el intervalo de tiempo que existe entre dos máximos sucesivos de la vibración (también conocido como período natural de vibración), la frecuencia natural del sistema de 1 GDL puede calcularse a través de:

Ecuación 1.
$$\omega = \frac{2\pi}{\tau}$$

Donde ω representa la frecuencia natural de vibración del sistema y τ es el período natural de vibración.

Sistemas de 2 GDL

Para sistemas de 2 GDL, el enfoque es algo distinto. Debido a que cada elemento de masa en dicho sistema puede oscilar con amplitudes y direcciones diferentes, el método más conveniente para medir las 2 frecuencias fundamentales naturales del sistema consiste en tratar de despertar los modos de vibración del mismo (es decir, las formas naturales en que el sistema oscila cuando vibra libremente). De acuerdo a la teoría, para despertar el primer modo generalmente se debe inducir a los elementos de masa a vibrar en fase y para despertar el segundo modo se debe inducir a los elementos de masa a vibrar en desfase (es decir, en direcciones opuestas), lo que comúnmente puede hacerse desplazando a los elementos de masa en las direcciones dictadas por la teoría. Por último, realizando un análisis con la Transformada de Fourier en gráficas de amplitud de vibración vs. frecuencia para el sistema tratado, la frecuencia natural fundamental de cada modo de vibración puede identificarse como aquella que presenta la mayor amplitud de vibración en la gráfica, haciendo posible mediante este método la medición experimental de las frecuencias naturales del sistema.

Parte A: Medición de la frecuencia natural de la estructura de 1 GDL

EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

Para la medición precisa de la frecuencia natural de la estructura de 1 GDL se utilizarán los siguientes equipos:

- Estructura de 1 GDL conformada por un bloque de concreto y columnas de acero.
- Transductores de tipo acelerómetro para la estructura con funciones para determinar además de aceleración y, extensómetros para determinar la deformación unitaria.
- Tarjeta de Arduino Uno para la toma de datos del acelerómetro.
- Sistema de adquisición de datos para los extensómetros.

- Computadora con software para recolectar y mostrar los datos.

PROCEDIMIENTO

- Mida la masa de la estructura, determine por cálculo o consulta de documentos técnicos, las rigideces y constantes de amortiguamiento equivalentes de las columnas de la estructura y calcule analíticamente la frecuencia natural teórica de la estructura.
- Coloque los extensómetros en dos de las varillas (uno extensómetro en cada una); luego monte la estructura con los extensómetros en la mesa vibratoria; por último, acople el acelerómetro sobre la estructura de manera adecuada en un punto representativo de la vibración de esta (en un punto, lo más alto de la estructura) para una correcta toma de datos.
- Conecte adecuadamente la salida de los transductores a los sistemas de adquisición de datos y la salida de los mismos a la computadora.
- Encienda los sistemas de adquisición de datos, los transductores y abra los softwares de recolección de datos en la computadora. Configure los softwares de manera que comiencen a tabular, guardar y mostrar los datos medidos por los transductores a través de gráficas de deformación unitaria vs. Tiempo (con los extensómetros) y, aceleración vs. Tiempo (con el acelerómetro).
- Imparta un pequeño impulso (como un golpe ligero) al bloque de concreto de la estructura y permita que la misma vibre libremente.
- Revise los valores medidos por los transductores a través de las gráficas generadas en los softwares y determine mediante las mismas, el período natural de oscilación como el intervalo de tiempo entre dos máximos sucesivos en las gráficas.
- Calcule la frecuencia natural de oscilación con la ecuación 1 y compárela con el valor antes determinado.

TAREAS FINALES

Una vez terminado todos los pasos del procedimiento, tabule sus resultados, haga un análisis de los mismos y formule conclusiones a partir de sus observaciones. Redacte además un informe acerca de la práctica detallada en este documento.

Parte B: Medición de las frecuencias naturales de la estructura de 2 GDL

EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

Para la medición precisa de las frecuencias naturales de la estructura de 2 GDL se utilizarán los siguientes equipos:

- Estructura de 2 GDL conformada por dos bloques de concreto y columnas de acero.
- Transductores de tipo acelerómetro para la estructura con funciones para determinar además de aceleración y, extensómetros para determinar la deformación unitaria.
- Tarjeta de Arduino Uno para la toma de datos del acelerómetro.
- Sistema de adquisición de datos para los extensómetros.
- Computadora con software para recolectar y mostrar los datos.

PROCEDIMIENTO

- Mida las masas de cada uno de los bloques de la estructura, determine por cálculo o consulta de documentos técnicos, las rigideces y constantes de amortiguamiento equivalentes de las columnas y calcule analíticamente las frecuencias naturales teóricas de la estructura.
- Coloque los extensómetros en dos de las varillas (uno extensómetro en cada una); luego monte la estructura con los extensómetros en la mesa vibratoria; por último, acople el acelerómetro sobre la estructura de manera adecuada en un punto representativo de la vibración de la misma (en un punto, lo más alto de la estructura) para una correcta toma de datos.
- Conecte adecuadamente la salida de los transductores a los sistemas de adquisición de datos y la salida de los mismos a la computadora.
- Encienda los sistemas de adquisición de datos, los transductores y abra los softwares de recolección de datos en la computadora. Configure los softwares de manera que comiencen a tabular, guardar y mostrar los datos medidos por los transductores a través de gráficas de deformación unitaria vs. Tiempo, aceleración vs. Tiempo y, amplitud de vibración vs. Frecuencia.
- Desplace los bloques de concreto de acuerdo a los dos modos de vibración de la estructura predichos por el análisis matemático de la misma y permita que la

- estructura vibre libremente. Generalmente el primer modo se despierta cuando los bloques se desplazan en fase y el segundo modo de vibración se despierta cuando los bloques se desplazan fuera de fase (es decir, en direcciones contrarias).
- Revise los valores medidos por los transductores a través de las gráficas generadas en los softwares y determine mediante las mismas la frecuencia de oscilación de cada modo. Esto puede hacerse observando las gráficas de amplitud vs. frecuencia para cada modo de vibración y teniendo en cuenta que aquella frecuencia que presente el valor más alto de amplitud es la frecuencia fundamental (natural) de dicho modo.
- Compare las frecuencias naturales obtenidas con los valores calculados anteriormente.

TAREAS FINALES

Una vez terminado todos los pasos del procedimiento, tabule sus resultados, haga un análisis de los mismos y formule conclusiones a partir de sus observaciones. Redacte además un informe acerca de la práctica detallada en este documento.

2. GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA VARIACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO DE 1 GDL y 2 GDL

OBJETIVO

- Determinar la frecuencia natural de vibración de un sistema estructural de 1 grado de libertad con amortiguamiento pasivo.
- Determinar las frecuencias naturales de vibración de un sistema estructural de 2 grados de libertad con amortiguamiento pasivo.
- Mostrar las relaciones existentes de las frecuencias naturales y amplitudes relativas de vibración con la masa del sistema a través de la variación de la misma.

MARCO TEÓRICO

La determinación de las frecuencias naturales para sistemas de 1 y 2 GDL con amortiguamiento pasivo se realiza de acuerdo a los fundamentos teóricos y procedimientos utilizados para analizar y medir las frecuencias naturales de sistemas de 1 y 2 GDL convencionales. La diferencia que genera la característica adicional del amortiguamiento pasivo en los sistemas consiste en el hecho de que las frecuencias naturales de un sistema (y, por ende, las amplitudes de dichas vibraciones) dependen de la masa del mismo. En base a ese fundamento, comúnmente se estudia la variación de las frecuencias naturales de una estructura con la masa de esta de manera que pueda encontrarse el valor de masa que genere la menor vibración posible.

Un método para encontrar el valor de masa del sistema que minimice la vibración (y con dicho valor, la cantidad de masa necesaria a agregar a una estructura para alcanzar esta vibración mínima) utiliza gráficas de frecuencia natural vs. masa y gráficas amplitud de vibración vs. masa del sistema. Este enfoque permite descubrir el valor de masa del sistema que produce la menor amplitud de vibración y a su vez, de esta forma, permite conocer el valor de masa que se debería agregar a la estructura para minimizar la vibración.

Parte A: Medición de la frecuencia natural de la estructura de 1 GDL con amortiguamiento pasivo

EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

Para la medición precisa de la frecuencia natural de la estructura de 1 GDL con amortiguamiento pasivo se utilizarán los siguientes equipos:

- Estructura de 1 GDL conformada por un bloque de concreto y columnas de acero.
- Pesas de diferente masa.
- Transductores de tipo acelerómetro para la estructura con funciones para determinar además de aceleración y, extensómetros para determinar la deformación unitaria.
- Tarjeta de Arduino Uno para la toma de datos del acelerómetro.
- Sistema de adquisición de datos para los extensómetros.
- Computadora con software para recolectar y mostrar los datos.

PROCEDIMIENTO

- Mida la masa de la estructura, determine por cálculo o consulta de documentos técnicos, las rigideces y constantes de amortiguamiento equivalentes de las columnas de la estructura y obtenga ecuaciones que relacionen la frecuencia natural y la amplitud de vibración del sistema con la masa del mismo.
- Coloque los extensómetros en dos de las varillas (uno extensómetro en cada una); luego monte la estructura con los extensómetros en la mesa vibratoria; por último, acople el acelerómetro sobre la estructura de manera adecuada en un punto representativo de la vibración de la misma (en un punto, lo más alto de la estructura) para una correcta toma de datos.
- Conecte adecuadamente la salida de los transductores a los sistemas de adquisición de datos y la salida de los mismos a la computadora.
- Encienda los sistemas de adquisición de datos, los transductores y abra los softwares de recolección de datos en la computadora. Configure los softwares de manera que comiencen a tabular, guardar y mostrar los datos medidos por los transductores a través de gráficas de deformación unitaria vs. Tiempo (con los extensómetros) y, aceleración vs. Tiempo (con el acelerómetro).

- Imparta un pequeño impulso (como un golpe ligero) al bloque de concreto de la estructura y permita que la misma vibre libremente.
- Revise los valores medidos por el transductor a través de las gráficas generadas en los softwares y determine mediante las mismas, el período natural de oscilación como el intervalo de tiempo entre dos máximos sucesivos en las gráficas.
- Calcule la frecuencia natural de oscilación con la ecuación que relaciona el período con la frecuencia natural y elabore una tabla en donde se especifique la masa del sistema, la amplitud de vibración y la frecuencia natural obtenida para el valor de masa del sistema correspondiente.
- Varíe la masa del sistema a través de la sujeción de las pesas al bloque de concreto y repita los pasos anteriores.
- Genere una gráfica de deformación unitaria vs. tiempo del sistema a partir de los datos tabulados anteriormente.

TAREAS FINALES

Una vez terminados todos los pasos del procedimiento, tabule sus resultados, haga un análisis de los mismos y formule conclusiones a partir de sus observaciones. Redacte además un informe acerca de la práctica detallada en este documento.

Parte B: Medición de las frecuencias naturales de la estructura de 2 GDL con amortiguamiento pasivo

EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

Para la medición precisa de las frecuencias naturales de la estructura de 2 GDL se utilizarán los siguientes equipos:

- Estructura de 2 GDL conformada por dos bloques de concreto y columnas de acero.
- Pesas de diferente masa.
- Transductores de tipo acelerómetro para la estructura con funciones para determinar además de aceleración y, extensómetros para determinar la deformación unitaria.
- Tarjeta de Arduino Uno para la toma de datos del acelerómetro.
- Sistema de adquisición de datos para los extensómetros.

- Computadora con software para recolectar y mostrar los datos.

PROCEDIMIENTO

- Mida las masas de cada uno de los bloques de la estructura, determine por cálculo o consulta de documentos técnicos, las rigideces y constantes de amortiguamiento equivalentes de las columnas y obtenga ecuaciones que relacionen las frecuencias naturales y amplitudes de vibración del sistema con la masa del mismo.
- Coloque los extensómetros en dos de las varillas (uno extensómetro en cada una); luego monte la estructura con los extensómetros en la mesa vibratoria; por último, acople el acelerómetro sobre la estructura de manera adecuada en un punto representativo de la vibración de la misma (en un punto, lo más alto de la estructura) para una correcta toma de datos.
- Conecte adecuadamente la salida de los transductores a los sistemas de adquisición de datos y la salida de los mismos a la computadora.
- Encienda los sistemas de adquisición de datos, los transductores y abra los softwares de recolección de datos en la computadora. Configure los softwares de manera que comiencen a tabular, guardar y mostrar los datos medidos por los transductores a través de gráficas de deformación unitaria vs. Tiempo, aceleración vs. Tiempo y, amplitud de vibración vs. Frecuencia.
- Desplace los bloques de concreto de acuerdo a los dos modos de vibración de la estructura predichos por el análisis matemático de la misma y permita que la estructura vibre libremente. Generalmente el primer modo se despierta cuando los bloques se desplazan en fase y el segundo modo de vibración se despierta cuando los bloques se desplazan fuera de fase (es decir, en direcciones contrarias).
- Revise los valores medidos por el transductor a través de las gráficas generadas en los softwares y determine mediante las mismas la frecuencia de oscilación de cada modo. Esto puede hacerse observando las gráficas de amplitud vs. frecuencia para cada modo de vibración y teniendo en cuenta que aquella frecuencia que presente el valor más alto de amplitud es la frecuencia fundamental (natural) de dicho modo.

- Tabule las frecuencias naturales y las amplitudes de vibración obtenidas para el valor de masa del sistema correspondiente.
- Varíe la masa del sistema a través de la sujeción de pesas a los bloques de concreto de la estructura y repita los pasos anteriores.
- Genere una gráfica de frecuencia natural vs. masa del sistema a partir de los datos tabulados anteriormente para cada modo de vibración. Obtenga dos ecuaciones que relacionen las frecuencias naturales (medidas) de cada modo del sistema con la masa del mismo y compárelas con las ecuaciones obtenidas a través del análisis matemático del sistema.

TAREAS FINALES

Una vez terminados todos los pasos del procedimiento, tabule sus resultados, haga un análisis de éstos y formule conclusiones a partir de sus observaciones. Redacte además un informe acerca de la práctica detallada en este documento.

Anexo 2

Especificaciones técnicas

a. Acelerómetro ADXL-345

ADXL345

SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 2.5\text{ V}$, $V_{DDIO} = 1.8\text{ V}$, acceleration = 0 g, $C_S = 1\ \mu\text{F}$ tantalum, $C_{IO} = 0.1\ \mu\text{F}$, unless otherwise noted.

Table 1. Specifications¹

Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT					
Measurement Range	Each axis User selectable		$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$		g
Nonlinearity	Percentage of full scale		± 0.5		%
Inter-Axis Alignment Error			± 0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ²			± 1		%
OUTPUT RESOLUTION					
All g Ranges	Each axis 10-bit resolution		10		Bits
$\pm 2\text{ g}$ Range	Full resolution		10		Bits
$\pm 4\text{ g}$ Range	Full resolution		11		Bits
$\pm 8\text{ g}$ Range	Full resolution		12		Bits
$\pm 16\text{ g}$ Range	Full resolution		13		Bits
SENSITIVITY					
Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	Each axis $\pm 2\text{ g}$, 10-bit or full resolution	232	256	286	LSB/g
Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	$\pm 2\text{ g}$, 10-bit or full resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	$\pm 4\text{ g}$, 10-bit resolution	116	128	143	LSB/g
Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	$\pm 4\text{ g}$, 10-bit resolution	7.0	7.8	8.6	mg/LSB
Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	$\pm 8\text{ g}$, 10-bit resolution	58	64	71	LSB/g
Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	$\pm 8\text{ g}$, 10-bit resolution	14.0	15.6	17.2	mg/LSB
Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	$\pm 16\text{ g}$, 10-bit resolution	29	32	36	LSB/g
Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	$\pm 16\text{ g}$, 10-bit resolution	28.1	31.2	34.3	mg/LSB
Sensitivity Change Due to Temperature			± 0.01		%/°C
0 g BIAS LEVEL					
0 g Output for X_{OUT}, Y_{OUT}	Each axis	-150	± 40	+150	mg
0 g Output for Z_{OUT}		-250	± 80	+250	mg
0 g Offset vs. Temperature for x-, y-Axes			± 0.8		mg/°C
0 g Offset vs. Temperature for z-Axis			± 4.5		mg/°C
NOISE PERFORMANCE					
Noise (x-, y-Axes)	Data rate = 100 Hz for $\pm 2\text{ g}$, 10-bit or full resolution		<1.0		LSB rms
Noise (z-Axis)	Data rate = 100 Hz for $\pm 2\text{ g}$, 10-bit or full resolution		<1.5		LSB rms
OUTPUT DATA RATE AND BANDWIDTH					
Measurement Rate ³	User selectable	6.25		3200	Hz
SELF-TEST⁴					
Output Change in x-Axis	Data rate $\geq 100\text{ Hz}$, $2.0\text{ V} \leq V_S \leq 3.6\text{ V}$	0.20		2.10	g
Output Change in y-Axis		-2.10		-0.20	g
Output Change in z-Axis		0.30		3.40	g
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range (V_S)		2.0	2.5	3.6	V
Interface Voltage Range (V_{DDIO})	$V_S \leq 2.5\text{ V}$	1.7	1.8	V_S	V
	$V_S \geq 2.5\text{ V}$	2.0	2.5	V_S	V
Supply Current	Data rate > 100 Hz		145		μA
	Data rate < 10 Hz		40		μA
Standby Mode Leakage Current			0.1	2	μA
Turn-On Time ⁵	Data rate = 3200 Hz		1.4		ms
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		-40		+85	°C
WEIGHT					
Device Weight			20		mg

¹ All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

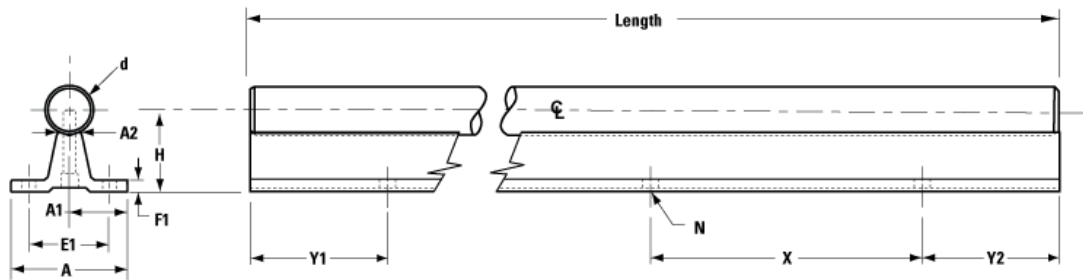
² Cross-axis sensitivity is defined as coupling between any two axes.

³ Bandwidth is half the output data rate.

⁴ Self-test change is defined as the output (g) when the SELF_TEST bit = 1 (in the DATA_FORMAT register) minus the output (g) when the SELF_TEST bit = 0 (in the DATA_FORMAT register). Due to device filtering, the output reaches its final value after $4 \times \tau$ when enabling or disabling self-test, where $\tau = 1/(\text{data rate})$.

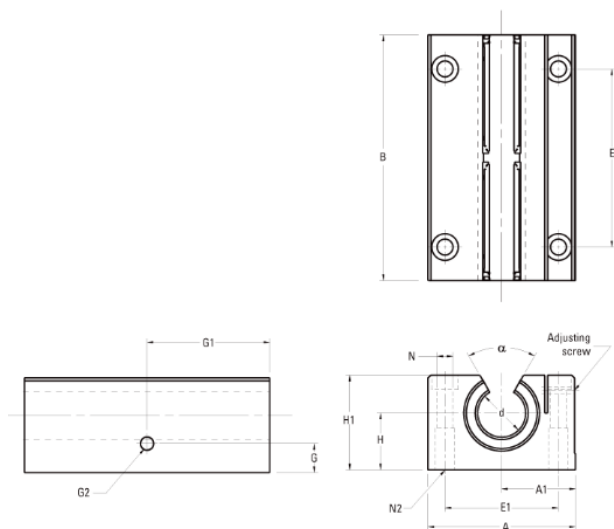
⁵ Turn-on and wake-up times are determined by the user-defined bandwidth. At a 100 Hz data rate, the turn-on and wake-up times are each approximately 11.1 ms. For other data rates, the turn-on and wake-up times are each approximately $\tau + 1.1$ in milliseconds, where $\tau = 1/(\text{data rate})$.

b. Guía Lineal



Dimension	Value
[d] Shaft, Nominal Diameter	20 mm
[A]	56 mm
[A1]	28 mm
[A1] Tolerance	± 0.02 mm
[A2]	11 mm
[E1]	37 mm
[E1] Tolerance	± 0.015 mm
[F1]	6 mm
[H]	38 mm
[H] Tolerance	± 0.02 mm
[N]	6.6 mm
[X] Dim	100 mm
Recommended Bolt	M6

C. Cojinete de bolas



Dimension	Value
[d] Shaft, Nominal Diameter	20 mm
[A]	60 mm
[A1]	30 mm
[A1] Tolerance	± 0.020 mm
[Alpha]	60 °
[B]	104 mm
[E1]	45 mm
[E1] Tolerance	± 0.1 mm
[E2]	76 mm
[E2] Tolerance	± 0.1 mm
[G]	16 mm
[G1]	52 mm
[G2] Access for Lubrication	M8 X1
[H]	25 mm
[H] Tolerance	±0.020 mm
[H1]	41 mm
[N]	6.60 mm

Anexo 3

Códigos

- Código para acelerómetro ADXL-345

```
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <SparkFun_ADXL345.h>
ADXL345 adxl = ADXL345();
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Iniciar");
  Serial.println();
  adxl.powerOn();
  adxl.setRangeSetting(16);    //Definir el rango, valores 2, 4, 8 o 16
}
void loop()
{
  //leer los valores e imprimirlos
  int x, y, z;
  adxl.readAccel(&x, &y, &z);
  Serial.print(x);
  Serial.print(", ");
  Serial.print(y);
  Serial.print(", ");
  Serial.println(z);
}
```

- Código para calibración de acelerómetro

```
*/  
  
#include <Wire.h> // Para la comunicacion I2C  
#include <SPI.h> // Permite la comunicacion periferica del Arduino  
con otros dispositivos  
#include <SparkFun_ADXL345.h> // Libreria del acelerometro  
  
// Se crea un objeto en la clase ADXL345 de la libreria  
ADXL345 adxl = ADXL345();  
  
// El principal objetivo del codigo es para calibrar el  
acelerometro en una posicion determinada,  
// pero para la calibracion primero es necesario obtener los  
valores maximos y minimos de cada eje  
// y despues con la informacion ya obtenida podremos calcular los  
valores que necesitamos para  
// calibrar el sensor  
  
// A continuacion declaramos las variables que se van a utilizar  
  
// Maximo y minimo del eje X  
int AccelMinX = 0;  
int AccelMaxX = 0;  
// Maximo y minimo del eje Y  
int AccelMinY = 0;  
int AccelMaxY = 0;  
// Maximo y minimo del eje Z  
int AccelMinZ = 0;  
int AccelMaxZ = 0;  
  
// Valores finales de cada eje  
int accX = 0;  
int accY = 0;  
int accZ = 0;  
  
// Variables definidas  
// Se modificar los valores una vez que obtengas offset y gain  
#define offsetX -28  
#define offsetY -63.5  
#define offsetZ 255.5  
  
#define gainX 28  
#define gainY 63.5  
#define gainZ 255.5
```

```

// Configuración del ADXL345
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Iniciando la terminal serial
  Serial.println("Calibración del acelerómetro ADXL345");
  Serial.println();

  adxl.powerOn(); // Iniciando el acelerómetro

  // Se configura el rango
  // Los valores aceptados son: 2g, 4g, 8g o 16g
  // Mientras más alto el valor de Gs = Mayor medición de rango
  // Mientras el valor sea más bajo = Mayor sensibilidad :
  adxl.setRangeSetting(1);
}

// Lectura de valores del acelerómetro así como máximos y mínimos
void loop()
{
  Serial.println("Envía cualquier carácter para mostrar los valores");
  while (!Serial.available()){ // Esperando el valor que será
    enviado por serial para continuar
  }
  Serial.println();

  // Obteniendo lectura del acelerómetro
  int x,y,z; // Se crean las variables
  // Se leen los valores del acelerómetro y se almacenan en las variables
  que creamos
  adxl.readAccel(&x, &y, &z);

  // una vez obtenido el valor de los ejes, se procede a obtener los
  máximos y mínimos de cada eje
  // y a continuación son obtenidos condicionando
  if(x < AccelMinX) AccelMinX = x;
  if(x > AccelMaxX) AccelMaxX = x;

  if(y < AccelMinY) AccelMinY = y;
  if(y > AccelMaxY) AccelMaxY = y;

  if(z < AccelMinZ) AccelMinZ = z;
  if(z > AccelMaxZ) AccelMaxZ = z;

  // Una vez obtenidos dichos valores son mostrados en el serial:
  // Mínimos
  Serial.print("Mínimos: ");
  Serial.print("X=");
  Serial.print(AccelMinX);
  Serial.print(" | ");
  Serial.print("Y=");
  Serial.print(AccelMinY);
  Serial.print(" | ");
  Serial.print("Z=");
  Serial.print(AccelMinZ);

```

- Código de Matlab para graficar los datos obtenidos

```
% Graficos obtenidos mediante acelerometros

data=xlsread('PMP2');
acc=fft(data(:,2));
td=data(2,1)-data(1,1);
Fs=1/td;
Df=Fs/length(data(:,1));
freq=0:Df:Ffs/2;
acc=acc(1:fix((length(acc)/2)) +1);
figure(1)
plot(freq,abs(acc))
title('Respuesta en el dominio de la frecuencia')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
xlim([0 25])
ylim([0 6000])
figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(data(:,1),data(:,2))
xlabel('Tiempo (s)')
title('Respuesta en el dominio del tiempo')
subplot(2,1,2)
plot(freq,abs(acc))
title('Respuesta en el dominio de la frecuencia')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
xlim([0 25])
ylim([0 6000])

%Graficas mediante el uso de galgas extensometricas
data=xlsread('PMP2def');
def=fft(data(:,3));
def2=fft(data(:,3));
td=data(2,1)-data(1,1);
Fs=1/td;
Df=Fs/length(data(:,1));
freq=0:Df:Ffs/2;
def=def(1:fix(length(def)/2) +1);
figure(3)
plot(freq,abs(def),'b')
title('Respuesta en el dominio de la frecuencia')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
xlim([0 25])
ylim([0 15000])
figure(4)
ave=mean(data(1:200,2));
subplot(2,1,1)
plot(data(:,1),data(:,2)-ave,'b')
xlabel('Tiempo (s)')
title('Respuesta en el dominio del tiempo')
ylim([-600 600])
xlim([5 15])
subplot(2,1,2)
plot(freq,abs(def),'b')
title('Respuesta en el dominio de la frecuencia')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
xlim([0 25])
ylim([0 15000])
```

Anexo 4

- Planos

Item	Denominación	Cant.	Código	Observación
C-1	Perno Allen M6x1	8	-	-
C-2	Lance horquilla Ms	2	303200005	Marca Thomson
C-3	MSM Support	2	303200011	Marca Thomson

Perfiles estructurales (Correas)

1.12	71,75	70,57
1.11	71,75	66,78
1.10	71,75	15,22
1.9	71,75	11,43
1.8	41,00	70,57
1.7	41,00	66,78
1.6	41,00	15,22
1.5	41,00	11,43
1.4	10,25	70,57
1.3	10,25	66,78
1.2	10,25	15,22
1.1	10,25	11,43

Agujero X Y

Lista de coordenadas

Technical drawing showing dimensions: 823.10, 102.50, 269.50, 396.80, 615.00, 378.00, 86.00, 38.00, 1.12, 1.11, 1.10, 1.19, 1.18, 1.17, 1.16, 1.15, 1.14, 1.13, 1.12, 1.11, 1.10, 1.09, 1.08, 1.07, 1.06, 1.05, 1.04, 1.03, 1.02, 1.01, 1.00, 0.99, 0.98, 0.97, 0.96, 0.95, 0.94, 0.93, 0.92, 0.91, 0.90, 0.89, 0.88, 0.87, 0.86, 0.85, 0.84, 0.83, 0.82, 0.81, 0.80, 0.79, 0.78, 0.77, 0.76, 0.75, 0.74, 0.73, 0.72, 0.71, 0.70, 0.69, 0.68, 0.67, 0.66, 0.65, 0.64, 0.63, 0.62, 0.61, 0.60, 0.59, 0.58, 0.57, 0.56, 0.55, 0.54, 0.53, 0.52, 0.51, 0.50, 0.49, 0.48, 0.47, 0.46, 0.45, 0.44, 0.43, 0.42, 0.41, 0.40, 0.39, 0.38, 0.37, 0.36, 0.35, 0.34, 0.33, 0.32, 0.31, 0.30, 0.29, 0.28, 0.27, 0.26, 0.25, 0.24, 0.23, 0.22, 0.21, 0.20, 0.19, 0.18, 0.17, 0.16, 0.15, 0.14, 0.13, 0.12, 0.11, 0.10, 0.09, 0.08, 0.07, 0.06, 0.05, 0.04, 0.03, 0.02, 0.01, 0.00.

Nota:

1) Remover todas las rebabas y filos cortantes a un radio o bisel de 0,25 a no ser que se especifique lo contrario.

Contenido:	Tuber Generales	Material	Escala	Unid.
	ISO 2168 - m	INDICADOS	1:1	mm

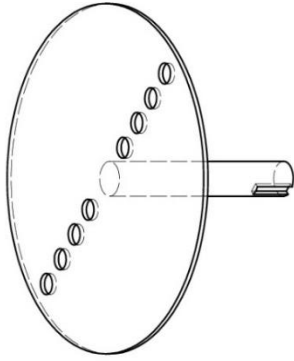
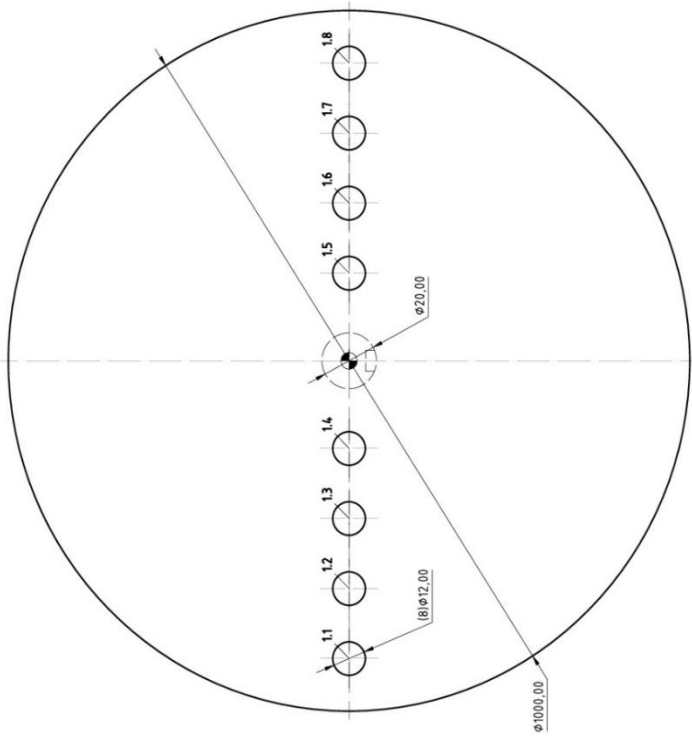
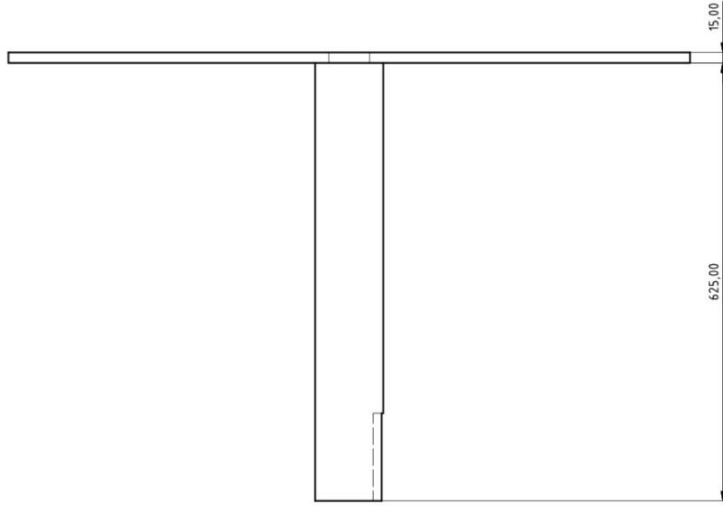
Material	Unid.	Dureza
Aluminio	kg	-
Acero	kg	-
Acero Superior	kg	-
Acero de Librería	kg	-

Nombre de la Parte: BASE

Para soporte de mesa vibratoria

Plano No.: 1

Hoja 1 de 1



1.8	106.25	0
1.7	81.25	0
1.6	56.25	0
1.5	31.25	0
1.4	-31.25	0
1.3	-56.25	0
1.2	-81.25	0
1.1	-106.25	0
Agujero	X	Y

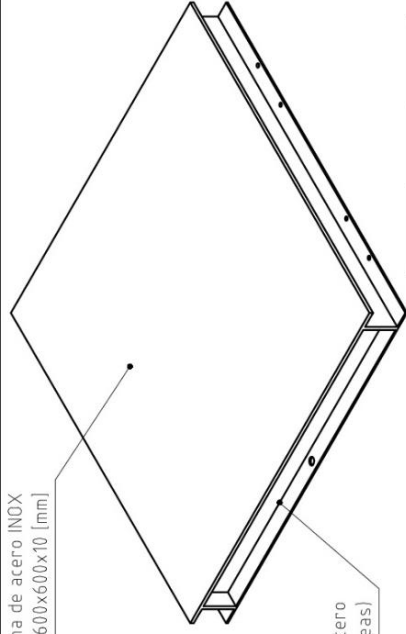
Lista de coordenadas

Nota:

1) Remover todas las rebabas y filos cortantes a un radio o bisel de 0.25 a no ser que se especifique lo contrario.

Comentario	Toler. Generales	Escala	Material	Estado	Grupos
	ISO 2768- mk	1:1	Acero AISI 1045	11	
			Top. Litado		
			Nombre de la Parte		
			Disco		
			Para sujeción de manivela de mesa		
			vibratoria		
			Plano No.:		
			Para integradora		
			PLCP		
Callos	Fecha	Nombre	Sustituya el Plano No.		
			Hoja		
			1 de 1		

Lamina de acero INOX
600x600x10 [mm]

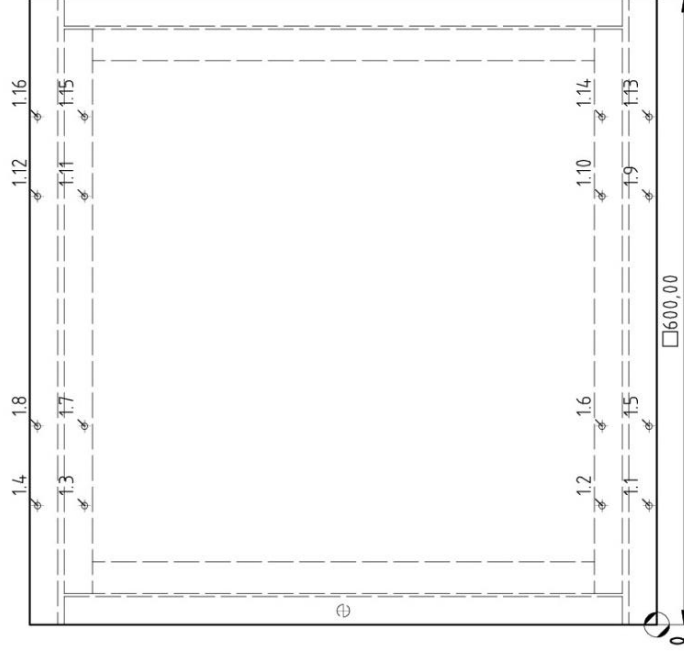
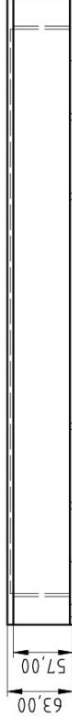


Perfil de acero
estructural (Correas)

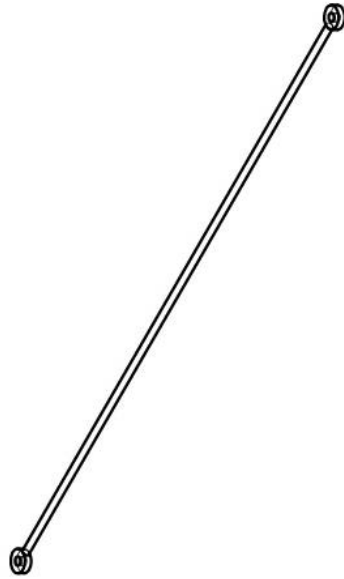
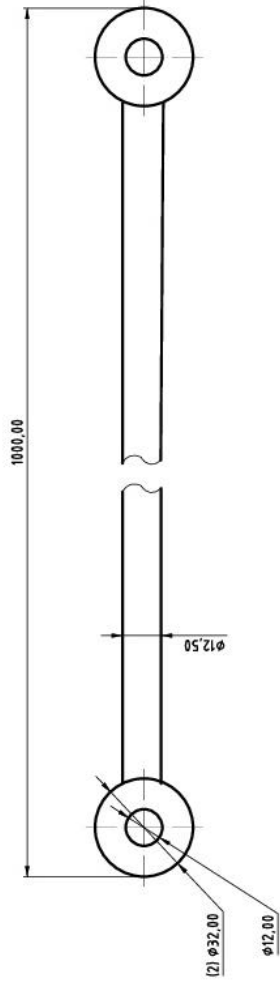
1.16	121.5	14.8.13
1.15	121.5	136.88
1.14	121.5	13.13
1.13	121.5	1.88
1.12	102.5	14.8.13
1.11	102.5	136.88
1.10	102.5	13.13
1.9	102.5	1.88
1.8	47.5	14.8.13
1.7	47.5	136.88
1.6	47.5	13.13
1.5	47.5	1.88
1.4	28.5	14.8.13
1.3	28.5	136.88
1.2	28.5	13.13
1.1	28.5	1.88
Agujero	X	Y
Lista de coordenadas		

Nota:

1.) Remover todas las rebabas y filos cortantes a un radio o bisel de 0,50 a no ser que se especifique lo contrario.



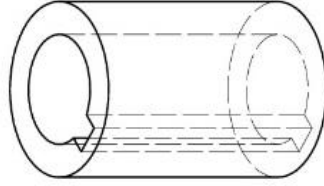
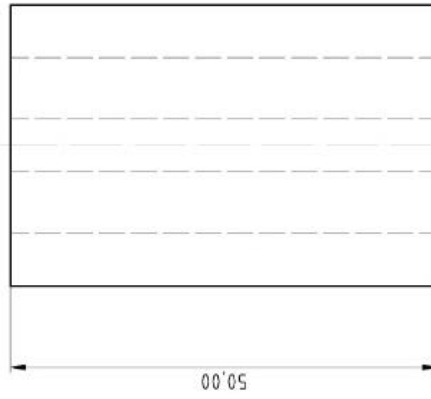
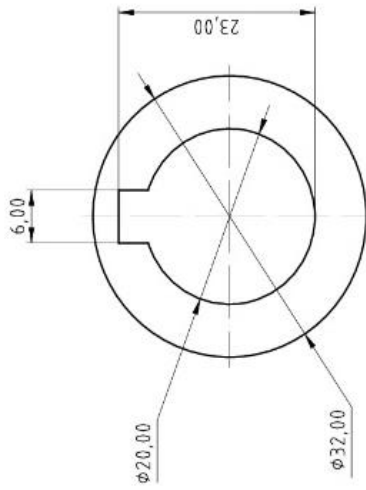
Comentarios:	Toler. Generales	ISO 2768- mk	ESCALA:	1:1	Cotas:	mm
	Dib	2018/09/02	Material:	INDICADOS		
	Rev		Trat. Térmico:	-		
	Aprob		Nombre de la Parte:	Plataforma		
			Nombre de la Parte:	Para de mesa vibratoria.		
			Escuela Superior Politécnica			
			de Litoral			
			Materia Integradora			
			FMCP			
Cambios	Fecha	Nombre	Plano No.:	4		Hoja
			Sustituye al Plano No.:	-		1 de 1



Nota:

1) Remover todas las rebabas y filos cortantes a un radio o bisel de 0.50 a no ser que se especifique lo contrario.

Comentarios:	Toler. Generales:	ISO 2768 - mk	Escala:	1:1	Unidad:	mm.
	Material:	Acero AISI 1045	Trat. Térmico:		Dureza:	
	Fecha:		Nombre de la Parte:	Disco		
	Dib. No.:	A. Doria	Para sujeción de manivela de mesa			
	Revisión:		Escuela Superior Politécnica			
	Fecha:		Plano No.:	4		
	Nombre:		Matrícula Integradora			
			Escuela:			
			Facultad:			
			Departamento:			
			Carácter:			
			Hoja			1 de 1



Nota:

1.) Remover todas las rebabas y filos cortantes a un radio o bisel de 0,50 a no ser que se especifique lo contrario.

Comentarios:		Toler. Generales ISO 2768 - mK	Escala: 2:1	Cotas: mm
		Dib. 2018/09/02	Material: Acero AISI 1045	Dureza: -
		Rev. Aprob.	Trat. Térmico: -	
		Fecha	Nombre de la Parte:	
		2018/09/02	A. Davila	BCCIN
		Escuela Superior Politécnica de Litoral	Para de mesa vibratoria.	
		Materia Integradora PHCP	Piano No.:	5
Cambios		Fecha	Nombre	Sustituye al Plano No. -
				Hoja 1 de 1