SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

DIRECCIÓN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas., 07/OCTUBRE/2011

OFICIO NUM. DEP-CT-125/2011

C. **MARCO ANTONIO VILLARREAL VELÁZQUEZ**
PASANTES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
EGRESADO DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ.-
P R E S E N T E.

Habiendo recibido la comunicación de su trabajo profesional por parte de los CC. ING. RUTILO MORALES ÁLVAREZ, ING. LORENZO MARCIANO VÁZQUEZ, ING. JOSÉ MANUEL RASGADO BEZARES y M. en C. ROBERTO CARLOS GARCÍA GÓMEZ, en el sentido que se encuentra satisfactorio el contenido del mismo como prueba escrita, **AUTORIZO** a Usted a que se proceda a la impresión del mencionado Trabajo denominado:

"DESARROLLO DE BASES PARA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS TRIAXIALES Y BASE PARA LA CALIBRACIÓN DE LA SENSIBILIDAD TRANSVERSAL DE ACELERÓMETROS"

Registrado mediante la opción:
X (MEMORIA DE RESIDENCIA PROFESIONAL)

A T E N T A M E N T E
"CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON SENTIDO HUMANO"

Vo. Bo.

Ing. Roberto Cifuentes Villafuerte
Jefe de la División de Estudios Profesionales

Ing. José Luis Herrera Martínez
Director

Secretaría de Educ. Pública
Instituto Tecnológico
de Tuxtla Gutiérrez
Div. de Est. Profesionales

C.c.p.- Departamento de Servicios Escolares
C.c.p.- Expediente
I'JLHM/I'RCV/L'ORC

DEDICATORIAS

A Dios

Por colmarme de bendiciones siempre, por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante para mí, por darme las fuerzas para no desfallecer en este largo caminar lleno de adversidades.

A Mis Padres Celia y José Viliulfo

Por que siempre me han apoyado a alcanzar mis sueños, por que a pesar de estar lejos me animaron para seguir adelante. Por su infinito amor y cariño. Por hacerme sentir siempre orgulloso de ser su hijo… y por que los amo.

A Mi hermano José Miguel:

Por escucharme cuando más lo he necesitado, por los buenos y malos momentos que hemos pasado y superado juntos, por mi infancia gratamente feliz, por ser único y especial… y por el amor y respeto que le tengo como mi hermano mayor.

A Mi novia Iris Melissa

Por hacer que todo este esfuerzo halla valido la pena, por su eterna sonrisa que me enseña a sonreír cuando olvido hacerlo, por cuidar de mí y ayudarme a levantarme cuando tropiezo. Y por que jamás alcanzarán las palabras para agradecerle en esta vida su eterno amor.

A Mis abuelitos Margarita y José Domingo

Por que estando fuera jamás dejé de pensar en ellos cuando pasaban por la enfermedad que poco a poco nos los arrebató. Por que no pude ir a despedirme de ellos como se debía ni pude decirles adiós como merecían por estar tan lejos de mi casa… ni pude estar con mi familia en esos momentos difíciles que sufrimos su pérdida.

AGRADECIMIENTOS

A mis maestros que día a día hicieron de mi un profesionista y forjaron mi temple y carácter como ingeniero, que me enseñaron tantas cosas y tantas otras no, pero que siempre los tendré en mente a donde vaya.

A mis amigos que estando lejos de mi familia me acobijaron y me hicieron sentir parte de la suya, a Hugo a Toño y a Carlos en especial, que con su buen sentido del humor y particular forma de ver y vivir la vida me hicieron pasar momentos inolvidables.
A mis compañeros de la carrera que con su competitividad hicieron que fuera más dedicado al estudio, y que pasamos tantas cosas juntos en cada clase.
A las personas que me apoyaron estando en Querétaro en mi residencia profesional, a mi asesor externo Ing. Rafael Martínez padilla y a mi amigo y colega mecánico M. en C. Carlos José Velázquez R. quejunto con su esposa siempre nos ha tendido una mano.
A mis amigos de la prepa que veo cada año pero que pareciera que nunca nos hemos dejado de ver.
Me gustaría agradecerle a muchas personas pero siempre es difícil poder mencionar a todas, agradezco a todas las personas que alguna vez me han ayudado y me han abierto las puertas de su casa y brindado su amistad incondicional.

"Donde quiera que se hallen las huellas del Maestro, allí los oídos del que está pronto para recibir sus enseñanzas se abrirán de par en par. Cuando el oído es capaz de escuchar, entonces vendrán los labios que habrán de llenarlos de sabiduría"

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

TRABAJO PROFESIONAL

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

QUE PRESENTA:

MARCO ANTONIO VILLARREAL VELÁZQUEZ

CON EL TEMA:

""DESARROLLO DE BASES PARA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS TRIAXIALES Y BASE PARA CALIBRACIÓN DE LA SENSIBILIDAD TRANSVERSAL DE ACELERÓMETROS"

MEDIANTE:

OPCION X
(MEMORIA DE RESIDENCIA PROFESIONAL)

TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS NOVIEMBRE 2011

INDICE

Resumen III
Summary IV
Introducción V
Índice de tablas VI
Índice de figuras VII
Nomenclatura IX
Glosario XI

Capítulo I. Marco de Referencia 1
1.1 Antecedentes 2
1.2 Objetivos 3
1.2.1 Objetivo General 3
1.2.2 Objetivo Específico 3
1.3 Justificación 3
1.4 Plan de trabajo 4

Capítulo II. Aspectos Generales de la Empresa 5

2.1 Centro Nacional de Metrología 6
2.1.1 Descripción 6
2.1.2 Misión 7
2.1.3 Áreas de CENAM 7
2.1.4 Organigrama 8
2.1.5 Ubicación 9
2.1.6 Sistema de gestión de calidad en CENAM 10
2.1.7 Fundamento legal para emitir certificados 10
2.1.8 Servicios 11
2.1.9 Limitaciones 11
2.2 Dirección de Metrología Física 12

2.2.1 División de Vibraciones y Acústica 12

Capitulo III. Marco Teórico 14

3.1 Sistema internacional de unidades 15
3.2 Sistema inglés de unidades 16
3.3 Metrología 17
3.3.1 Patrón 17
3.3.2 Trazabilidad 17
3.4 Vibraciones mecánicas 18
3.5 Transductores de vibración 21
3.6 Acelerómetro 22
3.6.1 Principio de funcionamiento 22
3.6.2 Sensibilidad del acelerómetro 27
3.6.3 Linealidad 27
3.6.4 Sensibilidad transversal 28
3.6.5 Resonancia 28
3.6.6 Tipos de acelerómetros 29
3.6.7 Aplicaciones 32
3.7 Medición de la vibración 33
3.8 Calibración de acelerómetros y métodos de calibración 34
3.8.1 Métodos primarios 35
3.8.2 Métodos secundarios 36
3.9 Montaje de los transductores 37
3.9.1 Técnicas de montaje 37
3.10 Excitadores de vibración 38
3.11 Método del elemento Finito 40
3.11.1 Conceptos generales 40
3.11.2 Etapas de aplicación con el software ANSYS 42

Capítulo IV. Diseño de dispositivo 45

4.1 Diseño 46

4.2 Metodología de diseño 47
4.3 Síntesis 49
4.4 Diseño creativo del dispositivo 53
4.5 Selección del dispositivo 55
4.6 Análisis de esfuerzos y deformaciones 58
4.6.1Dispositivo para acelerómetro cúbico 58
4.6.2 Dispositivo para mini acelerómetro 62
4.7 Modelado del dispositivo 67
4.7.1 Validación del método 67
4.7.2 Cálculos de las frecuencias naturales de las piezas diseñas 77

Capítulo V Pruebas a los prototipos 84
5.1 Montaje del acelerómetro 85
5.2 Cálculos previos y equipos utilizados 86
5.3 Resultados de la obtención de la sensibilidad 87

RESUMEN

El trabajo presentado se relaciona con los acelerómetros triaxiales que son transductores de vibración y determinan aceleración a partir de la misma, y trata sobre el diseño mecánico de dispositivos de montaje para dichos transductores. Las mediciones o en este caso calibraciones se logran sometiendo a los acelerómetros a vibraciones provocadas por excitadores de vibración (shaker) en las cuales un buen montaje de los acelerómetros aseguran errores mínimos en las mediciones, por lo que como parte inicial para el desarrollo de este trabajo se toman en consideración los dispositivos existentes en los laboratorios de la división de vibraciones y acústica del Centro Nacional de Metrología, al igual de los que se usan en la industria.

En primera, en el trabajo se expone la información sobre vibraciones mecánicas para entender seguidamente que son los acelerómetros y sus principios de funcionamientos, además se revisa de manera breve lo que se busca con la calibración y técnicas de calibración de acelerómetros.

El diseño es parte medular para el desarrollo de los dispositivos, por lo cual se describe a grandes rasgos lo que implica el proceso diseño, para después mostrar las piezas a las cuales se llegó siguiendo tal proceso. En importancia se recalcan los análisis de esfuerzos y deformación para las piezas mecánicas mediante el software SOLIDWOKS® para prever fallas y rupturas, a su vez se hace el análisis de vibración mediante el software ANSYS WORKBENCH® para encontrar las frecuencias modales y los modos de vibración con lo cual se anticipa el comportamiento del dispositivo en condiciones de trabajo para estar seguros de que la pieza no entre en resonancia al someterse a las frecuencias requeridas en los laboratorios.

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

SUMMARY

The presented work is related to triaxial accelerometers, which are vibration transductors and determine acceleration starting from it, and deals with the mechanical design of montage devices for the mentioned transductors. The measurements, or in this case, calibrations are obtained subjecting accelerometers into vibrations caused by “shakers”, in which a good montage of the accelerometers guarantee minimum mistakes in the measurements, so as initial part for the course of this work, existing devices in the “División de Vibraciones y Acústica del Centro Nacional de Metrología” laboratories are considered, similar to the ones used in the industry.

In the first part, information concerning mechanical vibrations is exposed to immediately understand what accelerometers and their function principles are. Also, what is being searched for is briefly checked with the calibrations and accelerometer calibration techniques.

The design is a fundamental part for device development; therefore what implies design process is broadly described and then the final pieces following that process are shown. Effort analysis and mechanical piece deformation through SOLIDWOKS® software is emphasized to anticipate failure and breach. In the meantime, vibration analysis through ANSYS WORKBENCH® software is made to find modal frequency and vibration modes, anticipating device behavior in work conditions to make sure the piece does not get into resonance when it is put into required frequencies in laboratories.

INTRODUCCIÓN

Las vibraciones mecánicas es uno de los fenómenos físicos que se presenta en la vida cotidiana, sin embargo al igual que muchos fenómenos las vibraciones pasan desapercibidas por la mayoría de las personas sin saber que su entendimiento y estudio aplicado ha repercutido en la gama de aparatos e instrumentos inventados y usados hoy en día por el hombre, de los cuales resaltan los transductores de vibración que basan su funcionamiento en los principios de las vibraciones mecánicas.

Los acelerómetros miden vibraciones mecánicas y determinan la aceleración que éstas produce, siendo este motivo por lo que han sido de gran importancia en el desarrollo de la industria y de otros sectores relacionados como la medicina. Estos instrumentos de medición se aplican y combinan sus funciones para distintos fines, por mencionar uno es el uso en las grandes fabricas en donde se encuentran maquinas que por su naturaleza y funcionamiento producen vibraciones, para lo cual en este caso el mantenimiento predictivo hace uso de la medición de las vibraciones y los rangos de velocidades y aceleraciones por medio de acelerómetros para saber si el intervalo en que se trabaja está dentro de lo aceptable o es excesivo pudiendo dañar a ducha maquina. Por lo cual en todas las aplicaciones de los transductores de vibración, se debe tener la certeza de que lo que se está midiendo es un valor real y no un valor errado, es donde se hace importante que la calibración de dichos aparatos cumpla con las normas de errores e incertidumbres , cual responsabilidad radica en los laboratorios primarios como el Centro Nacional de Metrología, en donde se llevan a cabo la calibración de acelerómetros mediante calibración primaria y secundaria con uso de los patrones con los que cuenta.

Se hace entonces primordial que al realizar calibraciones se obtengan errores pequeños, pero en la mayoría de las ocasiones el montaje de acelerómetros juega un papel importante para disminuir esos errores. Bien entonces un buen diseño de los dispositivos de montaje son parte importante para que las calibraciones tengan un resultado satisfactorio.

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
Tabla 1.1 Gráfica de Gantt	4
Tabla 3.1 Limites de frecuencias de transductores de vibraciones típicos	33
Tabla 4.1 Descripción de la Metodología	48
Tabla 4.2 Características generales de acelerómetros triaxiales	49
Tabla 4.3 Resultados de las frecuencias naturales calculadas	69
Tabla 4.4 Propiedades de material	71
Tabla 4.5 Especificaciones de intervalos de análisis para validación	72
Tabla 4.6 Resultados de las frecuencias de los modos para la validación	74
Tabla 4.7 resultados de comparación de frecuencias	75
Tabla 4.8 Propiedades del Acero inoxidable	78
Tabla 4.9 Especificaciones de intervalos de análisis	79
Tabla 4.10 Resultados de las frecuencias	79
Tabla 4.11 Frecuencias caracterizadas para calibración	80
Tabla 4.12 Propiedades del Aluminio	81
Tabla 4.13 Especificaciones de intervalos de análisis	82

Tabla 4.14 Resultados de las frecuencias 83

Tabla 5.1Torque requerido recomendado 86

Tabla 5.2 Equipos usados para las mediciones 87

Tabla 5.3 Datos para el registro de las mediciones 87

Tabla 5.4 Resultados de la sensibilidad obtenida con el prototipo 88

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA PÁGINA

Fig. 2.1 Organigrama de CENAM 8

Fig. 2.2 Mapa de ubicación 9

Fig. 3.1 Cadena de trazabilidad 17

Fig. 3.2 Movimiento Armónico 19

Fig. 3.3 Fases del desplazamiento, velocidad y aceleración 20

Fig. 3.4 unidad sísmica 22

Fig. 3.5 Respuesta de un instrumento medidor de vibraciones 24

Fig. 3.6 Error de aceleración contra frecuencia con ξ como parámetro 25

Fig. 3.7 Acelerómetro Piezoeléctrico 26

Fig. 3.8 Diferencia entre el comportamiento real del acelerómetro 27

Fig. 3.9 Distintos acelerómetros 31

Fig. 3.10 Arreglo interferométrico Michelson 35

Fig. 3.11 Medición de velocidad angular por Interferometría 35

Fig. 3.12 montaje cara a cara para calibración secundaria 36

Fig. 3.13 Técnicas de montajes disponibles 38

Fig. 3.14 Excitador de vibraciones 39

Fig. 3.15 Software ANSYS 42

Fig. 3.16 Tipos de elementos. 43

Fig. 4.1 Metodología de diseño a seguir 47

Fig. 4.4 Dispositivo para acelerómetro cubico 53

Fig. 4.5 Dispositivo para mini acelerómetros 53

Fig. 4.6 Base ajustable 54

Fig. 4.7 base para único acelerómetro 55

Fig. 4.8 Dispositivo para mini acelerómetro 56

Fig. 4.9 Base modificada 57

Fig. 4.10 Fuerza distribuida 58

Fig. 4.11 Fallo de la pieza 59

Fig. 4.12 Esfuerzos principales 59

Fig. 4.13 Deformaciones 60

Fig. 4.14 Fuerza distribuida 60

Fig. 4.15 Fallo de la pieza 60

Fig. 4.16 Esfuerzos principales 61

Fig. 4.17 Deformaciones 61

Fig. 4.18 acoplamiento rígido 62

Fig. 4.19 Fuerzas aplicada en la cara superior 62

Fig. 4.20 Fallas o rupturas de la pieza 63

Fig. 4.21 Esfuerzos de Von mises del molde 63

Fig. 4.22 Deformaciones del molde 64

Fig. 4.23 Fuerzas aplicadas en cara inferior 64

Fig. 4.24 Rupturas o fallos del molde 65

Fig. 4.25 Esfuerzos de Von mises 65

Fig. 4.26 Deformaciones del molde 66

Fig. 4.27 Placa a validar 67

Fig. 4.28 Espacio de trabajo en ANSYS 70

Fig. 4.29 Geometría para analizar en la validación 71

Fig. 4.30 mallado para figura de validación 72

Fig. 4.31 Grafica de modos vs frecuencia de la validación 73

Fig. 4.32 Modo 16 75

Fig. 4.33 Modo 43 76

Fig. 4.34 Modo 84 76

Fig. 4.35 Pantalla del archivo en ANSYS 77

Fig. 4.36 Geometría para analizar 77

Fig. 4.37 Mallado de la pieza 78

Fig. 4.38 Grafica de modos vs frecuencia 79

Fig. 4.39 Modo 7 80

Fig. 4.40 Geometría para analizar 81

Fig. 4.41 Mallado de la pieza 82

Fig. 4.42 Grafica de modos vs frecuencia 83

Fig. 4.43 Modo de vibración próxima a cero 84

Fig. 5.1 Dispositivo acoplado al acelerómetro y a la placa de montaje 85

Fig. 5.2 Montaje en el Excitador de vibraciones 85

Fig. 5.3 Comparación de la sensibilidad del acelerómetro a 0º y 180º 89

Fig. 5.4 Comparación de la sensibilidad usando el dispositivo y usando adhesivo 89

NOMENCLATURA

A	Amplitud de la vibración
ω	Frecuencia circular
t	Tiempo
X	Desplazamiento del movimiento armónico
$\dot{X}$	Velocidad del movimiento armónico
$\ddot{X}$	Aceleración del movimiento armónico
f	Frecuencia de un sistema
ω_n	Frecuencia natural circular
$\boldsymbol{\tau}$	Periodo de la vibración
x	Desplazamiento
dx	Diferencial de desplazamiento
A	Área de sección transversal
P	Fuerza
E	Modulo de elasticidad
ρ	Densidad
c	Constante de amortiguamiento
l	Longitud
n	Número de modos
π	Constante Pi(3.1416)
f_n	Frecuencia natural de un sistema

m	masa
k	Constante de rigidez
Φ	Angulo de fase
ξ	Factor de amortiguamiento

GLOSARIO

Amplificador	Todo dispositivo que mediante la utilización de energía, magnifica la amplitud de un fenómeno intensidad sonora.
Amplitud	Distancia del punto medio al máximo (cresta) de una onda o al mínimo (valle).
Calibración	Proceso de comparar las mediciones de un instrumento con los de un patrón o estándar.
Dispositivo	Mecanismo o artificio dispuesto para producir una acción prevista.
Electrodinámico	Referente a la electrodinámica que trata de la evolución temporal en sistemas donde interactúan campos eléctricos y magnéticos con cargas en movimiento.
Esfuerzo de Von Mises	Son los esfuerzos máximos que puede resistir un elemento mecánico y de acuerdo con este criterio una pieza resistente o elemento estructural falla cuando en alguno de sus puntos la energía de distorsión por unidad de volumen rebasa un cierto umbral.
Fase	Posición relativa en un movimiento cíclico u ondulatorio, se expresa como un ángulo, un ciclo o una longitud de onda correspondiente a 180º.
Forma modal	Forma en que se deforman los cuerpos bajo efectos de la vibración.
Frecuencia	Frecuencia es una medida que se utiliza generalmente para indicar el número de repeticiones de cualquier fenómeno o suceso periódico en la unidad de tiempo.
Impedancia	Oposición que representa un componente o componentes al paso de la corriente alterna.

Interferometría	La interferometría es una técnica que consiste en combinar la luz proveniente de diferentes receptores, obtener una imagen de mayor resolución.
Matriz	Conjunto de números o símbolos algebraicos colocados en líneas horizontales y verticales y dispuestos en forma de rectángulo.
Oscilación	Efectuar movimientos de vaivén a la manera de un péndulo o de un cuerpo colgado de un resorte o movido por él.
Rigidez	Capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos.
Ruido	Se considera ruido a todas las perturbaciones eléctricas que interfieren sobre las señales transmitidas o procesadas.
Transductor	Término general para un dispositivo que recibe información en forma de uno o más cuantificadores físicos, modificadores de información y/o su forma si requiere, y produce una señal de salida resultante.
Validación	Es la confirmación por examen y la provisión de evidencia objetiva de que se cumplen los requisitos particulares para un uso específico propuesto

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

CAPITULO 1

MARCO DE REFERENCIA

1.1 ANTECEDENTES

La medición de vibraciones mecánicas ha sido importante en aplicaciones como sismología, y en el comportamiento dinámico de estructuras como edificios, puentes y presas. Las vibraciones también inciden en aspectos de salud de las personas.

La calibración de transductores que miden estas vibraciones, en la división de vibraciones y acústicas, se presenta de manera frecuente dentro de los servicios que se llevan a cabo en los distintos laboratorios de esta división, los ingenieros encargados de dichos servicios son responsables de las mediciones efectuadas y certificadas por CENAM hacia las empresas externas. Dentro de la gama de transductores de vibración que los metrólogos calibran, la calibración de acelerómetros por el método de comparación es uno de los servicios más recurrentes por parte de la industria y el cual se lleva a cabo en el Laboratorio de Patrones de Transferencia, donde uno de los factores importantes de los errores que se pueden producir al calibrar radica en el dispositivo de montaje utilizado.

En el Laboratorio de Patrones de Transferencia se han desarrollado distintos dispositivos de montajes con la finalidad de poder llevar a cabo los montajes de acelerómetros, los cuales se han ido modificando por las necesidades de los metrólogos para disminuir los errores de calibración debidos al montaje del transductor en la calibración y para ayudar a que el montaje se facilite.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Debido a que durante la calibración de acelerómetros triaxiales, se pueden generar errores a causa de deficiencias en el montaje se planea desarrollar un accesorio que facilite el montaje y reduzca los errores de calibración. A su vez se planea desarrollar otro dispositivo mecánico para calibrar la sensibilidad transversal de acelerómetros.

1.2.2 Objetivo Específico

Se diseñará la pieza con la ayuda de software que usa la teoría de elemento finito Solidworks, así como el análisis mecánico y simulación del comportamiento vibratorio con ayuda del programa ANSYS.

Se realizarán pruebas experimentales en condiciones de trabajo para monitorear su comportamiento y validar la pieza.

Se comprobarán resultados de la pruebas experimentales contra las pruebas simuladas y se emitirán conclusiones, recomendaciones. Al igual la mención de los beneficios de éste proyecto.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La realización del proyecto se hace importante en primera instancia por el desarrollo de un nuevo dispositivo de montaje debido a las necesidades internas de la división de

vibraciones y acústica al calibrar acelerómetros triaxiales que no tienen barreno roscado para opresor de montaje; en segunda, porque permite aplicar al alumno de ingeniería los conocimientos adquiridos durante su preparación estudiantil y desarrollar la capacidad de llevar a cabo proyectos con aplicación real.

1.4 PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo se muestra en la Tabla 1.1, en la cual se indica con exactitud los tiempos programados y reales en el desarrollo del proyecto, así como la secuencia de las actividades del proyecto.

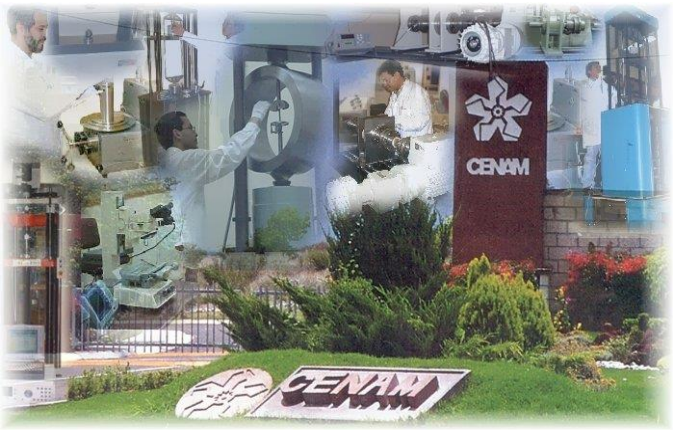
Secuencia	Actividad		Semanas																			
			Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Conocimiento general de la calibración de acelerómetros y acelerómetros triaxiales.	P																				
		R																				
2	Monitoreo de acelerómetros y acelerómetros triaxiales de trabajo	P																				
		R																				
3	Diseño, fabricación e implementación de un accesorio para montaje de acelerómetros triaxiales y otro de calibración de sensibilidad	P																				
		R																				

4	Caracterización de los accesorios desarrollados.	P																					
		R																					
5	Implementación de los accesorios desarrollados en las calibraciones de patrones de trabajo monitoreados.	P																					
		R																					

Tabla 1.1 Gráfica de Gantt

2.1 CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

2.1.1 Descripción



El Centro Nacional de Metrología, CENAM, fue creado con el fin de apoyar el sistema metrológico nacional como un organismo descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propios, de acuerdo al artículo 29 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, publicada en el Diario Oficial de la Federación del 1 de julio de 1992, y sus reformas publicadas en el Diario Oficial de la Federación del 20 de mayo de 1997.

El CENAM es el laboratorio nacional de referencia en materia de mediciones. Es responsable de establecer y mantener los patrones nacionales, ofrecer servicios metrológicos como calibración de instrumentos y patrones, certificación y desarrollo de materiales de referencia, cursos especializados en metrología, asesorías y venta de publicaciones. Mantiene un estrecho contacto con otros laboratorios nacionales y con organismos internacionales relacionados con la metrología, con el fin de asegurar el reconocimiento internacional de los patrones nacionales de México y, consecuentemente, promover la aceptación de los productos y servicios de nuestro país.

El CENAM cuenta con un Consejo Directivo integrado por el Secretario de Economía, los subsecretarios cuyas atribuciones se relacionen con la materia, de las Secretarías de Hacienda y Crédito Público; Energía; Educación Pública; Comunicaciones y Transportes; un representante de la Universidad Nacional Autónoma de México; un representante del Instituto Politécnico Nacional; el Director General del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; siendo los representantes de la Confederación Nacional de Cámaras Industriales; de la Cámara Nacional de la Industria de Transformación y de la Confederación Nacional de Cámaras de Comercio y el Director General de Normas de la Secretaría de Economía.

2.1.2 Misión

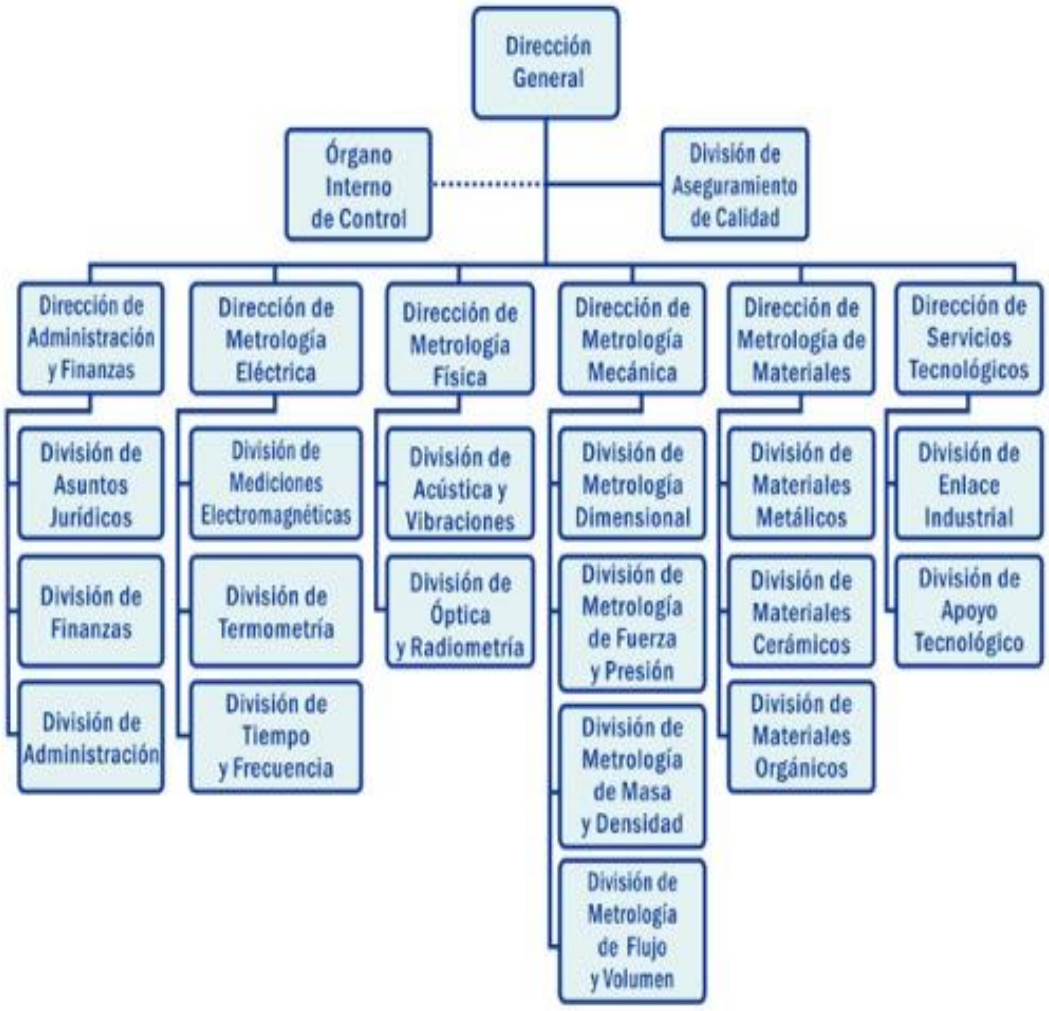
Apoyar a los diversos sectores de la sociedad en la satisfacción de sus necesidades metrológicas presentes y futuras, estableciendo patrones nacionales de medición, desarrollando materiales de referencia y diseminando sus exactitudes por medio de servicios tecnológicos de la más alta calidad, para incrementar la competitividad del país, contribuir al desarrollo sustentable y mejorar la calidad de vida de la población.

2.1.3 Áreas del CENAM

- Metrología Eléctrica
- Metrología Física
- Metrología de Materiales
- Metrología Mecánica
- Servicios Tecnológicos

2.1.4 Organigrama

Fig. 2.1



Organigrama de CENAM

2.1.5 Ubicación

Dirección: km 4.5 carretera a los Cués municipio el marqués 76241 Querétaro, México.

Teléfono: (442) 211-05-00 al 04

Email: webmaster@cenam.mx.

Fig. 2.2 Mapa de

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

ubicación

2.1.6 Sistema de Gestión de Calidad en CENAM

El Centro Nacional de Metrología es una organización que valora como uno de sus principios fundamentales la búsqueda de la excelencia en todas sus actividades, de manera que se incrementen los beneficios que ofrece a la sociedad.

Como una herramienta para apoyar este principio, el CENAM ha adoptado un sistema de gestión de calidad que hace uso de las normas mexicanas NMX-EC-17025-IMNC-2006, “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración” (equivalente a la norma ISO/IEC 17025), NMX-CH-164-IMNC-2006, "Materiales de referencia – Requisitos generales para la competencia de productores de materiales de referencia" (equivalente a la Guía ISO 34), NMX-EC-043-IMNC-2005 "Requisitos generales para los ensayos de aptitud por comparaciones interlaboratorios" (equivalente a la Guía ISO 43), NMX-CC-9001-IMNC-2008, "Sistemas de gestión de calidad – Requisitos" (equivalente a la norma ISO 9001:2008) y NMX-SAA-14001-IMNC-2004 "Sistema de gestión ambiental- Requisitos con orientación para su uso" (equivalente a la norma ISO 14001:2004).

Este sistema de gestión es administrado por el cuerpo directivo del CENAM (Director General y Directores de Área), asistido por los jefes de división y coordinadores científicos, así como por personal del Centro con amplia experiencia y capacitación en auditorías de sistemas de calidad de laboratorios de calibración y de pruebas.

2.1.7 Fundamento legal para emitir certificados

El CENAM es el laboratorio primario del Sistema Nacional de Calibración y está autorizado para emitir certificados de calibración y para certificar materiales de referencia de acuerdo a lo establecido en las fracciones III y V del artículo 30 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

2.1.8 Servicios

Los servicios que ofrece el CENAM son:

• Calibración
• Materiales de referencia
• Programa de materiales de referencia trazables certificados
• Análisis de alta confiabilidad
• Capacitación en Metrología
• Asesorías
• Programa Mesura
• Ensayos de aptitud técnica
• Venta de publicaciones técnicas

2.1.9 Limitaciones

- El CENAM no recibirá reclamaciones pasados noventa (90) días, a partir de la fecha de recepción del servicio por parte del cliente.
- Los resultados de las mediciones realizadas en el curso de los servicios de calibración y análisis de alta confiabilidad, solo reflejan el valor del mensurando en el momento de su realización. El CENAM garantiza que este valor fue obtenido siguiendo procedimientos válidos pero no se hace responsable de la variación en el tiempo que pudiera sufrir dicho mensurando.
- El CENAM no se hace responsable por daños o perjuicios que se pudieran ocasionar debido al mal uso que se le dé a instrumentos o patrones de medición calibrados por el CENAM o a materiales de referencia certificados por el CENAM.

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

2.2 DIRECCIÓN DE METROLOGÍA FÍSICA

- División de Vibraciones y Acústica
- División de Óptica y Radiometría

Esta Dirección tiene como principal finalidad establecer patrones de medida para fenómenos relacionados con la generación y propagación de formas de energía ondulatoria. Dentro de la Dirección de Metrología Física, la División de Óptica y Radiometría se ocupa de los fenómenos relacionados con las radiaciones electromagnéticas del espectro ultravioleta, visible e infrarrojo, y la División de Vibraciones y Acústica de las actividades relativas a las vibraciones mecánicas y las ondas elásticas, cuyo conocimiento y aplicaciones son imprescindibles para la modernización industrial de nuestro país.

Dada la carencia en nuestro país de laboratorios de metrología secundarios en estas áreas, una de las principales tareas de esta Dirección ha sido la de fomentar su creación de acuerdo a la demanda. Actualmente se cuenta con un laboratorio acreditado en acústica y se está en proceso de consolidar tres laboratorios en radiometría.

2.2.1 División de Vibraciones y Acústica

Esta División tiene a su cargo los patrones nacionales de aceleración y de acústica que, a través de las diferentes cadenas de diseminación, tienen impacto en mediciones que repercuten en la productividad de la planta industrial y en otros campos de actividad, como el comercio, la salud, la seguridad y la higiene en la sociedad. Para ilustrar la variedad de aplicaciones de estas mediciones es posible mencionar como ejemplo la vibración en automóviles y camiones, la vibración de edificios y sismología, las pruebas no destructivas por ultrasonido, la calidad acústica de equipos de audio, los niveles de

presión acústica (ruido) en lugares de trabajo y en áreas urbanas, los niveles de sensibilidad auditiva y las aplicaciones médicas del ultrasonido.

El patrón nacional de acústica está constituido por un conjunto de 3 micrófonos de condensador de las más altas cualidades metrológicas, calibrados por el método absoluto de reciprocidad, y ha sido comparado con los patrones nacionales de Estados Unidos y Canadá. Este patrón da soporte a los demás sistemas de calibración en acústica, tales como el de sonómetros, calibradores acústicos, micrófonos, analizadores de audio y señal, así como otros equipos de uso común en el campo de la acústica. En la actualidad los servicios de calibración en acústica más demandados satisfacen las principales necesidades de la industria y el sector laboral en cuanto a la determinación de los niveles de ruido en lugares de trabajo, así como del sector salud ofreciendo servicios a audiómetros y mediciones asociadas al comportamiento del oído humano.

El patrón nacional de vibraciones está constituido por un conjunto de acelerómetros calibrados por el método absoluto de Interferometría láser y ha sido comparado con los patrones nacionales de Estados Unidos, Alemania y varios países de La Unión Europea. Los servicios que de él se derivan incluyen la calibración de acelerómetros, sensores de velocidad y de desplazamiento, tacómetros y fototacómetros, lámparas estroboscópicas, rotores patrón, analizadores de vibraciones, acondicionadores de señal, sismógrafos y equipos de ultrasonido tanto médico como industrial. Además, están disponibles una serie de servicios realizados in situ para caracterizar excitadores, mesas de vibración y máquinas balanceadoras, así como para medición y análisis de los niveles de vibración en situaciones que revistan dificultades metrológicas especiales.

3.1 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

El Sistema Internacional de Unidades se fundamenta en siete unidades de base correspondientes a las magnitudes de longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, cantidad de materia, e intensidad luminosa. Estas unidades son conocidas como el **metro**, el **kilogramo**, el **segundo**, el **ampere**, el **kelvin**, el **mol** y la **candela**, respectivamente. A partir de estas siete unidades de base se establecen las demás unidades de uso práctico, conocidas como unidades derivadas, asociadas a magnitudes tales como velocidad, aceleración, fuerza, presión, energía, tensión, resistencia eléctrica, etc.

Las definiciones de las unidades de base adoptadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas, son las siguientes: El **metro (m)** se define como la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío en un lapso de 1 / 299 792 458 de segundo (17ª Conferencia General de Pesas y Medidas de 1983).

El **kilogramo (kg)** se define como la masa igual a la del prototipo internacional del kilogramo (1ª y 3ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1889 y 1901). El **segundo (s)** se define como la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de cesio 133 (13ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967).

El **ampere (A)** se define como la intensidad de una corriente constante, que mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable, colocados a un metro de distancia entre sí en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud (9ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1948).

El **kelvin (K)** se define como la fracción 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (13ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967).

El **mol (mol)** se define como la cantidad de materia que contiene tantas unidades elementales como átomos existen en 0,012 kilogramos de carbono 12 (^{12}C) (14ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1971).

La **candela (cd)** se define como la intensidad luminosa, en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540 x 10^{12}Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es de 1/683 watt por esterradián (16ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1979).

La Ley Federal sobre Metrología y Normalización establece que el Sistema Internacional es el sistema de unidades oficial en México, el cual está definido por la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, “Sistema General de Unidades de Medida”.

3.2 SISTEMA INGLÉS DE UNIDADES

El sistema inglés de unidades o sistema imperial, es aún usado ampliamente en los Estados Unidos de América y, cada vez en menor medida, en algunos países del Caribe, Centro y Sudamérica con tradición británica. Debido a la intensa relación comercial que tiene nuestro país con los EUA, existen aún en México muchos productos fabricados con especificaciones en este sistema. Ejemplos de ello son los productos de madera, tornillería, cables conductores y perfiles metálicos. Algunos instrumentos como los medidores de presión para neumáticos automotrices y otros tipos de manómetros frecuentemente empleanescalas en el sistema inglés.

En julio de 1959, los laboratorios nacionales del Reino Unido, Estados Unidos, Canadá, Australia y Sudáfrica acordaron unificar la definición de sus unidades de longitud y de masa, aceptando las siguientes relaciones exactas:

1 yarda = 0,914 4 metros

1 libra = 0,453 592 37 kilogramos.

De esta manera, dado que las otras cinco unidades de base del Sistema Internacional son las mismas en el sistema inglés, estas equivalencias son suficientes para establecer la relación entre todas las unidades derivadas de los dos sistemas.

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

3.3 METROLOGÍA

La Metrología es la ciencia de la medición e incluye los aspectos teóricos y prácticos, que se relacionan con ellas, cualquiera que sea su nivel de exactitud y en cualquier campo de la ciencia y la tecnología; su objetivo es procurar la uniformidad de las mediciones, tanto en lo concerniente a las transacciones comerciales y de servicios, en los procesos industriales, así como en los trabajos de investigación científica y desarrollo tecnológico.[1]

La metrología moderna se puede descomponer en tres vertientes según su campo de aplicación, la metrología legal, la metrología científica y la metrología industrial.

3.3.1 Patrón

Para llevar a cabo la calibración es necesario el uso de un **patrón**, el cual se define como Medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o más valores de una magnitud para servir de referencia.[2]

3.3.2 Trazabilidad

La trazabilidad se define como la propiedad de una medición, física o química, o del valor de un patrón, por medio de la cual estos pueden ser relacionados a referencias establecidas, en este caso los Patrones Nacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones.[3]

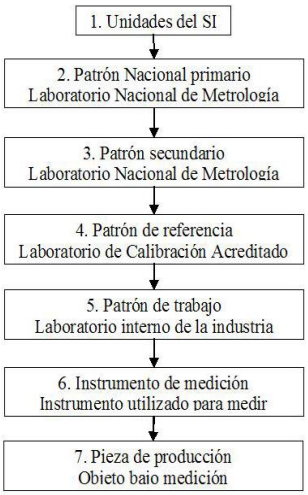


Fig. 3.1 Cadena de trazabilidad

3.4 VIBRACIONES MECÁNICAS

No existe una definición exacta para vibración, sin embargo se puede considerar como vibraciones a los movimientos oscilatorios de una partícula o cuerpo alrededor de una posición de referencia. Las vibraciones mecánicas son aquellos movimientosde un cuerpo o sistema que oscila alrededor de una posición de equilibrio teniendo su origen en los acoplamientos energéticos habidos entre la energía cinética de las masas y la potencial almacenada en la rigidez de los elementos. Si un sistema se desplaza de su posición de equilibrio estable, éste tiende a retornar a su posición bajo la acción de fuerzas restauradoras, pero el sistema por lo general alcanza su posición original con cierta velocidad adquirida que lo lleva más allá de esa posición, produciéndose un proceso repetitivo de manera indefinida, moviéndose el sistema de un lado a otro de su posición de equilibrio. El tiempo requerido para que el sistema realice un movimiento completo recibe el nombre de *periodo* devibración, y el número de ciclos por unidad de tiempo define la *frecuencia*, el desplazamiento máximo a partir de su posición de equilibrio se conoce como *amplitud* de la vibración

Los sistemas oscilatorios pueden clasificarse como lineales o no lineales. Para los sistemas lineales, rige el principio de la superposición y las técnicas matemáticas para su tratamiento están bien desarrolladas. Por el contrario, las técnicas para el análisis de sistemas no lineales son menos conocidas y difíciles de aplicar.

Hay dos clases generales de vibraciones, libres y forzadas. La vibración libre es la que ocurre cuando un sistema oscila bajo la acción e fuerzas inherentes al sistema mismo (restauradoras) y, cuando las fuerzas externamente aplicadas son inexistentes. El sistema bajo vibración libre vibrará a una o más de sus frecuencias naturales que, son propiedades del sistema dinámico que dependen de su distribución de masa y de rigidez. Las vibraciones de este tipo son representadas físicamente por el movimiento armónico (Fig. 3.2).

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

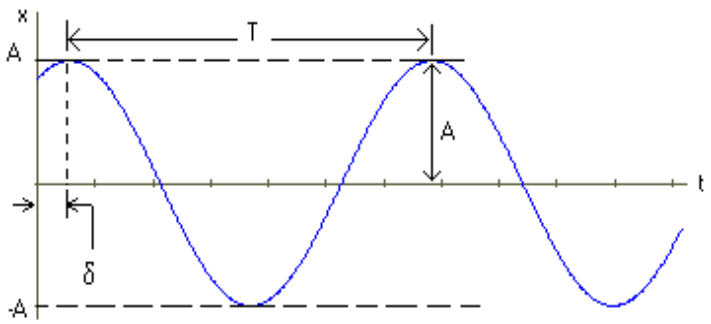


Fig. 3.2 Movimiento Armónico

Del análisis del movimiento vibratorio armónico resultan las relaciones básicas entre los valores de la aceleración (Ec. 3.1), velocidad (Ec. 3.2) y desplazamiento (Ec. 3.3):

$X = A \sin \omega t$ (3.1)

$\dot{X} = A \cos \omega t$ (3.2)

$\ddot{X} = -A\omega^2 \sin \omega t$ (3.3)

Donde los valores máximos son:

$|X| = A$ (3.4)

$|\dot{X}| = A\omega$ (3.5)

$|\ddot{X}| = A\omega^2$ (3.6)

Otras relaciones importantes son:

$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} \qquad (3.7)$$

$$\tau = \frac{1}{f} \qquad (3.8)$$

Donde:

X: Desplazamiento

$\dot{X}$: Velocidad

$\ddot{X}$: Aceleración de la vibración

A: Amplitud

ω: Frecuencia circular

t: Tiempo

f: Frecuencia del sistema

ω_n: Frecuencia natural circular

τ: Periodo de oscilación

La Fig. 3.3 muestra que la fase de la velocidad difiere de la del desplazamiento en $\pi/2$ radianes, o sea 90º. Es decir, cuando x es máximo o mínimo, la velocidad es cero. Del mismo modo, cuando x es cero, la rapidez es máxima. La fase de la aceleración difiere de la correspondiente al desplazamiento e π radianes, o sea 180º. Es decir, cuando x es máximo, a es mínimo, y viceversa.

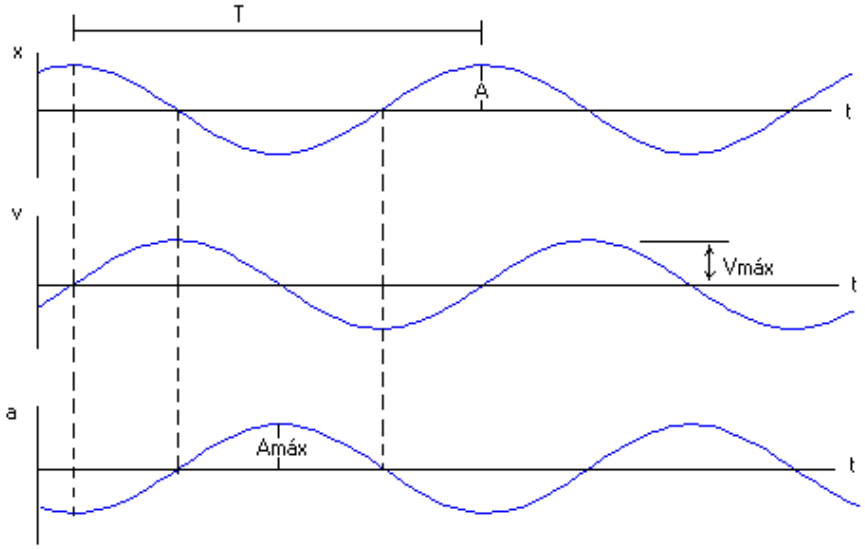


Fig 3.3 Fases del desplazamiento, velocidad y aceleración

Todos los cuerpos que poseen masa y elasticidad son capaces de vibrar. La mayoría de las máquinas y las estructuras experimentan vibración hasta cierto grado y, su diseño, requiere generalmente consideración de su conducta oscilatoria.

3.5TRANSDUCTORES DE VIBRACION

La aceleración de las vibraciones comenzó a medirse a fines de los años 20, requerida por la dinámica estructural y la arquitectura naval. La medición y análisis de vibraciones es utilizado, en conjunto con otras técnicas, en todo tipo de industrias como técnica de diagnóstico de fallas y evaluación de la integridad de máquinas y estructuras. Por ejemplo un caso particular es el de los equipos rotatorios, la ventaja que presenta el análisis vibratorio respecto a otras técnicas como tintas penetrantes, radiografía, ultrasonido, etc., es que la evaluación se realiza con la máquina funcionando, evitando con ello la pérdida de producción que genera una detención.

Los transductores de vibración son instrumentos empleados para medir la velocidad lineal, desplazamiento, proximidad, y también la aceleración de sistemas sometidos a vibración, los cuales convierten la energía mecánica en energía eléctrica, lo que significa que producen una señal eléctrica la cual está en función de la vibración.

Estos pueden ser usados aisladamente, o en conjunto con un sistema de adquisición de datos y se pueden encontrar en diversas presentaciones que pueden ser, sensores simples, transductores encapsulados, o ser parte de un sistema sensor o instrumento, incorporando características tales como totalización, visualización local o remota y registro de datos. Los transductores de vibración pueden tener de uno a tres ejes de medición, siendo estos ejes ortogonales y su rango de medición puede ser en unidades *"g"* para la aceleración, en *m/s (in/s)*para velocidad lineal, y m (in) para desplazamiento y proximidad. La frecuencia es medida en Hz (*Hertz), y su* precisión es comúnmente representada como un porcentaje del error permisible sobre el rango completo de medición del dispositivo. La sensibilidad transversal se refiere al efecto que una fuerza ortogonal puede ejercer sobre la fuerza que se está midiendo, ésta sensibilidad también se representa como un porcentaje del fondo escala de la interferencia permisible.

Típicamente hay cuatro tipos de sensores o transductores de vibraciones:

- Sensor de desplazamiento relativo sin contacto
- Sensor de desplazamiento relativo con contacto
- Sensor de velocidad o velocímetro
- Sensor de aceleración o acelerómetro

3.6 ACELERÓMETROS

Los acelerómetros son dispositivos que se emplean para medir la aceleración a través de vibraciones y oscilaciones, usados comúnmente en maquinas e instalaciones, así como para mediciones en el cuerpo humano y para el desarrollo de muchos productos (teléfonos celulares, juegos de video, juguetes electrónicos, laptop y PCs, sistemas de seguridad, etc.).

Los acelerómetros primitivos se calibraban sometiéndolos a un movimiento mecánico de parámetros conocidos en un ámbito de frecuencias bastante limitado. Los primeros acelerómetros comerciales aparecieron en el mercado en la década del 40, calibrados por el método absoluto de reciprocidad. Aunque el método interferométrico se conocía y aplicaba ya en los años 20, recién en la década del 60 resultó más práctico utilizar un interferómetro de MICHELSON para determinar la aceleración a partir del desplazamiento dinámico. En la actualidad, los acelerómetros piezoeléctricos son los transductores más versátiles y más ampliamente utilizados para medir aceleraciones vibratorias.

3.6.1 Principio de funcionamiento

El elemento básico de muchos instrumentos medidores de vibraciones, es la unidad sísmica mostrada en la Fig. 3.4

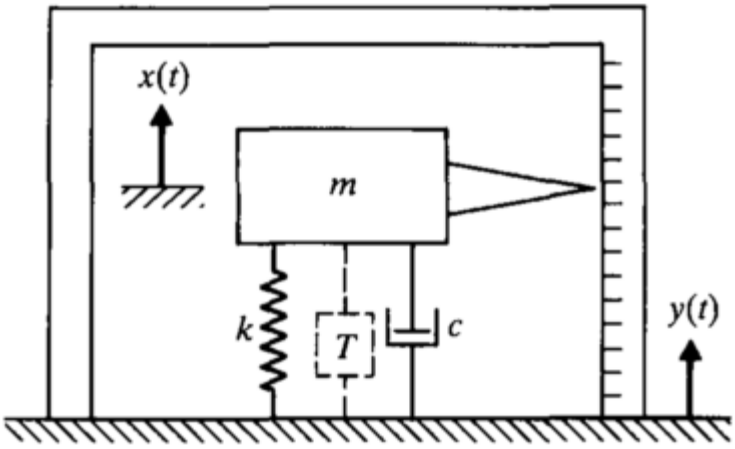


Fig. 3.4 unidad sísmica

Dependiendo del intervalo de frecuencias utilizado, desplazamiento, velocidad o aceleración están indicados por el movimiento relativo de la masa suspendida, con respecto a la caja. Para determinar el comportamiento de tales instrumentos se considera la ecuación de movimiento de m, la cual es:

$$m\ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{y}) - k(x - y) \quad (3.9)$$

En donde ***x*** y ***y***son los desplazamientos de la masa sísmica y del cuerpo vibrante, respectivamente, ambos medidos con respecto a una referencia inercial. Llamando desplazamiento relativo de la masa m y la carga unidad al cuerpo vibrante

$$z = (x - y) \quad (3.10)$$

Y suponiendo un movimiento sinusoidal *y*= *Y senωt*del cuerpo vibrante, obtenemos la ecuación

$$\boldsymbol{m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = m\omega^2 Y \sin \omega t} \quad (3.11)$$

La solución estacionaria $\mathbf{z = Z\,sen\,(\omega t - \Phi)}$ está disponible por inspección y es

$$Z = \frac{m\omega^2 Y}{\sqrt{(k - m\omega^2) + (c\omega)^2}} \quad (3.12)$$

$$Z = \frac{Y\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (3.13)$$

y

$$tan\,\Phi = \frac{\omega c}{k - m\omega^2} = \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (3.14)$$

Es evidente que los parámetros involucrados son la razón de frecuencias $\frac{\omega}{\omega_n}$ y el factor de amortiguamiento ξ . En la Fig. 3.5 se muestra un grafico de estas ecuaciones. El tipo de instrumento está determinado por el rango útil de frecuencias con respecto a la frecuencia natural ω_n del instrumento.

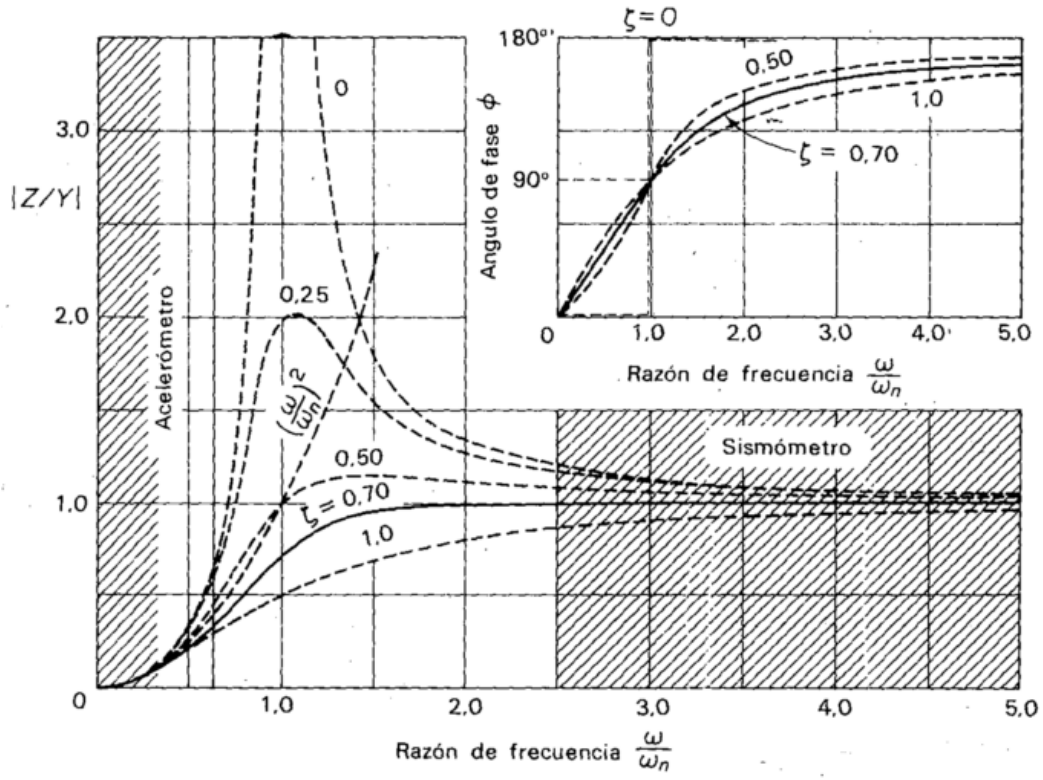


Fig. 3.5 Respuesta de un instrumento medidor de vibraciones

Cuando la frecuencia natural del instrumento es alta comparada con la de la vibración que se va a medir, el instrumento indica aceleración. Un examen a las Ec. (3.12) y (3.13) muestran que el factor

$$\sqrt{\left(1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2+\left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

Tiende a uno cuando $\frac{\omega}{\omega_n}\rightarrow 0$, de modo que

$$Z=\frac{\omega^2 Y}{{\omega_n}^2}=\frac{aceleración}{{\omega_n}^2} \qquad (3.15)$$

Así que Z se vuelve proporcional a la aceleración del movimiento que se va a medir con un factor $\frac{1}{{\omega_n}^2}$ puede verse en la Fig. 3.6 que es un gráfico ampliado de

$$\frac{1}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2+\left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

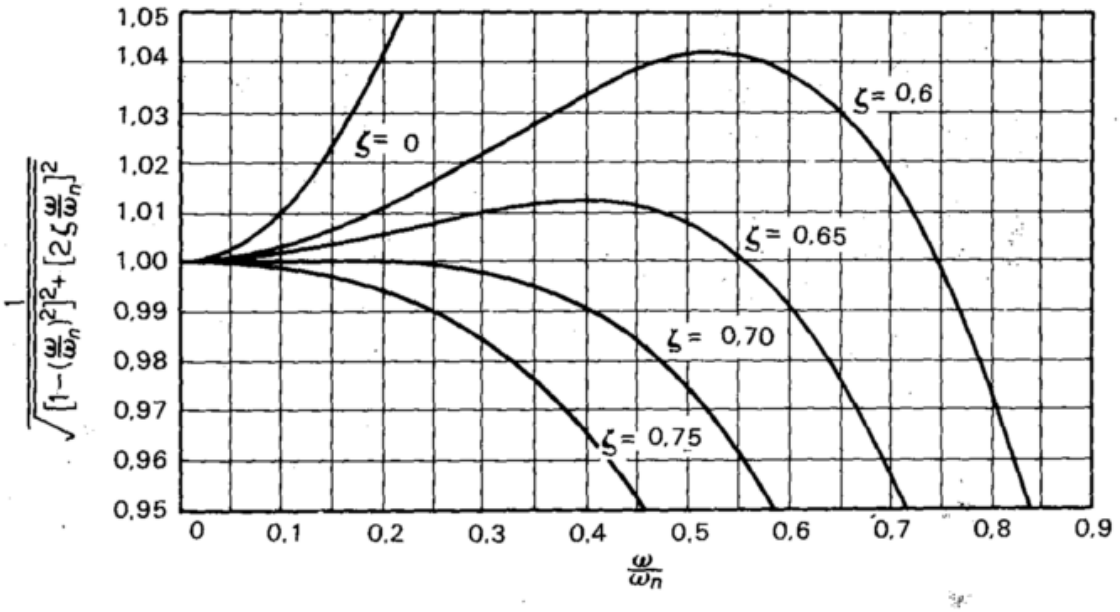


Fig. 3.6 Error de aceleración contra frecuencia con ξ como parámetro

Para varios valores de amortiguamiento ξ. El gráfico muestra que el intervalo de frecuencia útil del acelerómetro no amortiguado está limitado. Sin embrago al aumentar el amortiguamiento a $\xi = 0.7$ el rango de frecuencia útil es $0 \leq \frac{\omega}{\omega_n} \leq 0.20$ con un error máximo del 0.01 %. Así un instrumento con una frecuencia natural de 100 Hz tiene un intervalo de frecuencia útil entre 0 Hz y 20 Hz, con error despreciable.

Los instrumentos de frecuencia natural muy alta, tales como los acelerómetros piezoeléctricos, tienen casi amortiguación nula y operan sin distorsión asta frecuencias de $0.06 f_n$. Los cristales están montados de manera que, bajo aceleración, están comprimidos o flexionados para generar carga eléctrica. La Fig. 3.7 muestra un arreglo semejante, la frecuencia natural de tales acelerómetros puede ser muy alta en el rango

de 50 kHz, lo que permite medidas de hasta 3 KHz. La sensibilidad del acelerómetro de cristales está dada en términos de carga pCpicocoulombs por g, o en términos de tensión mV por g, como la tensión eléctrica está relacionada por la ecuación E=Q/C, la capacitancia del cristal debe especificarse. La sensibilidad típica para un acelerómetro de cristales es de 25 pC/g con cristal de capacitancia de 500 pF.

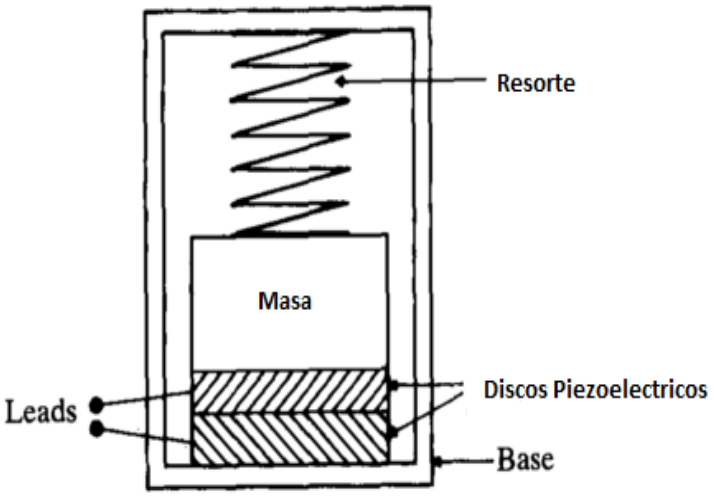


Fig 3.7Acelerómetro Piezoeléctrico

3.6.2 Sensibilidad del acelerómetro

Sensibilidad se define como el cambio en la respuesta de un instrumento de medición dividido por el correspondiente cambio del estímulo (señal de entrada). [4]

Al hablar de sensibilidad nos referimos a un parámetro que caracteriza a un transductor cuya salida sea proporcional a la entrada, indicando en qué medida varía la señal de salida ante una determinada variación de la magnitud de entrada. En un acelerómetro no es más que la relación entre la señal eléctrica de salida y el valor de aceleración aplicado al sensor en su eje sensible. En la práctica la sensibilidad puede variar sutilmente a lo largo del campo de medida debido a las características técnicas del acelerómetro como la linealidad, tambiénla sensibilidad del acelerómetro se ve afectada por la frecuencia de la vibración o de la duración del impacto.

3.6.3 Linealidad

La linealidad está dada en términos de la respuesta idealizada de la sensibilidad del transductor. La No-linealidad es la máxima desviación de la salida, que existe entre la curva de la sensibilidad real y la ideal del acelerómetro.

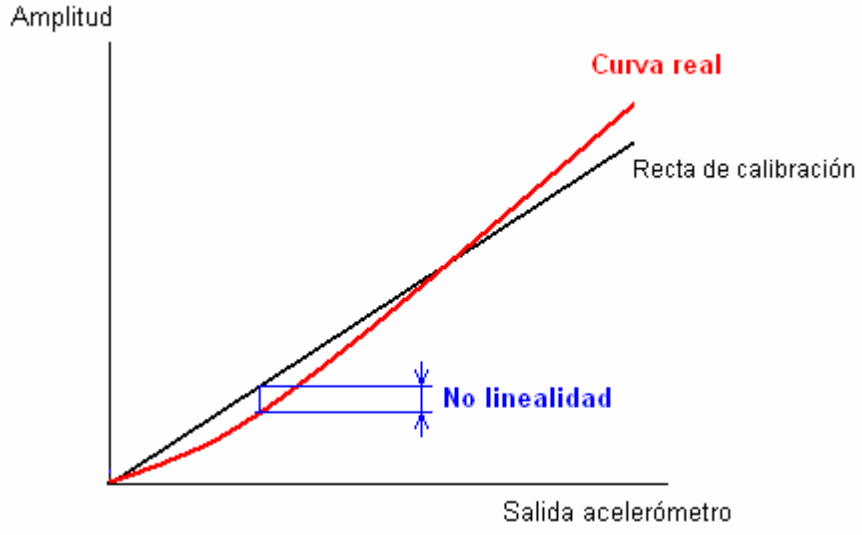


Fig 3.8 Diferencia entre el comportamiento real del acelerómetro

3.6.4 Sensibilidad transversal

La sensibilidad transversal de los transductores se refiere a la señal de salida causada por el movimiento que no está en el mismo eje en el cual se está midiendo.

Los acelerómetros están diseñados para responder a aceleraciones en una dirección determinada. Sin embargo, ante aceleraciones en un eje transversal al de actuación, el acelerómetro suele tener una pequeña respuesta o sensibilidad transversal.La sensibilidad transversal la suele expresar el fabricante en porcentaje sobre la sensibilidad nominal del acelerómetro, siendo lo más común de un ±1% en los mejores casos, a un ±5%.

3.6.5 Resonancia

Los sistemas mecánicos poseen una frecuencia natural que es la frecuencia a la que vibran al no tener aplicada fuerzas de excitación,una estructura típica tendrá muchas frecuencias naturales. Cuando existe una excitación cuya frecuencia es próxima a la frecuencia natural, el sistema puede entrar en resonancia, la cual se define como el estado en que la frecuencia natural coincide con la frecuencia de excitación. [5]

Los niveles de vibración que resultan de la resonancia pueden ser muy altos ya que la amplitud de la vibración será máxima.La resonancia de un sistema mecánico puede provocar errores de medición en el caso de los acelerómetros o dañarlos, por lo que se tiene cuidado al diseñar estos sistemas para que la frecuencia natural no coincida con alguna frecuencia en la que se requiera medir. En el caso de los acelerómetros, la frecuencia natural se sitúa aproximadamente entre los 20kHz y los 60kHz dependiendo de la tecnología y fabricación.

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

3.6.6 Tipos de acelerómetros

Los acelerómetros que existen de manera comercial son de muchos tipos, ya sea de distintas formas geométricas o para distintos usos en la medición, pero se pude hacer una clasificación breve de la siguiente manera.

Por la dirección del eje en que miden

El vector aceleración muchas veces tiene definida su dirección, pudiendo usar un acelerómetro que mida con su eje sensible en esa dirección pero en otras ocasionesla dirección no es completamente conocida o varía de manera arbitraria. En estos casos, el uso de un acelerómetro constituido por un único eje de medición no es la solución correcta. Por lo cual existen acelerómetros uniaxiales, biaxiales y triaxiales.

a) Acelerómetros uniaxiales o monoaxiales.

Un acelerómetro uniaxial posee un elemento sensor que es capaz de medir la aceleración paralela a su eje de actuación. Dicho eje es fijado por el fabricante y la sensibilidad que nos proporciona está directamente ligada a ese eje de actuación.

Si el eje del acelerómetro no se coloca en paralelo con el vector de aceleración a medir, no se obtendrá la sensibilidad adecuada y por tanto los resultados obtenidos no serán los deseados. Dicho eje coincide siempre con la perpendicular a la superficie de anclaje del acelerómetro.

Los acelerómetros uniaxiales son los más utilizados en el campo de la instrumentación debido a que, por lo general, los impactos que se llevan a cabo en los ensayos son totalmente controlados y la dirección del vector aceleración que se desea medir es conocida en el momento de producirse.

b) Acelerómetros biaxiales.

Los acelerómetros biaxiales resultan útiles en aplicaciones que requieran medir aceleraciones que suceden en un plano.

Como su nombre indica, un acelerómetro biaxial posee dos sensores dispuestos de manera perpendicular, lo cual permite que sea capaz de medir la aceleración en dos ejes de coordenadas.

c) Acelerómetros triaxiales.

Los acelerómetros triaxiales permiten medir la aceleración en tres dimensiones.

Poseen un total de tres elementos sensores, uno para cada eje (X, Y, Z). Cada sensor proporciona una señal eléctrica en función de la aceleración del eje en el que está orientado internamente. Para conocer el módulo, dirección y sentido de la aceleración resultante basta con realizar la suma vectorial de las aceleraciones medidas por cada eje. Lo único que hay que tener en cuenta es la posición de referencia del acelerómetro para conocer la dirección real de la aceleración.

Se utilizan para medir aceleraciones que se producen en ejes distintos al de la superficie de anclaje del acelerómetro, o para captar aceleraciones cuya dirección varía en el tiempo.

Por la carga que generan

Los acelerómetros se pueden clasificar por activos o pasivos, según la carga que generen. Existen dos tipos de acelerómetros básicamente:

- Acelerómetros de Alta Impedancia
- Acelerómetros de Baja Impedancia

Acelerómetros de Alta Impedancia:

La salida de carga del cristal tiene una impedancia de salida muy alta y se puede obtener fácilmente. Se pueden emplear técnicas especiales para obtener la señal del sensor. La alta impedancia resultante del acelerómetro es útil donde las temperaturas exceden los 120 ºC, prohibiendo el uso de sistemas microelectrónicos dentro del sensor. Este tipo de

sensor requiere el uso de conductor para bajo ruido. Note que la señal de alta impedancia debe ser convertida a baja impedancia con un convertidor de impedancia o un amplificador de carga antes de ser conectado a un sistema de adquisición de datos. Generalmente, si la sensibilidad de salida es especificada en unidades de pC/g (*pico coulombs por g*) se tienen un sensor de alta impedancia.

Acelerómetros de Baja Impedancia:

En un acelerómetro de baja impedancia se deben emplear sistema microelectrónicos ubicados dentro de la carcasa del sensor, para detectar la carga generada por el cristal piezoeléctrico. De esta manera, la transformación de alto a bajo es hecha en el punto de medición y solo se transmiten señales de baja impedancia desde el sensor. Una salida de baja impedancia es deseable cuando se requieren grandes distancias, también proveen una impedancia propia para la mayoría de los sistemas de adquisición de datos. Generalmente, si la sensibilidad de salida esta especificada en mv/g (*milivoltios por unidad g*) tales como 10 mv/g o 100 mv/g, se tiene un sensor de baja impedancia.

Por la tecnología de fabricación

La clasificación según por las tecnologías (piezo-eléctrico, piezo-resistivo, galgas extensométricas, térmico…) y diseños, que aunque todos tienen el mismo fin pueden ser muy distintos unos de otros según la aplicación a la cual van destinados y las condiciones en las que han de trabajar.

- Piezo-eléctrico
- Piezo-resistivo
- Galgas extensométricas

- Laser
- Térmico
- Condensador (capacitivo

Fig 3.9 Distintosacelerómetros (cortesíaHoneywell)

3.6.7 Aplicaciones

Los acelerómetros se usan para medir la vibración en la industria Automotriz, de maquinaria en general y de vibración en piso. Pueden también ser utilizados para medir actividad sísmica, la inclinación, la distancia dinámica y la velocidad con o sin la influencia de la gravedad.

Para la medición de vibraciones en el exterior de las máquinas y en las estructuras hoy en día se utiliza fundamentalmente los acelerómetros. El acelerómetro tiene la ventaja respecto al velocímetro de ser más pequeño, tener mayor intervalo de frecuencia, y poder integrar la señal para obtener velocidad o desplazamiento vibratorio. El sensor de desplazamiento se utiliza para medir directamente el movimiento relativo del eje de una máquina respecto a su descanso. Para la selección adecuada del sensor se debe considerar, valor de la amplitud a medir, temperatura de la superficie a medir y fundamentalmente el intervalo de las frecuencias a medir.

3.7 MEDICIÓN DE LA VIBRACION

Las etapas seguidas para medir y/o analizar una vibración, que constituyen la cadena de medición, son:

- Etapa transductora
- Etapa de acondicionamiento de la señal
- Etapa de análisis y/o medición
- Etapa de registro.

El transductor es el primer eslabón en la cadena de medición y debede reproducir exactamente las características de la magnitud que se desea medir. Un transductor es un dispositivo que sensa una magnitud física como vibración y la convierte en una señal eléctrica proporcional a la magnitud medida, ya sea desplazamiento, velocidad o aceleración. Típicamente hay cuatro tipos de sensores o transductores de vibraciones:

- Sensor de desplazamiento relativo sin contacto
- Sensor de desplazamiento relativo con contacto
- Sensor de velocidad o velocímetro
- Sensor de aceleración o acelerómetro

Para la selección adecuada del sensor se debe considerar, valor de la amplitud a medir, temperatura de la superficie a medir y fundamentalmente el intervalo de las frecuencias a medir. La Tabla 3.1 indica los intervalos de frecuencias de sensores de vibraciones típicos.

Tabla 3.1 Limites de frecuencias de transductores de vibraciones típicos[6]

Tipo de transductor	Intervalos típicos de frecuencia (Hz)
Desplazamiento sin contacto	0 - 10 000
Desplazamiento con contacto	0 - 150
Velocímetro sísmico	10 - 1 000
Acelerómetro de uso general	2 - 7 000
Acelerómetro de baja frecuencia	0.2 - 2 000

La señal de salida de un transductor por lo regular se conecta a lo que se conoce como amplificador o acondicionador de señal ya que su señal es muy débil o contiene ruido (señales no deseables), dependiendo de si este proporciona su señal en tensión o carga. Esto significa cambiar la señal de salida de los transductores a un nivel de tensión eléctrica requerido, elevando o atenuando la señal, modifica el intervalo dinámico del sensor para maximizar la precisión del sistema de adquisición de datos y filtra la señal de salida que interesa.

Una vez acondicionada la señal puede ser medida o analizada, existen diferentes formas de analizar y visualizar las señales de vibración provenientes de los transductores, una de ellas es el análisis del valor eficaz o “rms” de la señal, otra es su amplitud pico a pico o simplemente su amplitud pico, y otra es el valor promedio (rectificada) de la señal.

El mejor análisis que se puede hacer de las señales de vibración, es el análisis de frecuencia, donde éstas pueden ser descompuestas en una serie de componentes armónicas, que crean un espectro de diferentes frecuencias y muestran que tan significativa, es la señal de frecuencia fundamental. Es por ello, que un buen equipo de visualización de vibración, debe tener la capacidad de analizar el espectro de frecuencias de la señal y mostrarla de manera precisa.

3.8CALIBRACIÓN DE ACELEROMETROS Y MÉTODOS DE CALIBRACIÓN

La calibración es el procedimiento metrológico que permite determinar con suficiente exactitud cuál es el valor de los errores de los instrumentos de medición, se define como el conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de las magnitudes indicadas por un instrumento de medición o sistema de medición, o los valores representados por una medida materializada o de un material de referencia, y los valores correspondientes de la magnitud realizada por los patrones. [7]

El principal objetivo de la calibración de un transductor de vibración es determinar el factor de calibración (sensibilidad) dentro del intervalo de amplitud y frecuencia para el grado de libertad para el cual es utilizado el transductor. [7]

Existen métodos de calibración clasificados en: métodos de calibración primaria o absolutos y métodos de calibración secundaria.

3.8.1 Métodos primarios

El método de calibración primario más usado en la actualidad por su relativa sencillez, gran fiabilidad y alta exactitud, es el de Interferometría láser. Este método se reserva para la calibración de acelerómetros patrones en laboratorios de referencia.

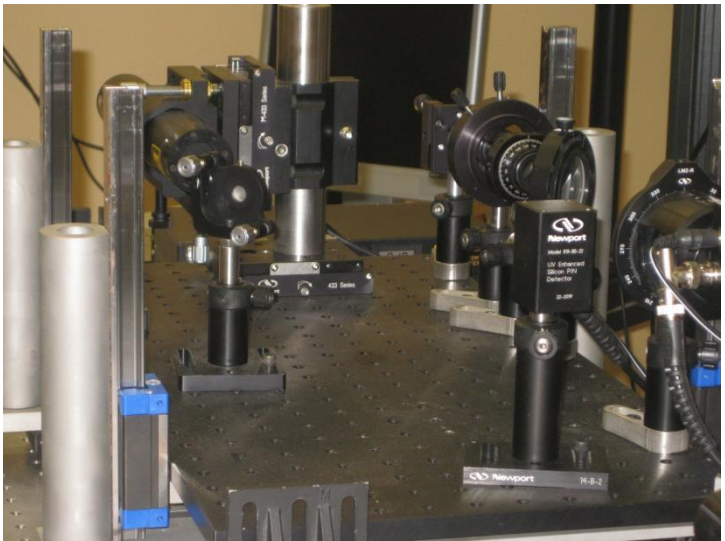


Fig. 3.10 Arreglo interferométricoMichelson

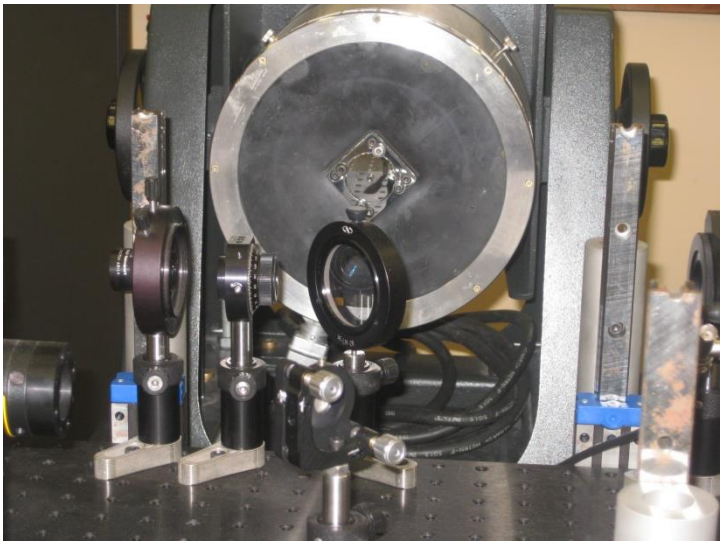


Fig. 3.11 Medición de velocidad angular por Interferometría

3.8.2 Métodos secundarios

De entre los muchos métodos existentes se usa con mayor frecuencia el llamado “back to back” o de comparación por su simplicidad, fiabilidad y exactitud, tomando las precauciones necesarias. De forma breve este método consiste en colocar el acelerómetro a medir sobre otro acelerómetro patrón calibrado a través de un método primario y someter a ambos a una vibración de frecuencia y amplitud determinada. Como la aceleración a la que ambos acelerómetros se ven sometidos es la misma, el cociente de su respuesta será igual al de sus sensibilidades. El conocimiento de la sensibilidad del acelerómetro patrón permite obtener directamente con la ayuda de instrumentación determinada, el valor de la sensibilidad del acelerómetro a calibrar.

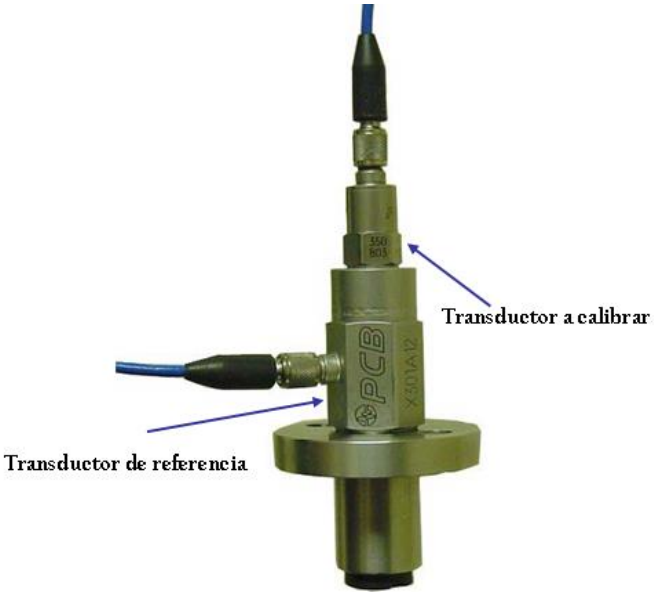


Fig. 3.12 montaje cara a cara para calibración secundaria

El procedimiento que se utiliza para llevar a cabo la calibración de un acelerómetro por el método de comparación en forma resumida es:

- Revisión del instrumento
- Lectura de parámetros ambientales
- Montaje de acelerómetros
- Conexión del equipo (esquema)
- Uso de un software codificado para la toma de lecturas
- Interpretación de resultados

3.9MONTAJE DE LOS TRANSDUCTORES

El método de montaje del acelerómetro es uno de los factores más importantes para obtener lecturas correctas en la práctica de la medición de las vibraciones. Un montaje inadecuado resulta en una severa reducción de la frecuencia de resonancia de montaje del transductor, que puede limitar severamente el intervalo de frecuencia del acelerómetro.

La confiabilidad de la respuesta a altas frecuencias es directamente afectada por la técnica de montaje que se selecciona para el transductor. En general, una mayor área de contacto superficial entre transductor y la máquina dará como resultado una mayor frecuencia.

La capacidad de medir vibraciones de baja frecuencia será una función de la capacidad específica del transductor y no el dependiente en la técnica de montaje elegida.

En los transductores la influencia de las condiciones ambientales de trabajo (humedad, fluctuaciones de temperatura, radiación nuclear, temperatura ambiente de la superficie a monitorear, ruido acústico, sustancias corrosivas, interferencia electromagnética, vibración transversal, ruido electromagnético, bases flexionadas, condiciones de los cables, etc.), juegan un papel muy importante para obtener mediciones de vibración confiables.

3.9.1 Técnicas de Montaje

a) El montaje con cera es aplicado cuando no existe posibilidad de realizar una perforación en la superficie de montaje para fijarlo con un tornillo

b) El montaje con sujetador magnético es un método rápido para el montaje de transductores, en superficies razonablemente planas, lisas y limpias; La superficie magnética debe de sujetarse sobre la superficie de vibración, de lo contrario podría producir oscilaciones del sujetador magnético, produciendo error en las lecturas.

c) El montaje con opresor se aplica en zonas que pueden perforarse para que se sujete con tornillos u opresores, de manera que el montaje sea completamente rígido.

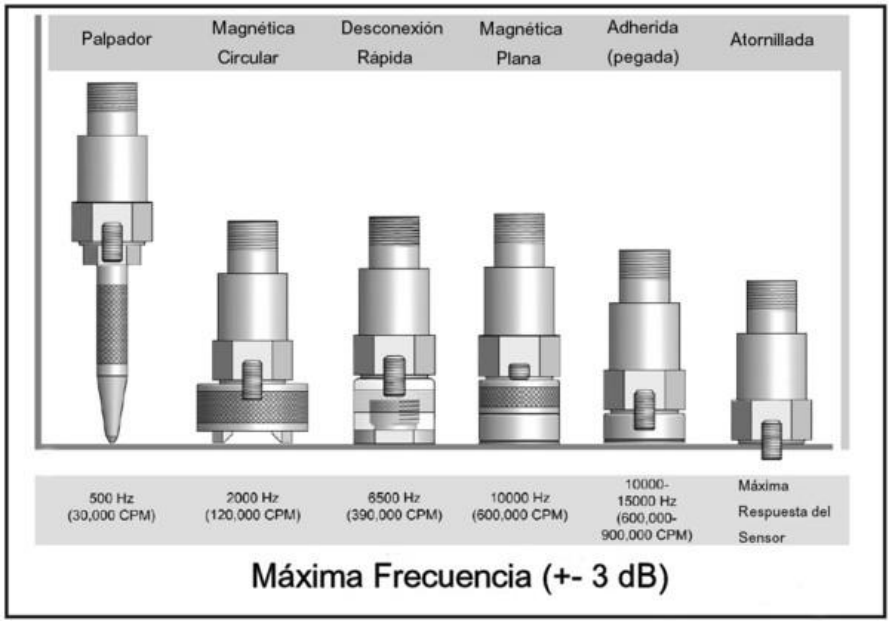


Fig. 3.13 Técnicas de montajes disponibles

3.10EXCITADORES DE VIBRACION

El diseño del excitador electrodinámico es muy complejo, consiste en una bobina a la que se le alimenta con una corriente eléctrica, la cual es atraída por un imán permanente que se encuentra anclada a la estructura del excitador, provoca un movimiento sobre la base del mismo la cual con ayuda de muelles radiales y tangenciales, provoca una vibración pura.

El funcionamiento del excitador, es complementado con la ayuda de un generador de señal senoidal y un amplificador de potencia. El generador, produce una señal a una frecuencia y tensión determinada, la cual es ampliada por el amplificador de potencia hasta llegar al excitador de vibraciones con una señal de alimentación en corriente en valor de RMS para producir esa señal en una vibración.

Aunque también se cuenta con excitadores manuales portátiles, los cuales no requieren de ningún elemento adicional para su funcionamiento, únicamente es accionar un interruptor integrado en el excitador y este empieza atrabajar en algunos casos solamente es a una amplitud de 10 m/s^2 y una frecuencia de 160 Hz, como puede ser para los de la marca Brüel&Kaejr, o la marca PCB, ya que se tiene otro modelo del tipo portátil como es el ENDEVCO que se puede variar la frecuencia y la amplitud de la vibración. Partes constitutivas:

- Carcasa
- Imán
- Elemento móvil
- Cojinetes
- Suspensión

Fig. 3.14 Excitador de vibraciones

3.11 METODO DEL ELEMENTO FINITO

El método del elemento finito (MEF en castellano o FEM en inglés)se ha vuelto de suma importancia para dar soluciones a los problemas de carácter ingenieril, debido a que es una herramienta que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran difíciles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. También ha sido de gran ayuda porque permite ahorrarse el costo de realizar prototipos para hacerles pruebas e irles realizando mejoras iterativamente, de manera que permite realizar un modelo matemático del sistema real fácil y económico de modificar. Aunque la estructura básica de este método es conocida desde hace tiempo, ha sufrido un gran desarrollo por los avances en los sistemas computarizados desarrollándose gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos.

Sin embargo, no deja de ser un método aproximado y es importante no perder de vista que el manejo correcto de los distintos tipos de programas que aplican este método exige tener conocimiento de los principios teóricos del mismo.

3.11.1 Conceptos generales del MEF

La aproximación del modelado por elemento finito consiste en dividir a los cuerpos o estructuras en pequeñas partes finitas y simples, a lo que se llama discretizar, se busca que cada elemento sea muy simple como son barras, placas o vigas para los cuales la ecuación de movimiento sea fácil de resolver. Cada punto que conecta al siguiente elemento se le llama nodo, a todo el conjunto de nodos conectando a los elementos finitos se le llama malla, o mallado de elemento finito.Referencia. [9]

Generándosede esta manera un sistema de ecuaciones que se resuelve numéricamente y proporciona el estado de tensiones y deformaciones. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una

ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. [10]

Los conceptos teóricos básicos de las herramientas de cálculo mediante el MEF, representan problemas físicos que pueden ser expresados mediante alguna de las siguientes ecuaciones:

$$[K]\{q\} = \{f\} \tag{3.16}$$

$$[C]\{q\} + [K]\{q\} = \{f\} \tag{3.17}$$

$$[M]\{q\} + [C]\{q\} + [K]\{q\} = \{F\} \tag{3.18}$$

Donde:

[K]: matriz de rigidez

[M]: matriz de masa

[C]: matriz de amortiguamiento

$\{q\}$: vector de desplazamientos nodales

$\{\dot{q}\}$: vector de velocidades nodales

$\{F\}$: vector de fuerzas externas

Resumiendo de manera breve en el MEF se tienen los siguientes puntos:

1. Se debe seleccionar un modelo matemático que describa el comportamiento de la estructura física en su realidad. Al igual definir con detalle las propiedades mecánicas de los materiales y el carácter de la deformación de la misma.
2. Teniendo el modelo matemático se procede a discretizar la estructura entre sí denominadas “elementos finitos”, dentro de los cuales se interpolan las variables principales en función de sus valores en una serie de puntos discretos del elemento denominados “nodos”. Esta etapa de discretización incluye la representación gráfica de la malla de elementos finitos.
3. las matrices de rigidez y el vector de cargas para cada elemento se obtienen de las ecuaciones de equilibrio según la teoría.
4. Las matrices de rigidez y el vector de carga se ensamblan para la matriz de rigidez global de toda la malla de elementos finitos y el vector de cargas sobre los nodos.
5. El sistema de ecuaciones resultante se resuelve para calcular las variables incógnitas (desplazamientos de todos los nodos de la malla), utilizando cualquier métodos conocido.
6. Una vez calculados los movimientos nodales se pueden calcular las deformaciones y, seguidamente, las tensiones en cada elemento, así como las reacciones en los nodos con movimientos prescritos.
7. Obtenidos los resultados se procede finalmente a la interpretación y presentación de los mismos (gráficos). [10]

3.11.2 Etapas de Aplicación con ANSYS

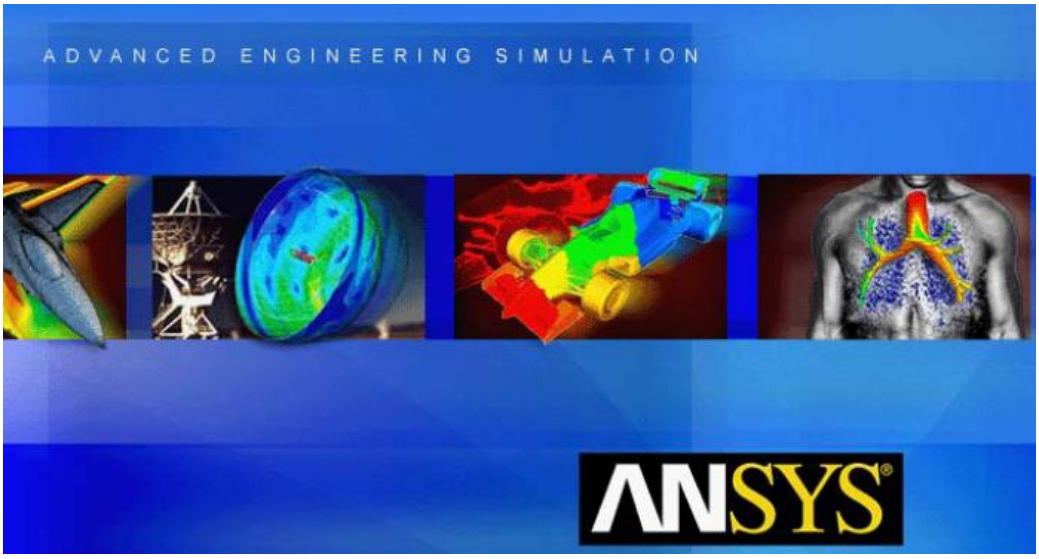


Fig. 3.15 software ANSYS

ANSYS, Ins. es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras yvolúmenes finitos para fluidos.

ANSYS esta dividido en tres herramientas principales llamados módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador. Tanto el pre-procesador como el post-procesador están previstos de una interfaz gráfica. Este procesador deelemento finitopara la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no-lineales), análisis de transferencia de calor yfluidodinámica, y también problemas deAcústicay deelectromagnetismo. Usualmente el uso de estas herramientas se utiliza simultáneamente logrando mezclar problemas de estructuras junto a problemas de transferencia de calor como un todo.[12]

La estructura básica de los programas de aplicación del elemento finito al cálculo directo de estructuras, consta de tres módulos principales.

Pre-proceso: etapa en la cual se define el problema a resolver mediante las siguientes pasos

a) SelecciónderlTipodeelementofinito, dentro de las librerías de los software se encuentra una gran variedad de tipos de elementos uni-, bi- y tridimensionales. (Fig.3.16).

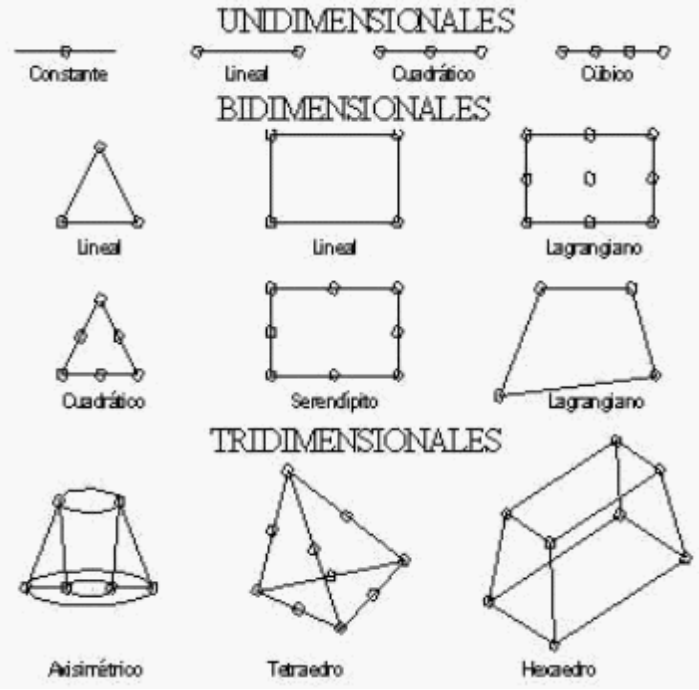


Fig. 3.16Tipos de elementos.

b) Selecciónde las características geométricas y mecánicas del material, en esta etapa se asignan características como módulo de elasticidad, espesores, alturas, momentos de inercia, áreas transversales, coeficiente de Poisson, etc., para cada tipo de elemento.

c) Creación de la geometría del modelo, en este caso se debe representar lo más real al modelo físico en estudio, generando una serie de puntos (nodos) que componen el modelo, definido en un sistema de coordenadas ya establecido, para posteriormente generar superficies y luego sólidos, si fuera necesario y dependiendo del modelo.

Solución: Durante la fase de solución se asigna el tipo de análisis aplicado a la estructura, las condiciones de contorno del modelo, las cargas aplicadas, y por último se procede a resolver los sistemas de ecuaciones resultantes de la etapa anterior. Dentro de los tipos de análisis podemos destacar:

Análisis estático, determina desplazamientos, tensiones, deformaciones, etc. en la estructura analizada.

Análisis modal, incluye la determinación de frecuencias naturales y modos de vibración

Análisis armónicos, usado para determinar la respuesta de una estructura sometida a cargas que varían armónicamente en el tiempo.

Análisis de pandeo, usado para calcular cargas críticas y deformaciones debidas a pandeo.

Post-proceso: La etapa de post-proceso e interpretación de los resultados numéricos obtenidos en la etapa de solución es de gran importancia, ya que no necesariamente los resultados obtenidos son correctos. Dentro de la función del ingeniero, la acertada interpretación de la enorme cantidad de información que entregan las herramientas informáticas será preponderante a la hora de diferenciar un buen diseño de otro realizado deficientemente.

Comparar el comportamiento de la estructura idealizada con el comportamiento esperado de la estructura real.

CAPITULO 4

DISEÑO DE DISPOSITIVOS

4.1 Diseño

Etimológicamente diseño deriva del término italiano *disegno* (dibujo), designio, signare, signado "lo por venir", el porvenir visión representada gráficamente del futuro, *lo hecho* es la obra, *lo por hacer* es el proyecto, *el acto de diseñar como prefiguración* es el proceso previo en la búsqueda de una solución o conjunto de las mismas.

El concepto de diseño suele utilizarse en el contexto de las artes, la ingeniería, la arquitectura, y diversas disciplinas creativas. Parta el termino anglosajón *design* hace referencia a toda actividad de desarrollo de una idea de producto, de manera que se acerca más al concepto en castellano de *proyecto*, entendido como el conjunto de planteamientos y acciones necesarias para llevar a cabo y hacer realidad una idea.

A continuación se listan diferentes definiciones de diseño:

- Dym propone: es la generación y evaluación sistemática e inteligente de especificaciones para artefactos cuya forma y función alcanzan los objetivos establecidos y satisfacen las restricciones especificadas. [13]
- Joseph Shigley define en su libro titulado Diseño en Ingeniería Mecánica: Diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad, en ingeniería es aún el proceso en el que se utilizan principios científicos y métodos técnicos-matemáticos, conocimientos físicos o químicos, útiles de dibujo o de cálculo, lenguaje común especializado, etc.- para llevar a cabo un plan que resultará en la satisfacción de una cierta necesidad o demanda. [14]
- J*ohn Christopher Jones:* La actividad especializada de expertos pagados que conforman las formas físicas y abstractas de la vida industrial que como consumidores todos aceptamos o a las que nos adaptamos. [15]

4.2 Metodología de diseño

La Metodología de diseño es parte medular para que el desarrollo del diseño tenga un orden esquemático y secuencia de actividades que ayudan plantear diversas soluciones y hallar la óptima. Se define como el estudio de los principios, prácticas y procedimientos de diseño en un sentido amplio. Su objetivo central está relacionado con el cómo diseñar, e incluye el estudio de cómo los diseñadores trabajan y piensan; el desarrollo y aplicación de nuevos métodos, técnicas y procedimientos de diseño; y la reflexión sobre la naturaleza y extensión del conocimiento del diseño y su aplicación de problemas de diseño. [16]

En el diagrama mostrado en la Fig. 4.1 y en la Tabla 4.1 se aprecia la metodología usada para el diseño de los dispositivos de montaje.

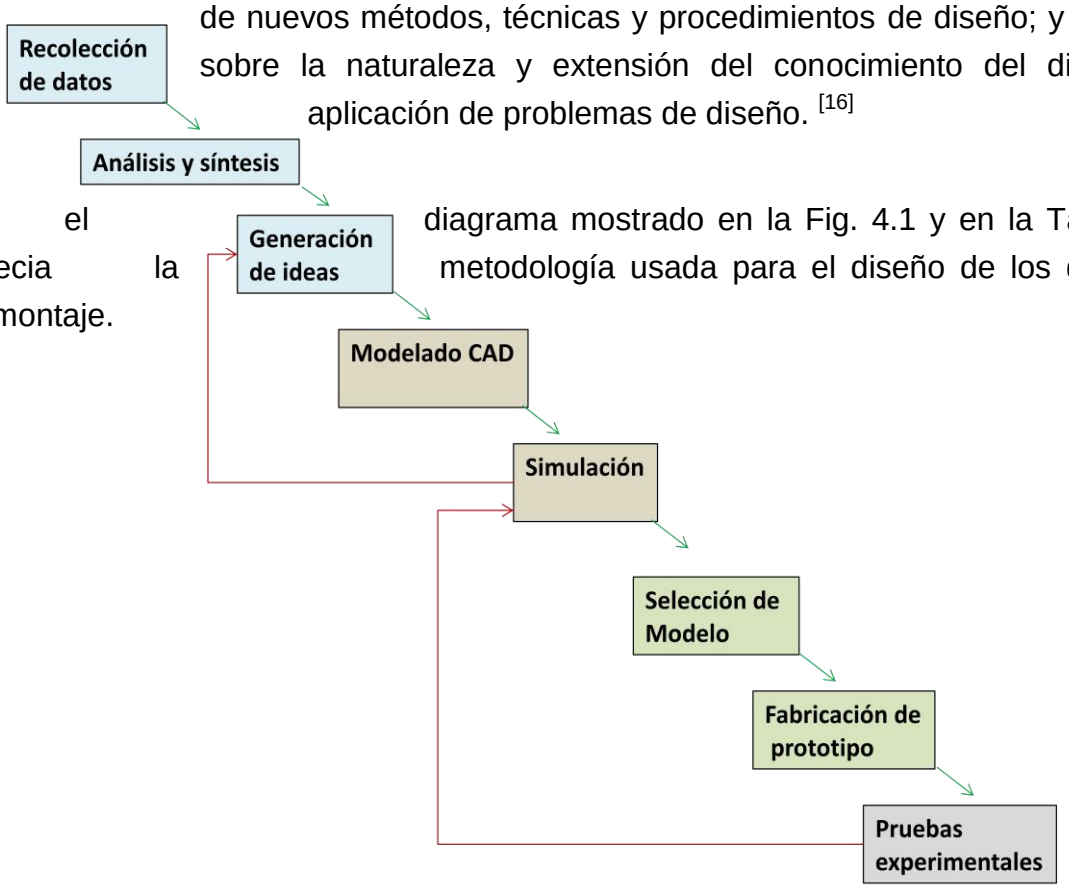


Fig. 4.1 Metodología de diseño a seguir

Tabla 4.1 Descripción de la Metodología

METODOLOGÍA DE DISEÑO	
Recolección de datos	Se refiere a la búsqueda y de información de todo lo referido a dispositivos de montajes y acelerómetros triaxiales ya sea en libros, artículos de investigación, páginas de internet y de la observación de dispositivos diseñados en el área de vibraciones y acústica.

Análisis y síntesis	Toda la información recabada se analiza detenidamente y se procesa para poder resumir lo más importante y lo que nos sirve para el diseño.
Generación de ideas	Una vez analizados todos los factores que influirán en nuestro dispositivo a diseñar, la creatividad juega un papel importante por que a partir de ella se generan propuestas de posibles soluciones inventando o innovando modelos del dispositivo.
Modelado CAD	Los modelos que nacen creativamente son computarizados mediante el software SOLIDWORKS® ya que de esta manera se tiene la versatilidad de ir modificándolos si fuera necesario sin tener tantas complicaciones
Simulación	A través del programa ANSYS® WORKBENCH se llevan acabo las simulaciones del comportamiento de los modelos bajo las condiciones de trabajos que serán sometidas, cual nos ayuda a visualizar si el modelo cumple o no nuestras expectativas.
Selección de modelo	Después de haber llevado a cabo la simulación con distintos modelos se selecciona el modelo óptimo que mejor satisfaga nuestras necesidades.

Fabricación de prototipo	Con la aproximación de la simulación y visto que el funcionamiento es óptimo se generan los planos para la fabricación del prototipo en el Laboratorio de Tecnología de Fabricación, adhiriéndonos a normas y documentación necesaria para ello.
Pruebas experimentales	Fabricado el prototipo se prosigue a probar su funcionamiento, para corroborar el funcionamiento obtenido de la simulación

4.3 Síntesis

Analizando toda la información recabada se sintetizó de la manera siguiente.

Los acelerómetros triaxiales que se encuentran en el mercado son de distintos tamaños y formas, sin embargo las características que predominan se muestran en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Características generales de acelerómetros triaxiales

Forma	Tamaño	Material	Masa	Punto de apoyo
Cúbica	De 6.1mm hasta 30 mm	Carcasa y soldado de titanio. Aleación de titanio Aleación de aluminio	De 0.8 gr hasta 16 gr	Adhesivo. Tornillos y roscas
Prisma rectangular, hexagonal y octagonal	De 14 mm hasta 25 mm	Aleación de titanio Aluminio anodizado	De 16 gr a 145 gr	Adhesivo. Tornillos y roscas
Cilíndrica	Altura de 8 mm a 33 mm Diámetro hasta 56 mm	Carcasa de aleación de titanio o aluminio	De 8 gr hasta 115 gr	Adhesivo. Tornillos y roscas

En la división se tienen acelerómetros triaxiales patrones de forma cúbica (28 mm) y miniacelerómetros en forma de tubos pequeños (5 mm), de los cuales es necesario diseñar dispositivos para su montaje.

Para nuestro dispositivo diseñado se consideran importante que debe contar con las características de ser:

a) Ligero
b) Resistente

Ligereza: Partimos de que la masa del acelerómetro triaxial, como vemos en la Tabla 5.2, en la mayoría de los casos es pequeña, y por lo que nuestro dispositivo sería óptimo al aproximarse a este. Sin embargo por los materiales usados para este tipo de dispositivos que soportan esfuerzos mecánicos, se supone la relación de ligereza dada por:

$$Masa\ del\ acelerómetro\ \leq Masa\ del\ dispositivo$$

Y por lo cual entre mayor sea la masa del dispositivo, el montaje que tendrá que excitar el Shaker será mucho mayor, repercutiendo en el trabajo que desempeñe este mismo, esto se puede ver mediante el siguiente análisis.

Sabemos que las ecuaciones que rigen el comportamiento de las vibraciones provocadas por el Shaker son la del movimiento armónico

$$X = A \sin \omega t \qquad (5.1)$$

$$\dot{X} = A \cos \omega t \qquad (5.\ 2)$$

$$\ddot{X} = -A\omega^2 \sin \omega t \qquad (5.3)$$

Donde los valores máximos son

$$|X| = A \qquad (5.\ 4)$$

$$|\dot{X}| = A\omega \qquad (5.5)$$

$$\left|\dot{X}\right| = A\omega^2 \qquad (5.6)$$

Y llamamos trabajo mecánico al que realiza una fuerza, que se define como el producto de la fuerza por la distancia recorrida por su punto de aplicación y por el coseno del ángulo que forman la una con el otro. Es una magnitud que está dada en unidades de energía en joules (J) se expresa como

$$W = dF \cos \alpha \qquad (5.7)$$

Donde:

W:Trabajo

d:distancia recorrida

F: fuerza

α: ángulo que forman la distancia y la fuerza

Para nuestro caso, el trabajo que realiza el shaker estaría dado por

$$Wsh = dF \cos \alpha \qquad (5.8)$$

Con la segunda ley de Newton definimos que la fuerza

$$F = ma \qquad (5.9)$$

Donde:

F= fuerza

m: masa

a: aceleración

La masa será, la masa total del montaje, es decir la suma de la masa del acelerómetro con la del dispositivo

$$m_t = m_{ac} + m_{disp} \tag{5.10}$$

La aceleración expresada en la Ec. 5.9 queda en función de la amplitud y del cuadrado de la frecuencia ω

Pero $\alpha = 0$, y la distancia que recorre la fuerza sería la amplitud máxima de la vibración por lo que

$$d = |X| \tag{5.11}$$

Así la Ec. 5.8 queda expresada como

$$Wsh = (m_{ac} + m_{disp})(A^2\omega^2) \tag{5.12}$$

Donde:

$Wsh = trabajo\ realizado\ por\ el\ Shaker$

$m_{ac} = masa\ del\ acelerómetro$

$m_{disp} = masa\ del\ dispositivo$

$A = Amplitud\ de\ la\ vibración$

$\omega = frecuencia\ de\ la\ vibración$

Se puede constatar que el trabajo que realice el Shaker es proporcional a la masa del montaje y al producto de los cuadrados de la magnitud y frecuencia.

De la Ec. 5.12, el parámetro que podemos controlar con nuestro diseño es la masa del dispositivo, puesto que la masa del acelerómetro depende del tipo de acelerómetro con el cual se trabaje, las amplitudes y frecuencias depende de las condiciones de trabajos a las que se requieran someter los acelerómetros.

Resistencia: Podemos definirla como la capacidad de un elemento para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, sin adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo. Un modelo de resistencia de materiales establece una relación entre las fuerzas aplicadas, también llamadas cargas o acciones, de los esfuerzos y desplazamientos inducidos por ellas.

Para el diseño mecánico de elementos con geometrías complicadas la resistencia de materiales suele ser insuficiente y es necesario usar técnicas basadas en la teoría de la elasticidad o la mecánica de sólidos deformables más generales.

Para nuestro diseño, se debe considerar un material resistente a esfuerzos. Para ello calculamos una fuerza máxima a la cual se podría ver afectada la pieza que se quiere construir, la cual suponemos como máxima la que se puede generar como producto del efecto de la aceleración que alcanza el Shaker y de su propia masa.

4.4 Diseño Creativo del dispositivo

Con la lluvia de ideas se propusieron distintos dispositivos como los que se muestran en las Fig. 4.4 y 4.5 para los dos tipos de acelerómetros triaxiales patrón.

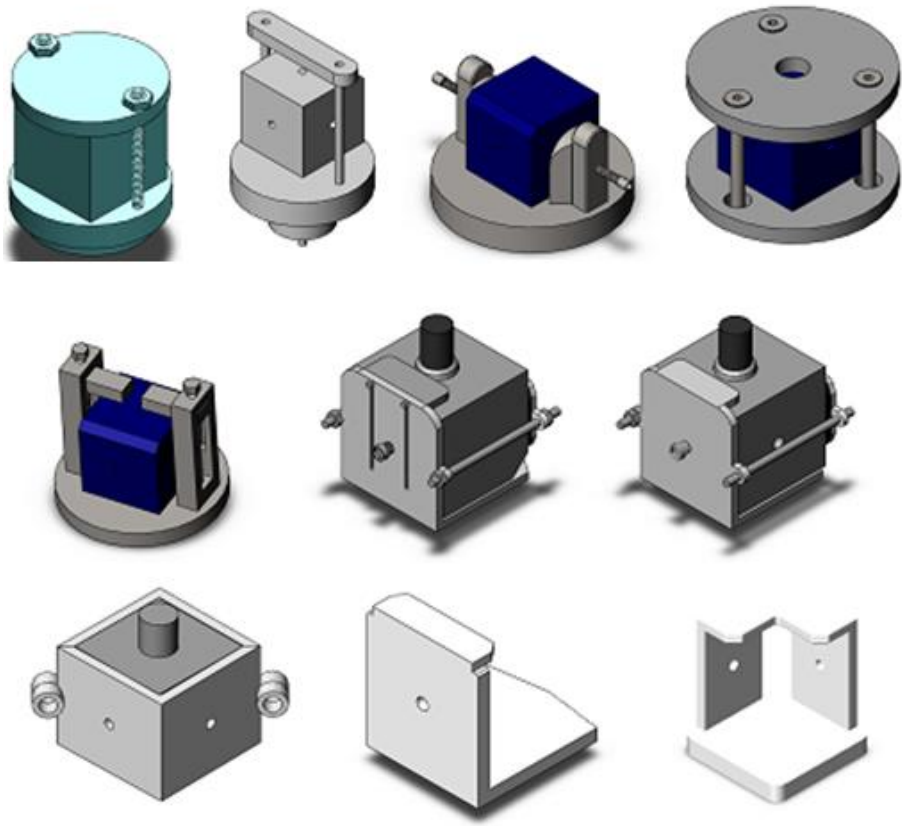


Fig. 4.4 Dispositivo para acelerómetro cubico

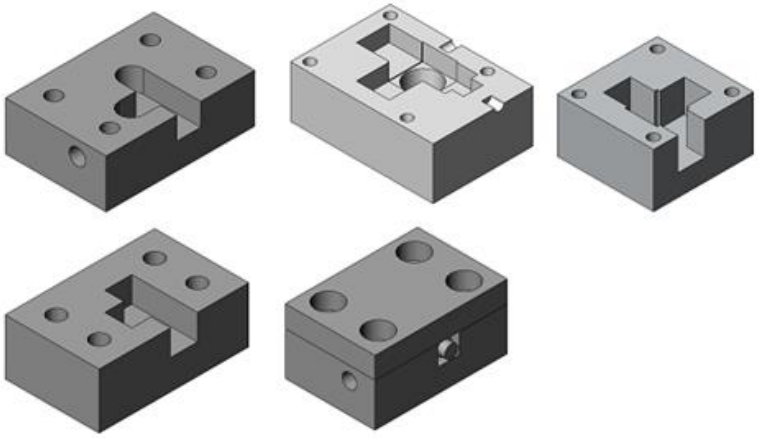


Fig.4.5 Dispositivo para mini acelerómetros

Los dispositivos parecidos en funcionamiento al de la Fig. 4.6 no son aplicables, ya que la idea de hacer un dispositivo ajustable a tamaño y formas ocasiona que no se cumplan requerimientos importantes siendo desventajas notorias.

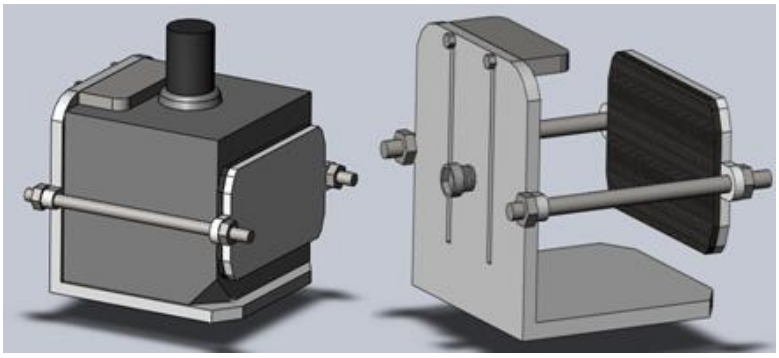


Fig. 5.6 Base ajustable

Desventajas:

- Las partes móviles necesitan de elementos que las sujeten como tornillos, pernos o tuercas, lo cual aumenta masa a nuestro dispositivo, haciéndole pesado.
- Al cambiar el tamaño del acelerómetro el eje sensible de excitación de la pieza no coincide con el del acelerómetro.
- Posibles holguras susceptibles a la vibración en los elementos deslizantes
- Maquinado difícil por el tamaño de piezas
- Poco estético

4.5 Selección del dispositivo

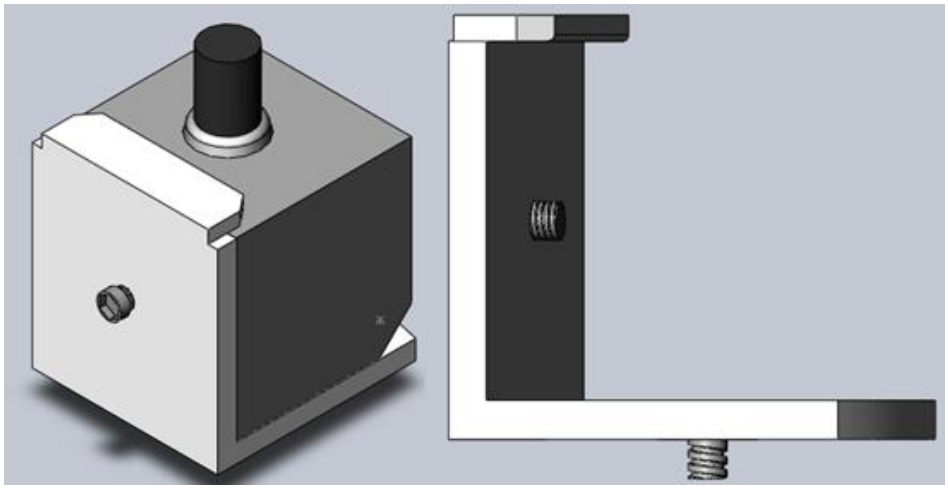


Fig. 4.7 base para único acelerómetro

En la Fig. 4.7 se muestra el dispositivo que se piensa es el más adecuado. El hacer una base únicamente para el acelerómetro que se va usar es necesario para no tener las desventajas mencionadas en las bases ajustables que serían muy perjudiciales para las calibraciones. Sobre este diseño se hicieron los cálculos y análisis.

Descripción:

Es una base en forma de escuadra, con una pequeña cejilla en la parte superior para que el acelerómetro no sea desplazado en dirección del eje de vibración, consta de un barreno para tornillo 10-32 (UNF)que sujete a la cara lateral al acelerómetro, al igual un tornillo de igual medida para sujetarse a la base montada sobre el Shaker. El material del que se

propone es Acero inoxidable antimagnético, pudiendo soportara los esfuerzos y desgaste a los que se someterá, así como la corrosión.

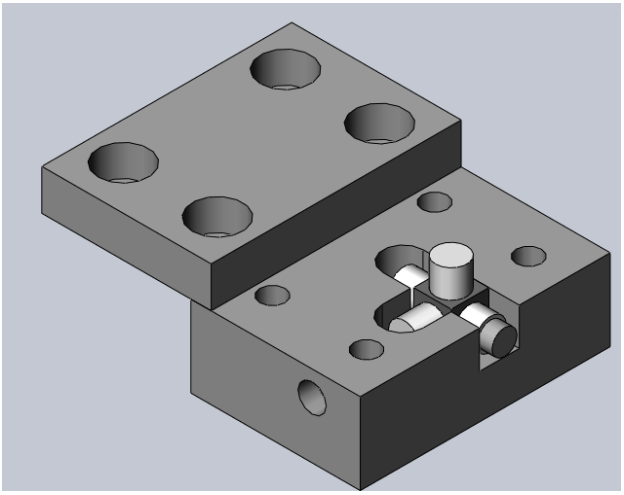


Fig. 4.8 Dispositivo para mini acelerómetro

En la Fig. 4.8 se muestra otro dispositivo para acoplar y montar el mini acelerómetro de marca Kistler modelo 8694M1.

Descripción:

El material propuesto para aligerar la masa es Aluminio además de que no estará sometido a grandes esfuerzos. Este dispositivo consta de dos placas, de las cuales la placa inferior es tipo molde, donde el mini acelerómetro es colocado y con la otra es cubierto y aprisionado. Consta con barrenos para tornillos M4 (norma DIN) para que las dos placas queden sujetadas cara a cara en cuyos orificios lleva insertos de acero para que los tornillos no desgasten al aluminio, además de que por las caras que están en dirección perpendicular de los ejes sensibles tienen barrenos para opresores 10-32 (UNF) que sirven para poder montarlos sobre las placas acopladas al Shaker.

Por las limitaciones del Laboratorio de Tecnología de Fabricación que tienen para los maquinados y que los tiempos de fabricación no se prolonguen el diseño tuvo que ser modificado como se muestra en la Fig.4.9 afectando en lo estético de la pieza.

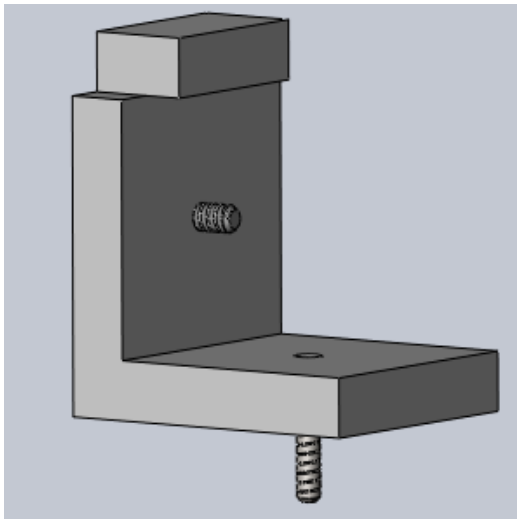


Fig. 4.9 Base modificada

4.6 Análisis de esfuerzos y deformaciones

Como datos para los cálculos se tiene que:

- La aceleración máxima que genera el Shaker BK type 4809 según sus hoja de especificaciones en condiciones normales es de 75 g ó 736 m/s^2.
- El desplazamiento máximo que puede proporcionar es de 8 mm.
- La masa del acelerómetro y la del dispositivo suman aproximadamente 220 gr.

Si calculamos por la segunda Ley de Newton la fuerza se expresa como

$$F = ma \tag{5.13}$$

Con los datos, sustituimos en Ec. 12 y nos queda que

$$F = (0.22kg)(736\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s2}}) \tag{5.14}$$

$$F = 161.92\ N$$

Si hacemos un análisis que esta fuerza es aplicada a los extremos de las caras perpendiculares al eje de vibración, y con ayuda de la simulación de los esfuerzos y deformaciones con el programa SOLIDWORKS obteneos los siguientes resultados.

4.6.1 Dispositivo para acelerómetro cúbico

Primer caso: la fuerza es aplicada sobre la cara superior (cejilla corta) como se muestra en la Fig. 4.10

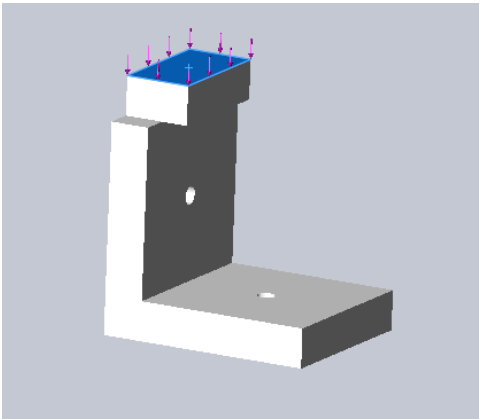


Fig. 4.10 Fuerza distribuida

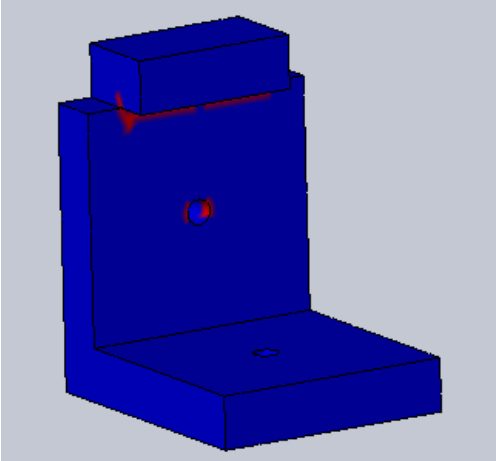


Fig. 4.11 Fallo de la pieza

Obtenemos que el factor de seguridad para esta carga es de 47, es decir para que la pieza falle se tiene que aplicar la fuerza multiplicada por un numero arriba de 47. En la Fig. 4.11 se aprecia de color rojo donde comenzará a fallar una vez sobre pasado el factor de seguridad

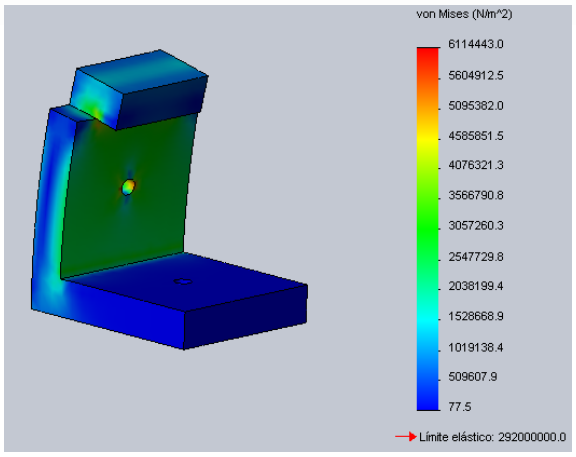


Fig. 4.12 Esfuerzos principales

En la Fig. 4.12 se muestran los esfuerzos máximos y mínimos de Von mises, los cuales por la magnitud de la fuerza son muy pequeños.

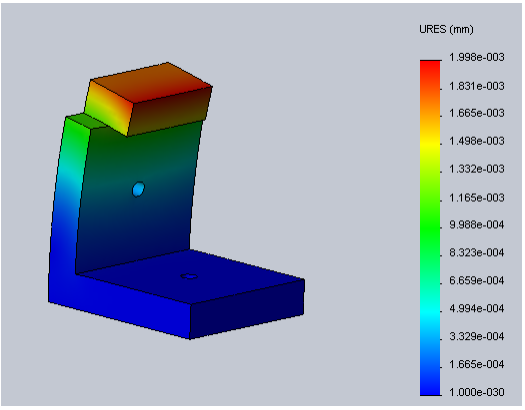


Fig. 4.13 Deformaciones

En la Fig. 4.13 se aprecian las deformaciones o desplazamientos estáticos mínimos y máximos que presenta la pieza.

Segundo caso: la fuerza es aplicada sobre la cara inferior (base) como se ve en la Fig. 4.14

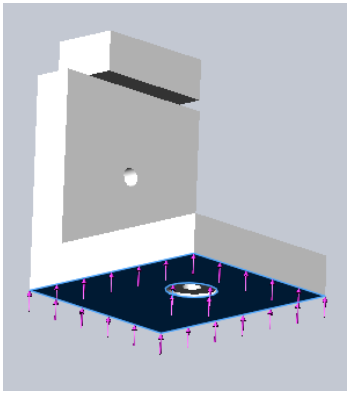


Fig. 4.14 Fuerza distribuida

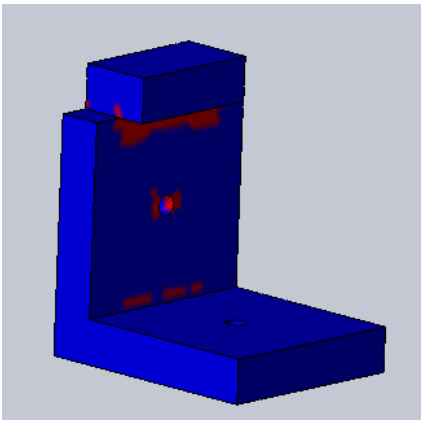


Fig. 4.15 Fallo de la pieza

Obtenemos que el factor de seguridad para esta carga es de 11, es decir para que la pieza falle se tiene que aplicar la fuerza multiplicada por un número mayor o igual a 11. En la Fig. 4.15 se aprecia de color rojo donde comenzará a fallar una vez sobre pasado el factor de seguridad. El resultado, al primer caso varía mucho, pues la base de apoyo ahora es muy pequeña y la cara donde se aplica mucho más larga, por el cual existen mayores momentos flectores y por consecuencia mayores esfuerzos.

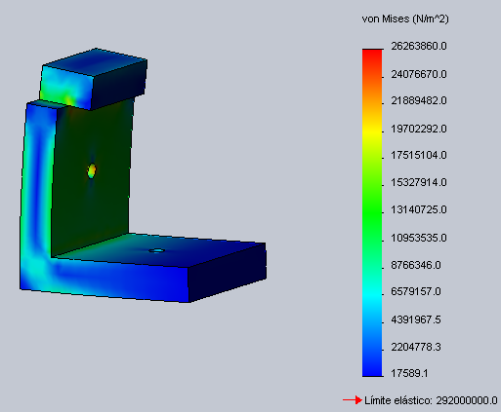


Fig. 4.16 Esfuerzos principales

En la fig. 4.16 se muestran los esfuerzos máximos y mínimos de Von mises para este segundo caso, los cuales por la magnitud de la fuerza son muchos más grandes que los del primer caso.

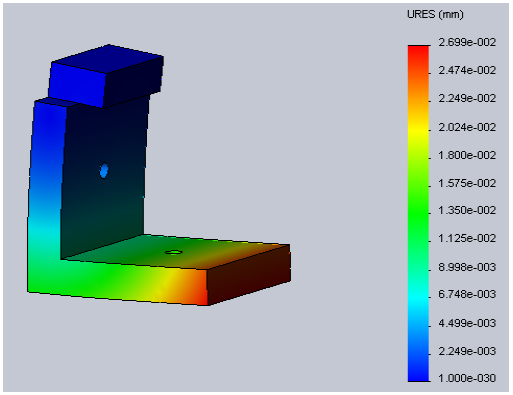


Fig. 4.17 Deformaciones

En la Fig. 4.17 se aprecian las deformaciones o desplazamientos estáticos mínimos y máximos que presenta la pieza.

4.6.2 Dispositivo para mini acelerómetro

Como las placas quedan rígidas por los tornillos, suponemos nuestro análisis como toda una sola pieza como se ve en la Fig. 4.18

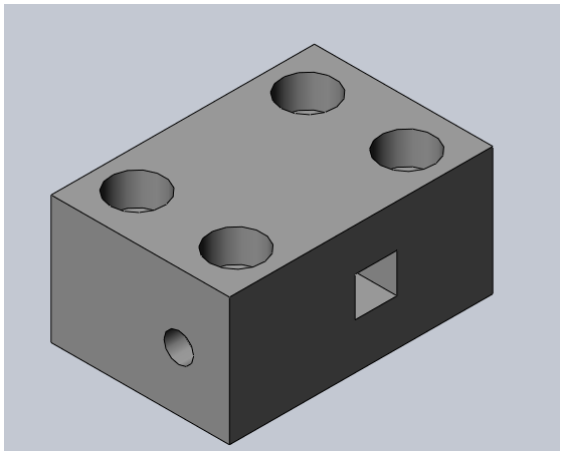


Fig. 4.18 acoplamiento rígido

Primer caso: la fuerza es aplicada sobre la cara superior como muestra la Fig. 4.19

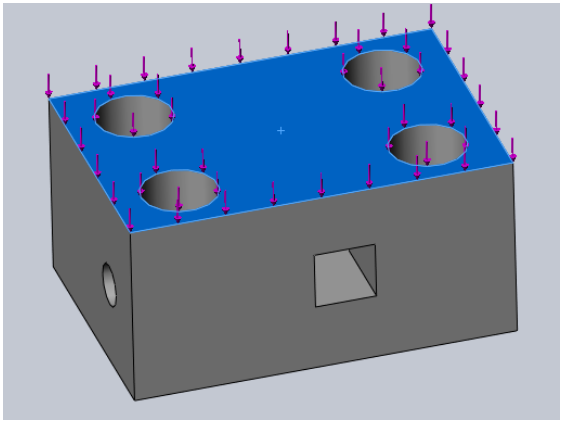


Fig. 4.19 Fuerzas aplicada en la cara superior

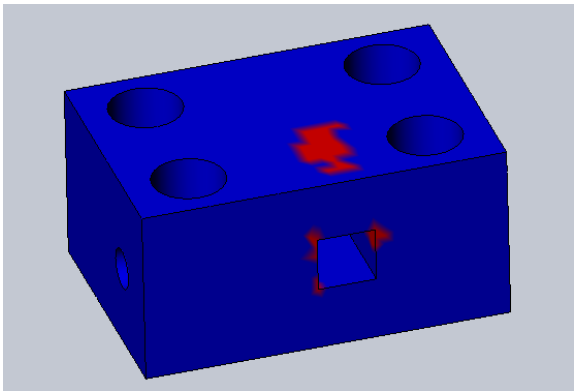


Fig. 4.20 Fallas o rupturas de la pieza

Obtenemos que el factor de seguridad para esta carga es de 39, es decir para que la pieza falle se tiene que aplicar la fuerza multiplicada por un numero arriba de 39. En la Fig. 4.20 se aprecia de color rojo donde comenzará a fallar una vez sobre pasado el factor de seguridad.

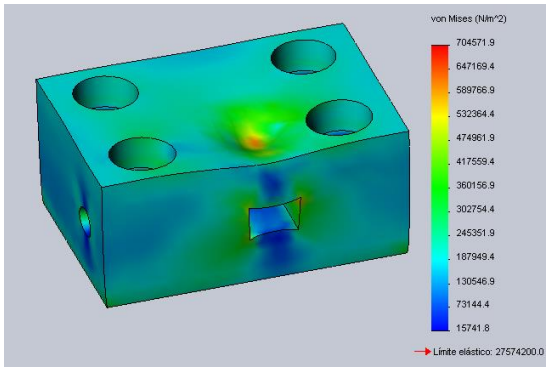


Fig. 4.21 Esfuerzos de Von mises del molde

En la Fig. 4.21 se muestran los esfuerzos máximos y mínimos de Von mises, los cuales por la magnitud de la fuerza son muy pequeños.

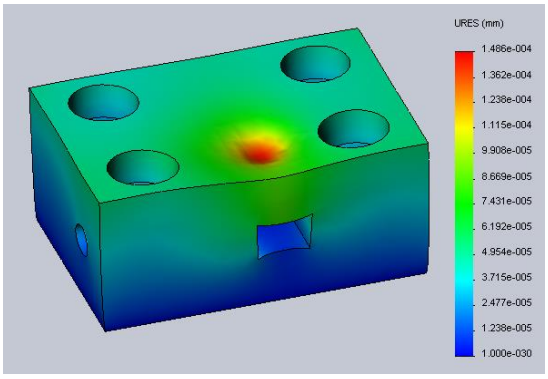


Fig. 4.22 Deformaciones del molde

En la Fig. 4.22 se aprecian las deformaciones o desplazamientos estáticos mínimos y máximos que presenta la pieza.

Segundo caso: la fuerza es aplicada sobre la cara inferior como se ve en la Fig. 4.23

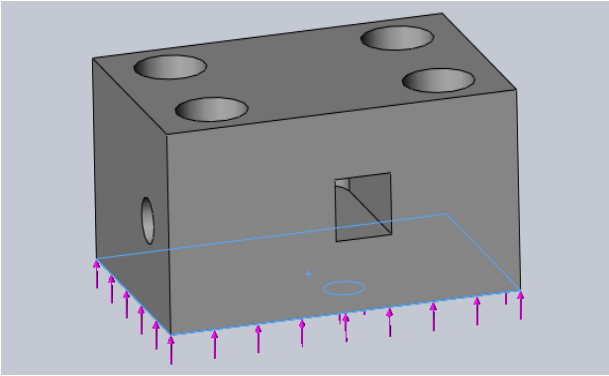


Fig. 4.23 Fuerzas aplicadas en cara inferior

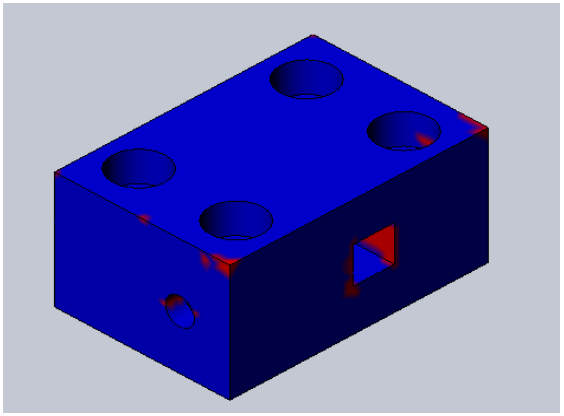


Fig. 4.24 Rupturas o fallos del molde

Obtenemos que el factor de seguridad para esta carga es de 44, es decir para que la pieza falle se tiene que aplicar la fuerza multiplicada por un número mayor o igual 44. En la Fig. 4.24 se aprecia de color rojo donde comenzará a fallar una vez sobre pasado el factor de seguridad.

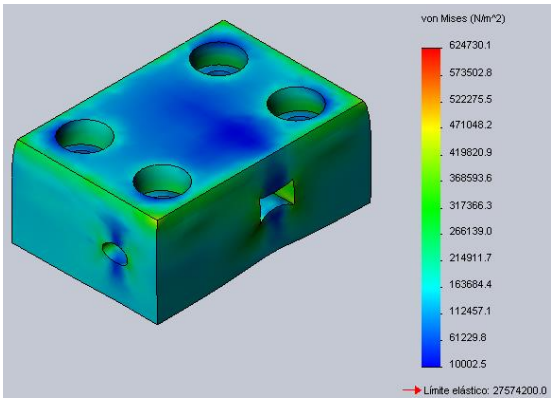


Fig. 4.25 Esfuerzos de Von mises

En la fig. 4.25 se muestran los esfuerzos máximos y mínimos de Von mises para este segundo caso, los cuales por la magnitud de la fuerza son muchos más grandes que los del primer caso.

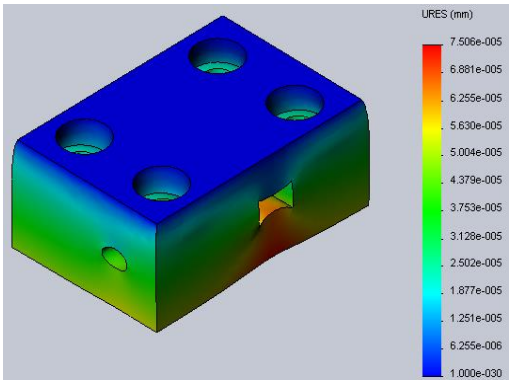


Fig. 4.26 Deformaciones del molde

En la Fig. 4.26 se aprecian las deformaciones o desplazamientos estáticos mínimos y máximos que presenta la pieza.

4.7 Modelado del dispositivo

El modelado del dispositivo diseñado se lleva a cabo con el programa ANSYS® WORBENCH, el cual consiste de un análisis de vibraciones llamado análisis modal que nos servirá para obtener las frecuencias naturales del dispositivo.

4.7.1 Validación del método

Para nuestra pieza no existe en sí alguna relación para analizar toda la pieza, sería tedioso y complicado desarrollar el modelo matemático y darle solución a las ecuaciones para el análisis modal teórico además del tiempo que requeriría, sin embargo el software ANSYS que aplica el método de elemento finito nos proporciona una herramienta útil para poder analizar estructuras complejas de manera rápida y con mucha certeza.

Para comparar el funcionamiento y las variaciones que puede tener el software con los cálculos teóricos de los análisis matemáticos se analizará y obtendrán las frecuencias naturales de los distintos modos para una placa cuyo modelo ya se ha demostrado matemáticamente, a su vez también se hará el análisis con ANSYS y las diferencias de los parámetros obtenidos.

Para la validación del uso del software se utiliza una placa como se muestra en la Fig. 4.27 cuya forma y medidas se basan de nuestro diseño, ya que si discretizamos obtendríamos elementos más simples para su análisis como son placas y barras. Pero sin duda sería un error analizar en el análisis modal de toda la pieza diseñada solo como esta placa.

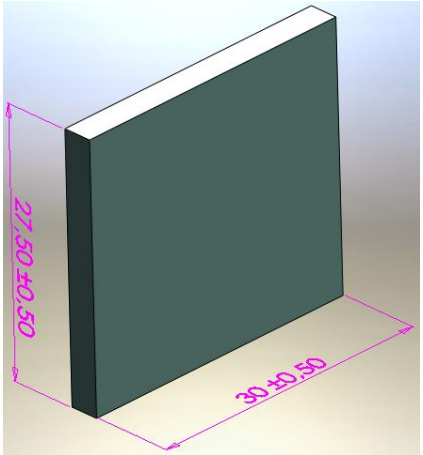


Fig. 4.27 Placa a validar

Cálculos de las frecuencias naturales por modelo matemático

Para hallar las frecuencias naturales y las formas modales de este elemento, por sus características se toma como una vibración longitudinal de una barra.

Las frecuencias de vibración se hallan por

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (5.13)$$

$$f_n = \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (5.14)$$

Donde:

ω_n: frecuencia natural circular en rad/seg

f_n: frecuencia natural en Hz

E: modulo de elasticidad del material (Pa ò Psi)

ρ: densisad del material (Kg/m^3)

l: longitud de la barra (m)

n: $modos$ $(1,2,3,4 \ldots)$

Datos:

Como datos por forma y características de la barra tenemos que:

l=0.0275m

ρ=7 850 (Kg/m^3) para acero estructural

E= 210 Gpa

Sustituyendo en las ecuaciones 5.13 y 5.14 Obtenemos los siguientes resultados mostrados en la tabla 5.4

Analisis modal de una barra con vibración libre transversal			
f_n(HZ)	ω_n (rad/seg)	$Modos\ \ n$	$l(m)$
94039,89369	590870,0784	1	0,0275
188681,6442	1185521,735	2	0,0275
283022,4664	1778282,602	3	0,0275
377363,2885	2371043,47	4	0,0275
471704,1106	2963804,337	5	0,0275
566044,9327	3556565,205	6	0,0275
660385,7548	4149326,072	7	0,0275
754726,577	4742086,94	8	0,0275
849067,3991	5334847,807	9	0,0275
943408,2212	5927608,675	10	0,0275

Tabla 4.3 Resultados de las frecuencias naturales calculadas

Cálculos de las frecuencias naturales por ANSYS

Al iniciar el programa y cargar nuestro archivo, la pantalla aparece como se muestra en la Fig. 4.28. Los pasos que se siguen en el programa son:

- insertar el análisis modal
- seleccionar la geometría
- verificar o especificar el material
- especificar el número de modos
- insertar suportes, restricciones o puntos de apoyo

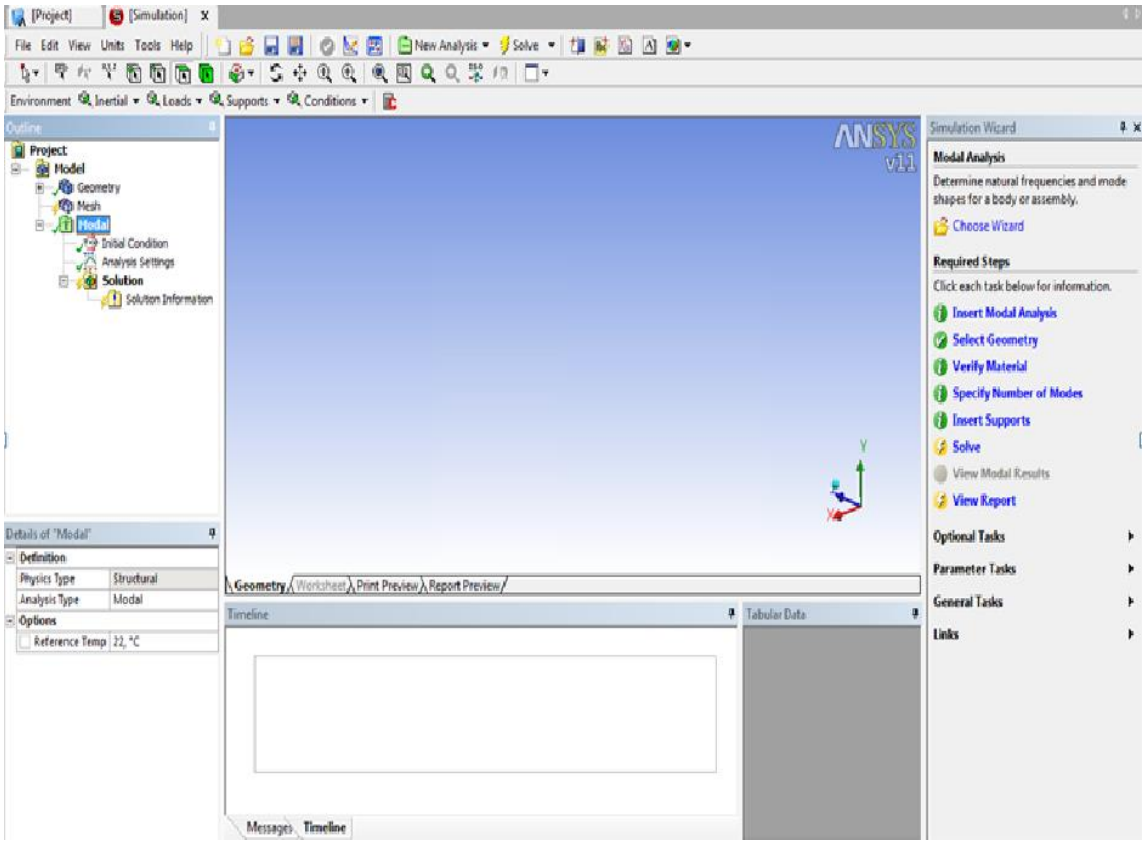


Fig.4.28 Espacio de trabajo en ANSYS

Primero se especifica el tipo de análisis que debe realizar el programa, para este caso es un análisis modal. Siguiendo el proceso para analizar mediante el software tenemos que introducir la geometría del elemento, la cual se muestra en la Fig. 4.29

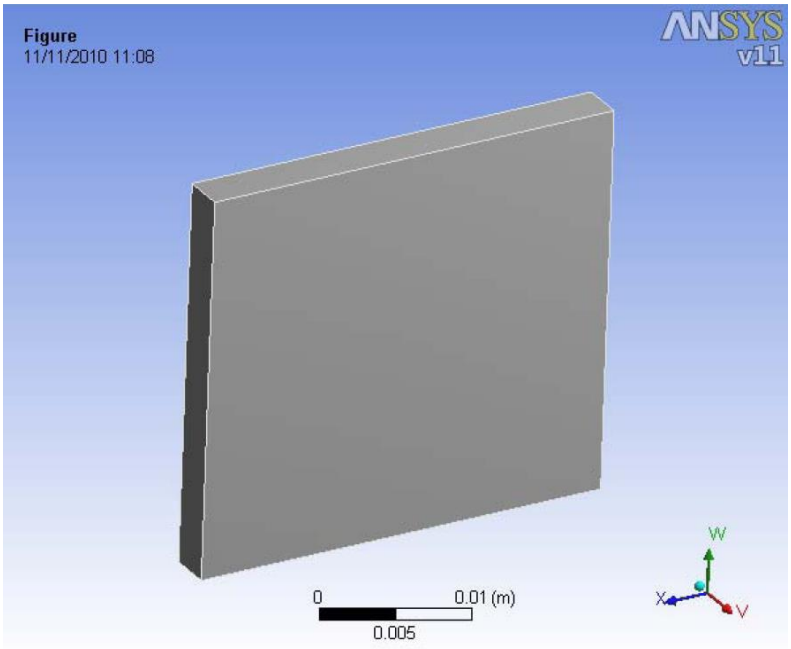


Fig. 4.29 Geometría para analizar en la validación

También es preciso definir las características del material (ver Tabla 4.4), de manera siguiente aplicarlo al modelo.

Tabla 4.4 Propiedades de material

Structural	
Young's Modulus	2,e+011 Pa
Poisson's Ratio	0,3
Density	7850, kg/m³
Thermal Expansion	1,2e-005 1/°C
Tensile Yield Strength	2,5e+008 Pa
Compressive Yield Strength	2,5e+008 Pa
Tensile Ultimate Strength	4,6e+008 Pa
Compressive Ultimate Strength	0, Pa
Thermal	
Thermal Conductivity	60,5 W/m·°C
Specific Heat	434, J/kg·°C
Electromagnetics	
Relative Permeability	10000
Resistivity	1,7e-007 Ohm·m

El mallado es propuesto por el software solo se tiene que definir el tipo de elemento se va usar (ver Fig. 3.16) , aunque nosotros podemos enmallar de manera manual cuando se requiera. Nuestra malla se muestra en la Fig. 4.30

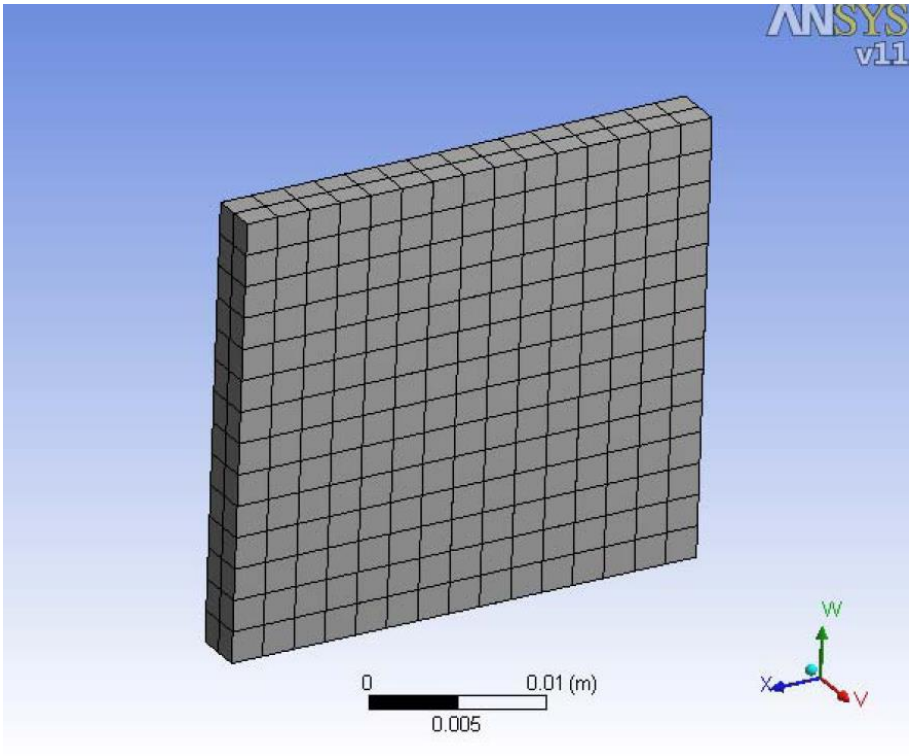


Fig. 4.30 mallado para figura de validación

Para la solución se aplican las restricciones o soportes que para este análisis no se restringe por ser una vibración libre. Se especifica el número de modos que se quieren y los intervalos de vibración a los cuales se va analizar como muestra la Tabla 4.5 Para este caso debido a que los cálculos teóricos están en un intervalo de frecuencias de 90 kHz a 950 kHz.

Tabla 4.5 Especificaciones de intervalos de análisis para validación

Max Modes to Find	100
Limit Search to Range	Yes
Range Minimum	50000 Hz
Range Maximum	3,e+005 Hz

Para este caso se analiza como una vibración libre, por lo que no se aplican ningún tipo de restricciones o soportes.

Los resultados que nos proporciona ANSYS se ven en los siguientes gráficos (Fig. 4.31 y Tabla 4.6)

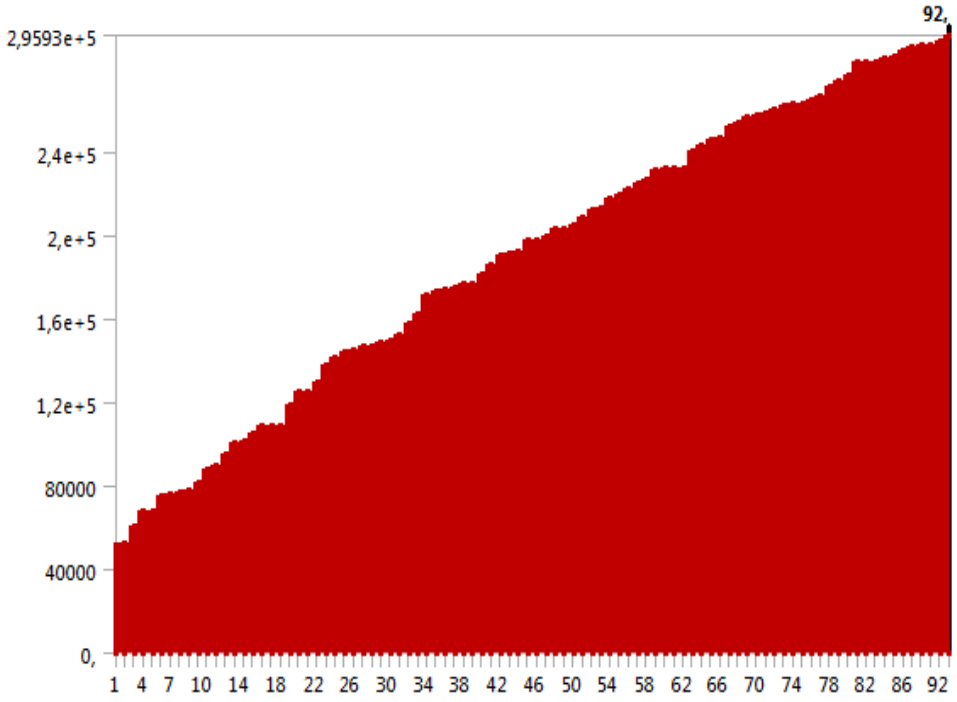


Fig. 4.31 Grafica de modos vs frecuencia de la validación

Tabla 4.6 Resultados de las frecuencias de los modos para la validación

Mode	Frequency [Hz]
1,	52135
2,	52655
3,	60939
4,	67921
5,	68097
6,	75461
7,	76658
8,	77112
9,	78507
10,	81701
11,	87735
12,	89444
13,	95327
14,	1,006e+005
15,	1,0186e+005
16,	1,0566e+005
17,	1,0869e+005
18,	1,0873e+005
19,	1,0922e+005
20,	1,1851e+005
21,	1,2494e+005
22,	1,2536e+005
23,	1,3023e+005
24,	1,3758e+005
25,	1,4201e+005
26,	1,4456e+005
27,	1,4491e+005
28,	1,469e+005
29,	1,4741e+005
30,	1,4884e+005
31,	1,4946e+005
32,	1,5233e+005
33,	1,5795e+005
34,	1,6278e+005
35,	1,7145e+005
36,	1,7306e+005
37,	1,7399e+005
38,	1,7489e+005
39,	1,7709e+005
40,	1,7744e+005
41,	1,8168e+005
42,	1,8591e+005
43,	1,9059e+005
44,	1,9172e+005
45,	1,924e+005
46,	1,977e+005
47,	1,9823e+005
48,	1,9982e+005
49,	2,0331e+005
50,	2,0353e+005
51,	2,0515e+005
52,	2,0834e+005
53,	2,1236e+005
54,	2,134e+005
55,	2,1775e+005
56,	2,1936e+005
57,	2,2242e+005
58,	2,2549e+005
59,	2,2686e+005
60,	2,3128e+005
61,	2,3247e+005
62,	2,3257e+005
63,	2,3268e+005
64,	2,405e+005
65,	2,4317e+005
66,	2,4583e+005
67,	2,466e+005
68,	2,5245e+005
69,	2,5457e+005
70,	2,5658e+005
71,	2,5816e+005
72,	2,5831e+005
73,	2,6013e+005
74,	2,6204e+005
75,	2,6293e+005
76,	2,6365e+005
77,	2,6545e+005
	2,6653e+005
79,	2,7098e+005
80,	2,74e+005
81,	2,7683e+005
82,	2,8285e+005
83,	2,8343e+005
84,	2,8359e+005
85,	2,8512e+005
86,	2,8598e+005
87,	2,8865e+005
88,	2,9064e+005
89,	2,9142e+005
90,	2,9151e+005
91,	2,9361e+005
92,	2,9593e+005

Comparación cálculos de las frecuencias naturales por modelo matemático y los cálculos de las frecuencias naturales por ANSYS

Los modos 1,2 y 3 de nuestros cálculos corresponden de manera aproximada a los 13, 43 y 84 calculados por ANSYS y mostrados en las Fig. 4.32 ,4.33 y 4.34, en la Tabla 4.7 se muestra la diferencia que existe entre estos valores.

Tabla 4.7 resultados de comparación de frecuencias

TEÓRICO	ANSYS	DIFERENCIA
94 039.8937	95 327	1 287.10632
188 681.644	190 590.00	1 908.36
283 022.466	283 590.00	567,53

Los valores son aceptables para la validación puesto que el intervalo para las diferencias no debe superar los 2 000 Hz.

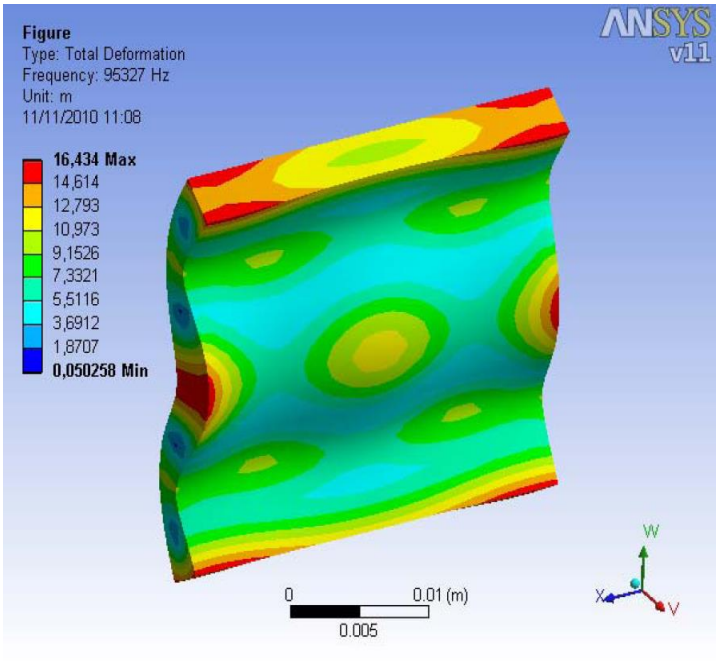


Fig. 4.32 Modo 16

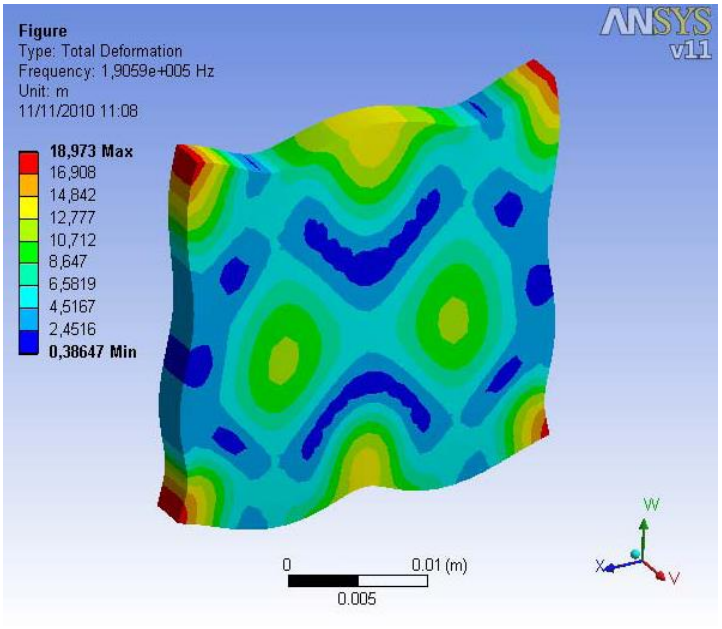


Fig. 4.33 Modo 43

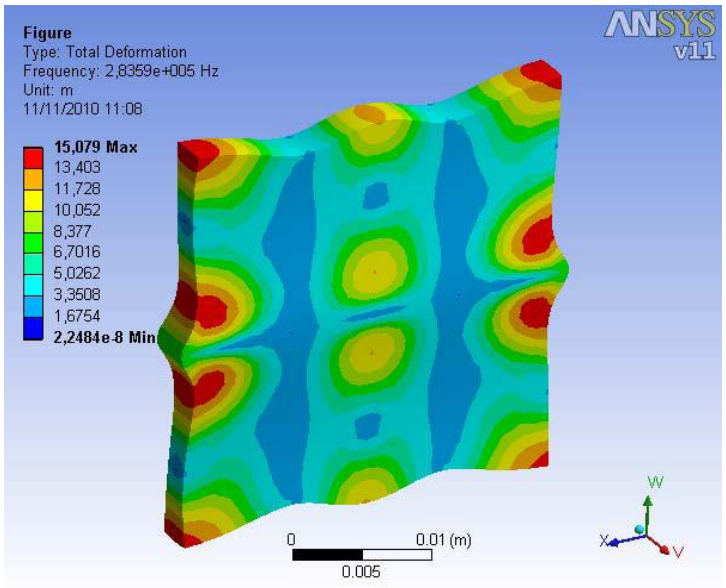


Fig. 4.34 Modo 84

4.7.2 Cálculos de las frecuencias naturales de las piezas diseñadas

Dispositivo para acelerómetro cúbico

Para analizar la pieza diseñada se siguen los pasos usados anteriormente en la validación del método.

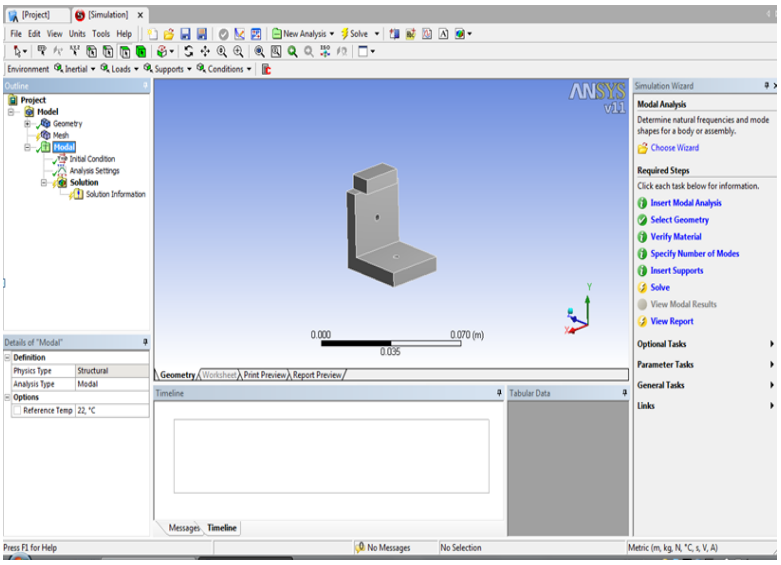


Fig. 4.35 Pantalla del archivo en ANSYS

Primero Especificamos que se requiere análisis modal. Introducimos la geometría del elemento, la cual se muestra en la Fig. 4.36

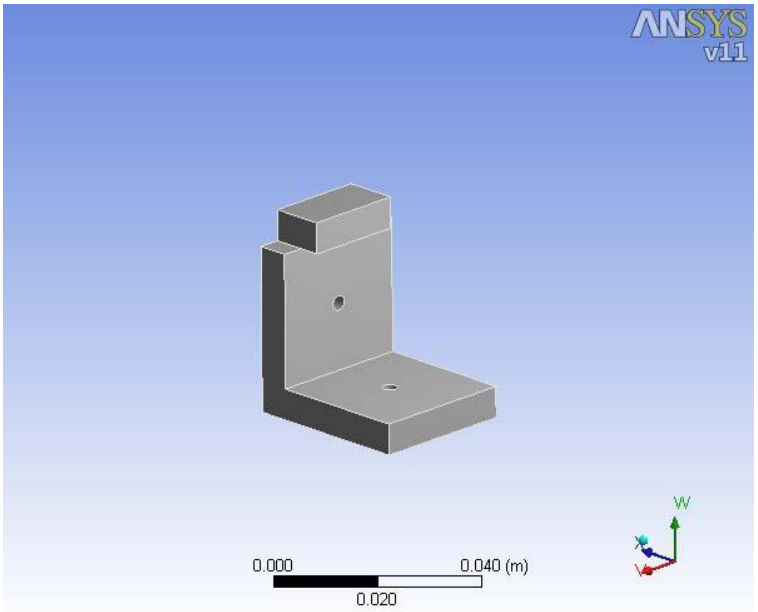


Fig. 4.36 Geometría para analizar

Aplicamos como material al Acero Inoxidable (ver Tabla 4.8) de manera siguiente aplicarlo al modelo.

Tabla 4.8 Propiedades del Acero inoxidable

ACERO INOX > Constants

Structural	
Young's Modulus	2,1e+011 Pa
Poisson's Ratio	0,27
Density	7800, kg/m³

Se define el elemento y el mallado como se muestra en la Fig. 4.37

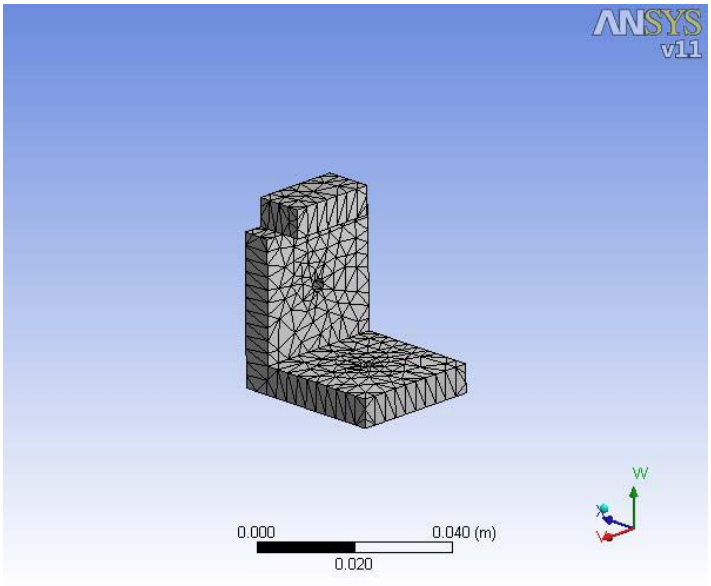


Fig. 4.37 Mallado de la pieza

El número de modos que se quieren y los rangos de vibración a los cuales se va analizar se muestran en la Tabla 4.9

Tabla 4.9 Especificaciones de intervalos de análisis

Options	
Max Modes to Find	100
Limit Search to Range	Yes
Range Minimum	0, Hz
Range Maximum	10000 Hz

Para este caso se analiza como una vibración libre, por lo que no se aplican ningún tipo de restricciones o soportes.

Los resultados que nos proporciona ANSYS se ven en los siguientes gráficos (Fig. 4.38 y Tabla 4.10)

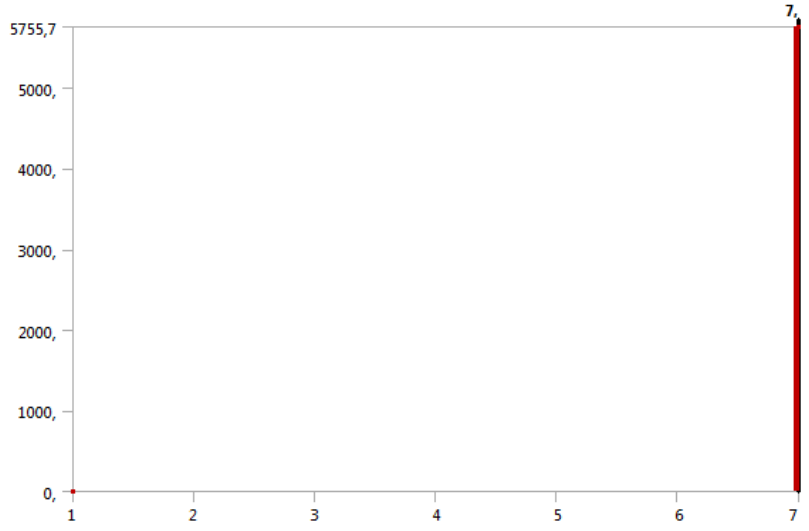


Fig. 4.38 Grafica de modos vs frecuencia

Tabla 4.10 Resultados de las frecuencias

Mode	Frequency [Hz]
1,	0,
2,	
3,	
4,	1,0915e-002
5,	1,1564e-002
6,	2,151e-002
7,	5755,7

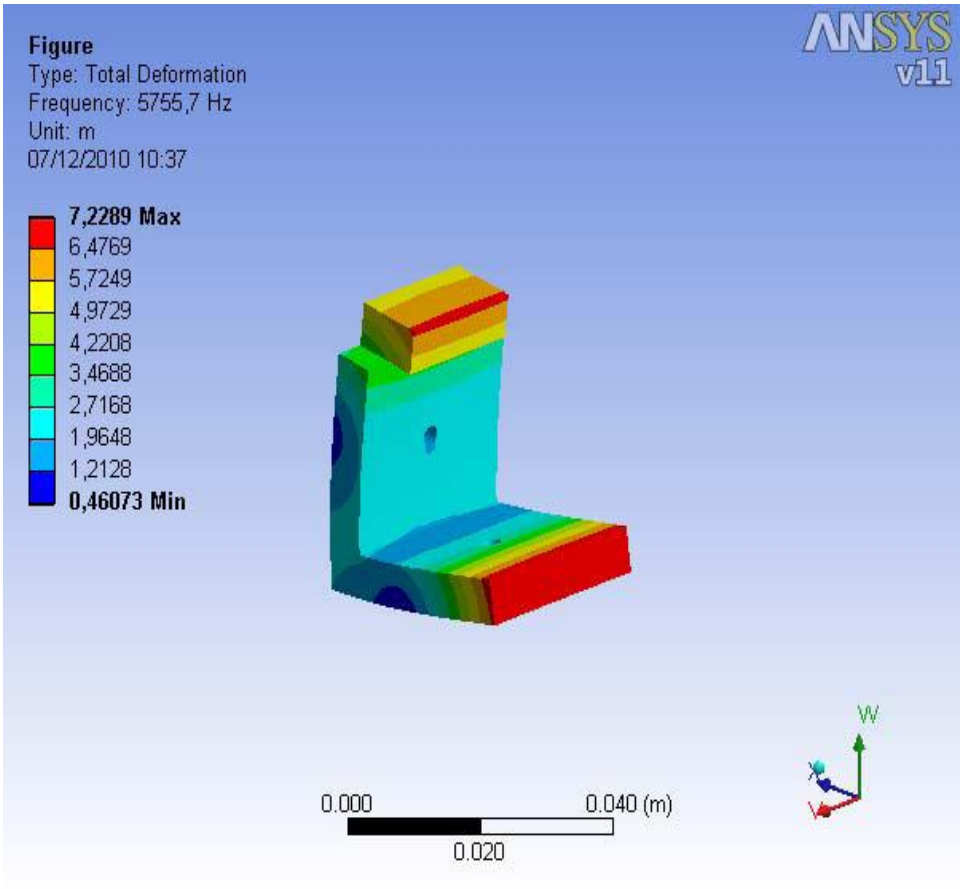


Fig.4.39 Modo 7

El análisis anterior muestra que en el intervalo que se opera para las calibraciones de bajas frecuencias (2 Hz a 160 Hz) no existe una frecuencia natural en donde al coincidir con una fuerza excitatriz pudiera ocurrir el fenómeno de resonancia y afectar los valores medidos por el acelerómetro. Puesto que la frecuencia natural encontrada mas próxima es de 5 755.7 Hz, cuyo valor sobrepasa las frecuencias caracterizadas para calibraciones (ver Tabla 4.11), se asegura que las mediciones no tendrán errores causados por resonancia en el montaje.

Tabla 4.11 Frecuencias caracterizadas para calibración interna

Frecuencias de excitación para calibraciones	**0.4, 0.8, 1, 1.2, 1.6, 2, 4, 5, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.6, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160 (Hz)**

Dispositivo para mini acelerómetro

Primero Especificamos que se requiere análisis modal. Introducimos la geometría del elemento, la cual se muestra en la Fig. 4.40

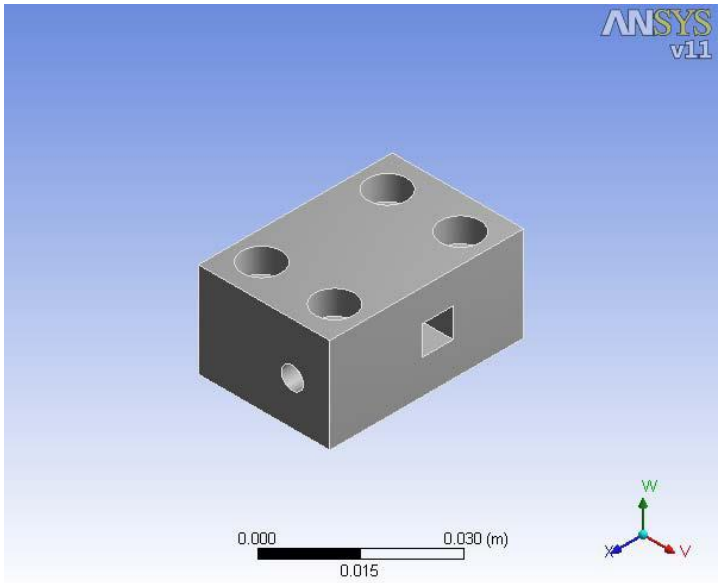


Fig. 4.40 Geometría para analizar

Aplicamos como material al Acero Inoxidable (ver Tabla 4.12) de manera siguiente aplicarlo al modelo.

Tabla 4.12 Propiedades del Aluminio

Structural	
Young's Modulus	7,e+010 Pa
Poisson's Ratio	0,33
Density	2710, kg/m³

Se define el elemento y el mallado como se muestra en la Fig. 4.41

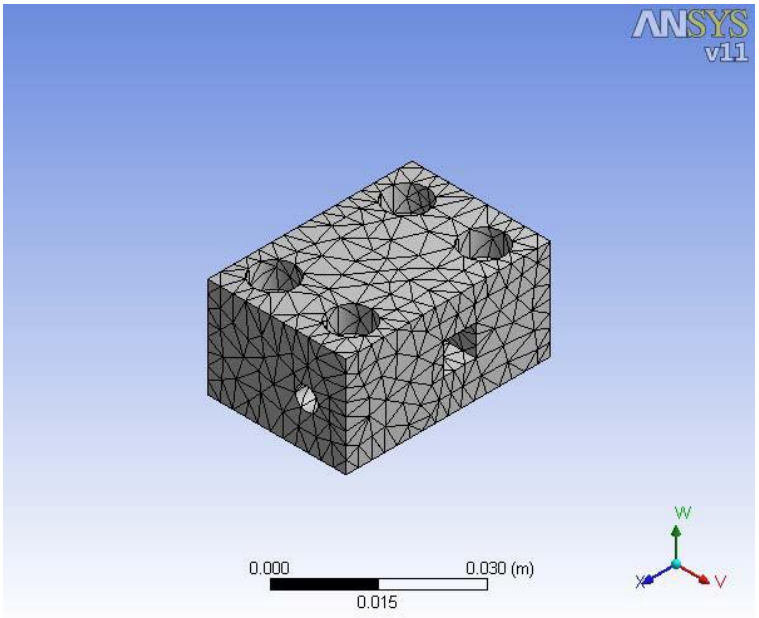


Fig. 4.41 Mallado de la pieza

El número de modos que se quieren y los rangos de vibración a los cuales se va analizar se muestran en la Tabla 4.13

Tabla 4.13 Especificaciones de intervalos de análisis

Options	
Max Modes to Find	100
Limit Search to Range	Yes
Range Minimum	0, Hz
Range Maximum	10000 Hz

Para este caso se

analiza como una vibración libre, por lo que no se aplican ningún tipo de restricciones o soportes.

Los resultados que nos proporciona ANSYS se ven en los siguientes gráficos (Fig. 4.42 y Tabla 4.14)

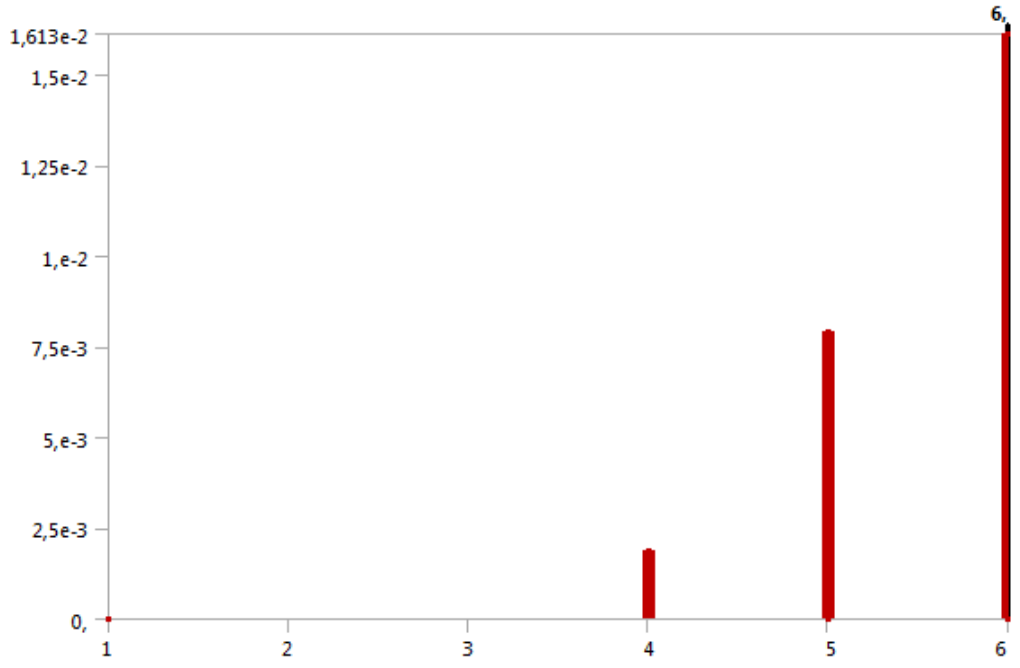


Fig. 4.42 Grafica de modos vs

frecuencia

Tabla 4.14 Resultados de las frecuencias

Mode	Frequency [Hz]
1,	0,
2,	
3,	
4,	1,8911e-003
5,	7,8937e-003
6,	1,613e-002

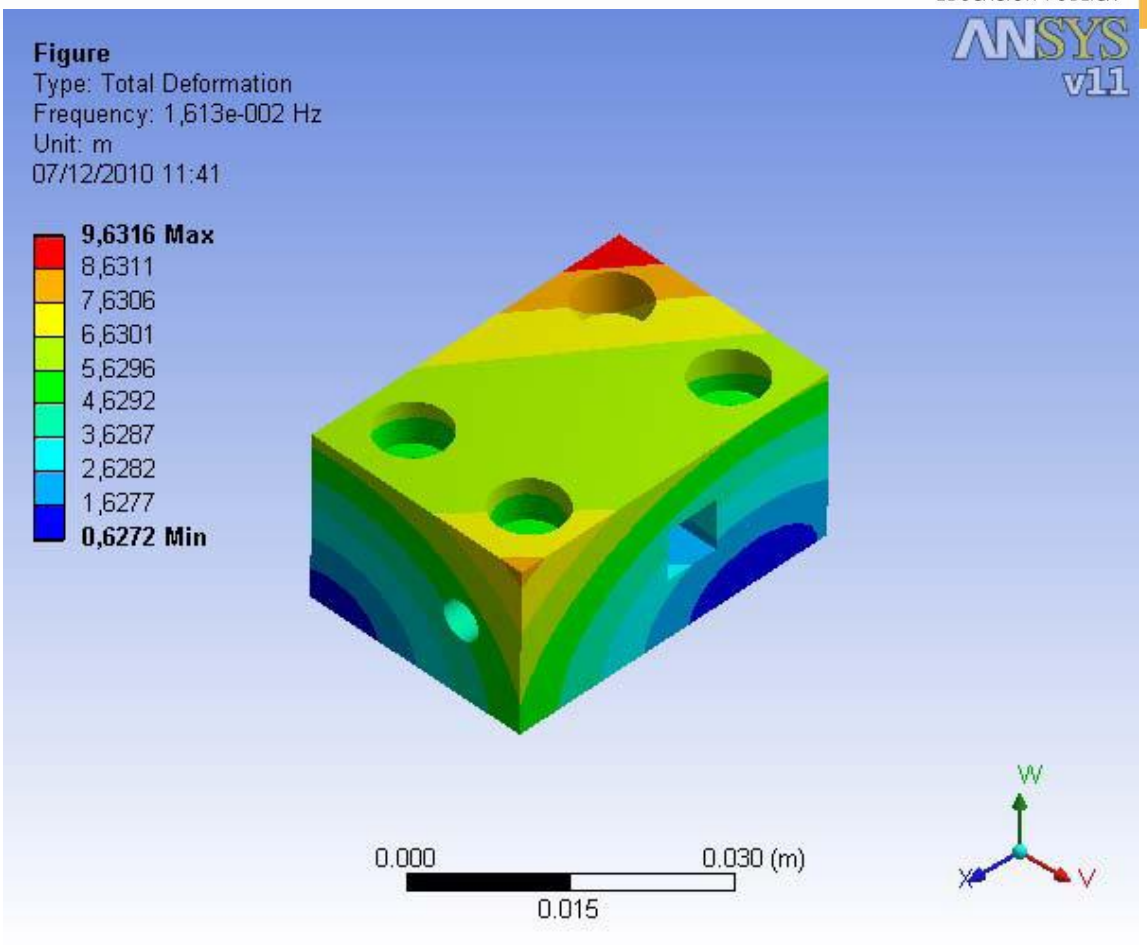


Fig. 4.43 Modo de vibración próxima a cero

En la Tabla 4.14 se observa que las frecuencias naturales encontradas para el intervalo en que será usada la pieza son insignificantes y ninguna coincide con las caracterizadas (ver Tabla 4.11) por lo que la pieza no provocará errores en la calibración por resonancia.

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

CAPITULO 5

PRUEBAS A LOS PROTOTIPOS

Las pruebas de los prototipos fabricados consisten en obtener las sensibilidades del acelerómetro triaxial patrón bajo calibración que son sometidos a una excitación de tipo senoidal de frecuencia y amplitud conocidas.

5.1 MONTAJE DEL ACELERÓMTRO

Es necesario acoplar el acelerómetro con el prototipo aplicando aceite ligero que lubrique las superficies o paredes de contacto y usando un torque de acuerdo a lo que especificado por el fabricante, para este caso de 2 Nm (ver Tabla 5.1), después montar el arreglo sobre los excitadores de vibración (Ver Fig. 5.1 y Fig. 5.2).

Fig. 5.1 Dispositivo acoplado al acelerómetro y a la placa de montaje

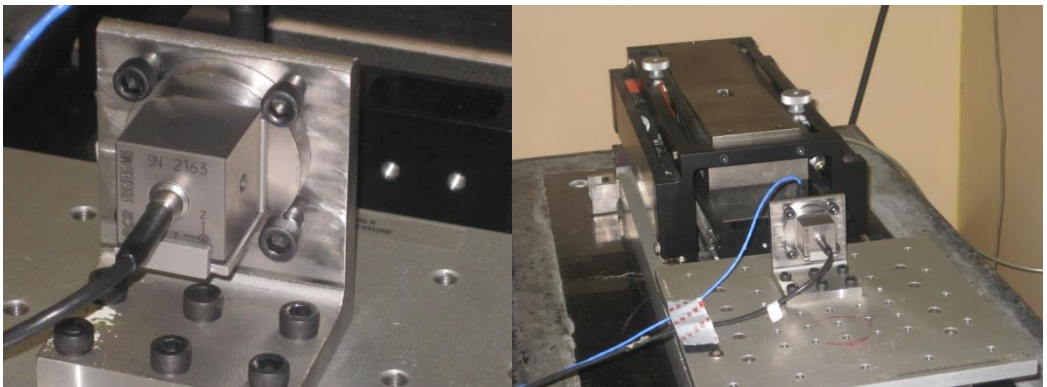


Fig. 5.2 Montaje en el Excitador de vibraciones

Tabla 5.1 Torque requerido recomendado [17]

Designación	Torque (N·m)
5-40	0,5
M3 X 0,50	0,5
10-32	2,0
M5 X 0,80	2,0
$\frac{1}{4}$-28	4,0
M6x0,75 M6x1,00 M8x1,25	4,0

5.2 CALCULOS PREVIOS Y EQUIPO UTILIZADO

Al inicio de la calibración es necesario calcular la lectura esperada en el multímetro, esto se realiza mediante la ecuación (5.1):

$$E = \frac{(S_{ac1})(S_{am1})(a)}{(\sqrt{2})} \tag{5.1}$$

Donde la tensión esperada será en lecturas de tensión RMS

Y para el cálculo de la sensibilidad se usa la siguiente ecuación:

$$S_{ac2} = \frac{(E_2)(S_{ac1})(S_{amp1})}{(E_1)(S_{amp2})}$$

Donde:

E_1: Tensión medida por el multímetro
S_{ac1}: Nivel de sensibilidad del acelerómetro patrón
S_{amp1}: Nivel de sensibilidad del amplificador del acelerómetro patrón
a: Amplitud de aceleración pico
S_{ac2} Nivel de sensibilidad del acelerómetro bajo calibración
S_{amp2} Nivel de sensibilidad del acondicionador del acelerómetro en calibración
E_2 Tensión eléctrica del acelerómetro bajo calibración

Los equipos de la Tabla 5.2 se configuran según el Procedimiento interno “CALIBRACIÓN DE TRANSDUCTORES DE VIBRACIÓN POR EL MÉTODO DE COMPARACIÓN” Nº. 510-AC-P.008

Tabla 5.2 Equipos usados para las mediciones

Generador de señales B&K 1049
Amplificador acondicionador del acelerómetro patrón
Amplificador acondicionador del acelerómetro bajo calibración
Multímetro digital HP 3458A
Amplificador de potencia APS 124

5.2 RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN DE LA SENSIBILIDAD

Los datos obtenidos son procesados por medio del programa vibración.vi y pasados a una hoja de cálculo para su análisis. Dentro del Laboratorio de Patrones de Transferencia se lleva un registro interno para cada calibración o medición de transductores. La Tabla 5.3 muestra los datos que se incluyen en el registro interno.

Tabla 5.3 Datos para el registro de las mediciones

VALIDACIÓN DEL DIPOSITIVO DE MONTAJE PARA ACELERÓMETROS TRIAXIALES				
Lunes, 13 de Diciembre de 2010 03:31 p.m.				
LABORATORIO DE PATRONES DE TRANSFERENCIA				
Marca:	***PCB***	***Modelo:***	***No.***	***2163***

Las mediciones que se realizan siguiendo el procedimiento interno primeramente con la placa posicionada en 0º y se repiten girada a 180º. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.4 y se comparan con mediciones anteriores donde se usó adhesivo para el montaje del acelerómetro triaxial. En la Fig. 5.4 se aprecia la gráfica de la curva de sensibilidad usando el dispositivo y la diferencia que existe con la curva de la sensibilidad obtenida usando adhesivo, dando como resultado una comprobación que mediante el montaje con el prototipo las sensibilidades se comportan de manera más lineal que las sensibilidades usando montaje con adhesivo .

Tabla 5.4 Resultados de la sensibilidad obtenida con el prototipo

Frecuencia	Placa			Pegado	Diferencia	
	Sensibilidad			Sensibilidad		
	0º	180º	Promedio		valor	%
1	99,295	99,309	99,302	99,195	0,107	0,108
2	99,266	99,331	99,299	99,137	0,162	0,163
3	99,347	99,349	99,348	99,104	0,244	0,246

4	99,291	99,309	99,300	99,173	0,127	0,128
5	99,277	99,297	99,287	99,158	0,129	0,130
8	99,294	99,308	99,301	99,162	0,140	0,141
10	99,319	99,319	99,319	99,188	0,131	0,132
16	99,267	99,270	99,269	99,129	0,139	0,141
25	99,392	99,373	99,383	99,225	0,158	0,159
31,5	99,511	99,491	99,501	99,320	0,181	0,182
40	99,724	99,689	99,707	99,494	0,213	0,214
50	99,952	99,907	99,930	99,668	0,261	0,262
63	100,308	100,322	100,315	99,971	0,345	0,345
80	101,011	100,986	100,998	100,490	0,508	0,506
100	102,025	101,715	101,870	101,189	0,682	0,674
125	103,722	103,055	103,388	101,963	1,426	1,398
160	106,123	106,311	106,217	105,780	0,436	0,413

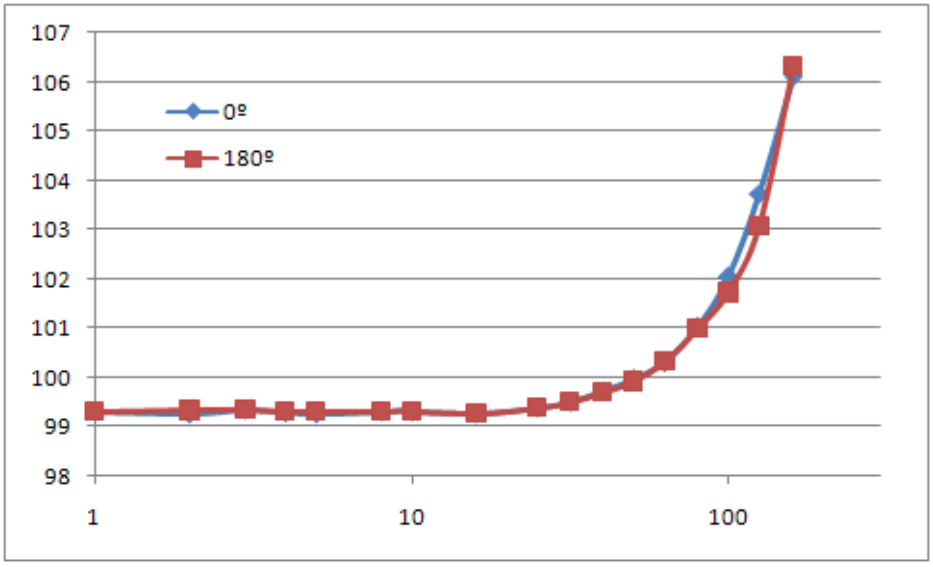


Fig. 5.3 comparación de la sensibilidad del acelerómetro a 0º y 180º

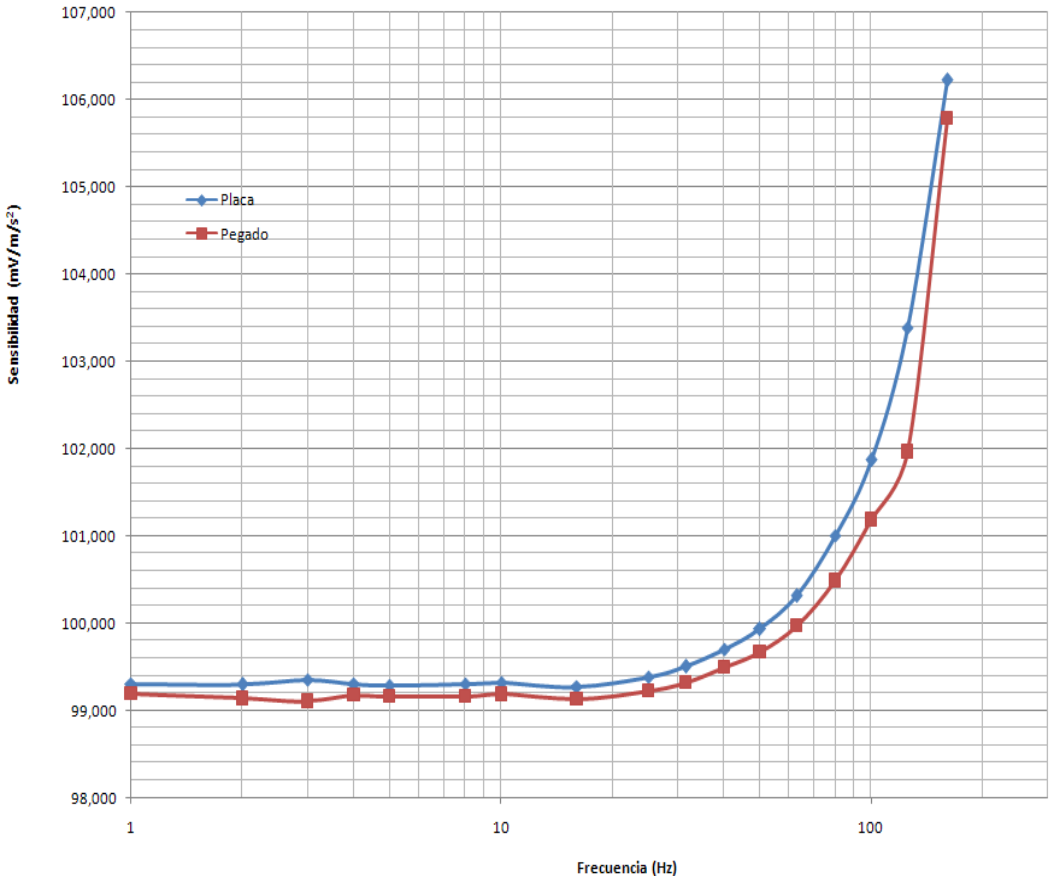


Fig. 5.4 comparación de la sensibilidad usando el dispositivo y usando adhesivo

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

CONCLUSIONES

- Se sabe que de los distintas técnicas de montaje de acelerómetros la que es por medio de opresores o tornillos es la que produce menores errores en las mediciones, por lo cual con el diseño del dispositivo se busca un buen montaje y evitar posibles resonancias. El montaje con opresor era complicado por la forma geométrica del acelerómetro, a pesar de ello se logró este tipo de montaje.

- Las frecuencias naturales del dispositivo diseñado están por encima del intervalo de trabajo del acelerómetro asegurándose de tal forma que la pieza no entra en resonancia antes que el acelerómetro, lo cual afectaría las mediciones en la calibración.

- Existe menor variación en la linealidad de la sensibilidad obtenida con el montaje del dispositivo que al montar el acelerómetro con adhesivo. De manera inherente queda demostrado que los montajes con opresor producen menores errores en las mediciones y obtención de la sensibilidad que el montaje con adhesivo.

- Las pruebas del prototipo fueron satisfactorias ya que los resultados obtenidos corroboraron que el análisis que se hizo de las simulaciones fue el correcto, y por ende que el dispositivo seleccionado fue el óptimo.

- En el mercado existen diferentes tipos de acelerómetros, sin embargo el dispositivo que se diseñó, fabricó y probó es para un único tipo de acelerómetro. Pero el diseño puede adaptarse aquellos que se parecen en forma y que varían en dimensiones, pudiendo mandar a fabricar sin mayor problema ni complicación dispositivos de las medidas que se requieran según los acelerómetros que se van a usar.

REFERENCIAS

[1] NMX-Z-055-IMNC-2007 Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología)

[2] VIM 6.1, NMX Z-055 IMNC 1996]

[3] BIPM/IEC/ISO/OIML, international vocabulary of basic and general terms in metrology, 1984)

[4] IUPAC ‘Orange’ Book

[5] Seto, William. Vibraciones mecánicas

[6] Saavedra P, Análisis de vibraciones, Universidad de Concepción

[7] NMX-Z-055:1996 IMNC, p. 25

[8] ISO 16063-1:1998 “Methods for the calibration of vibration and shock transducers. Part 1: Basic concepts”.

[9] Engineering vibration, Daniel J. Inman, 1996 by prentice-Hall

[10] Tai Hun Kwon, ”Introduction to Finite Element Method”, Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology, 2001

[11] M. SALAS. “Modal Analysis of Ship Structures Using the Finite Element Method”. Journal of the Pan-American Institute of Naval Engineers. Mayo de 2000.

[12] Saeed Moaveni. “Finite Elements Analysis: Theory and application with ANSYS”.Upper Saddleriver Prentice-Hall 1999.

[13] http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0628105-100401

[14] “Diseño en ingeniería mecánica”. Joseph Edward Shigley, Larry D.

[15] John Christopher Jones, “Diseñar el Diseño”. Colección GG Diseño.

[16] Métodos de diseño”. nigel cross. limusa noriega editores, 1999.

[17] General operating guide for use with piezoelectric accelerometers, PCB Piezotronics, Inc.

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

ANEXOS

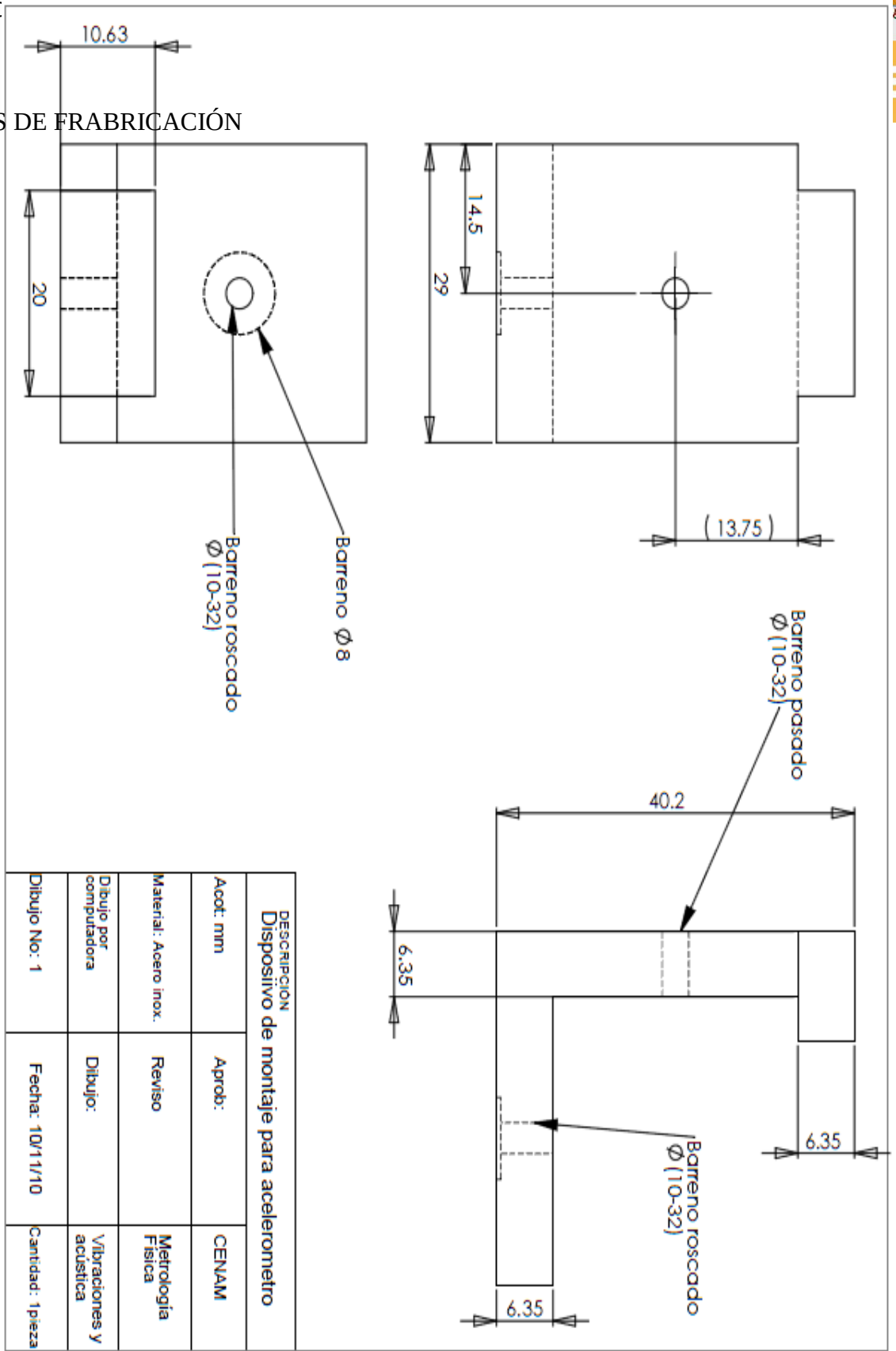
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES FERROROS Y NO FERROSOS

Material	Densidad kg/m^3	Módulo de elasticidad [Gpa]	Resistencia a fluencia [Mpa]	Resistencia a la rotura [Mpa]	Ductilidad % alarg. en 2 pulgadas	coeficiente de Poisson	Conduct. Térmica [W/m-°C]	Coef. de dilatación (°C)$^{-1}$ 10^{-6}
Fundición	7870	207	130	260	45	029	80	11.8
fundición gris	7150	v						
fundición nodular	7120							
fundición maleable	7200							
Acero AISI 1020	7860							
Acero AISI 1040	7850							
Acero AISI 1080	7840							
Acero AISI 446	7500							
Acero AISI 316	800							
Acero AISI 410	7800							

Material	Densidad kg/m^3	Módulo de elasticidad [Gpa]	Resistencia a fluencia [Mpa]	Resistencia a la rotura [Mpa]	Ductilidad % alarg. en 2 pulgadas	coeficiente de Poisson	Conduct. Térmica [W/m-°C]	Coef. de dilatación (°C)$^{-1}$ 10^{-6}
Aluminio puro	2710	69	17	55	25	0.33	231	23.6
Aluminio (aleación)	2800	72	97	186	18	0.33	192	22.5
Cobre puro	8940	110	69	220	45	0.35	398	16.5
Latón (70Cu-30Zn)	8530	110	75	303	68	0.35	120	20.0
Bronce (90Cu-8Sn)	8800	110	152	380	70	0.35	62	18.2
Magnesio puro	1740	45	41	165	14	0.29	122	27.0
Molibdeno puro	10220	324	565	655	35	--	142	4.9
Níquel	8900	207	138	483	40	0.31	80	13.3
Plata	10490	76	55	125	48	0.37	418	19.0
Titanio	4510	107	240	330	30	0.34	17	9.0

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO

PLANOS DE FRABRICACIÓN

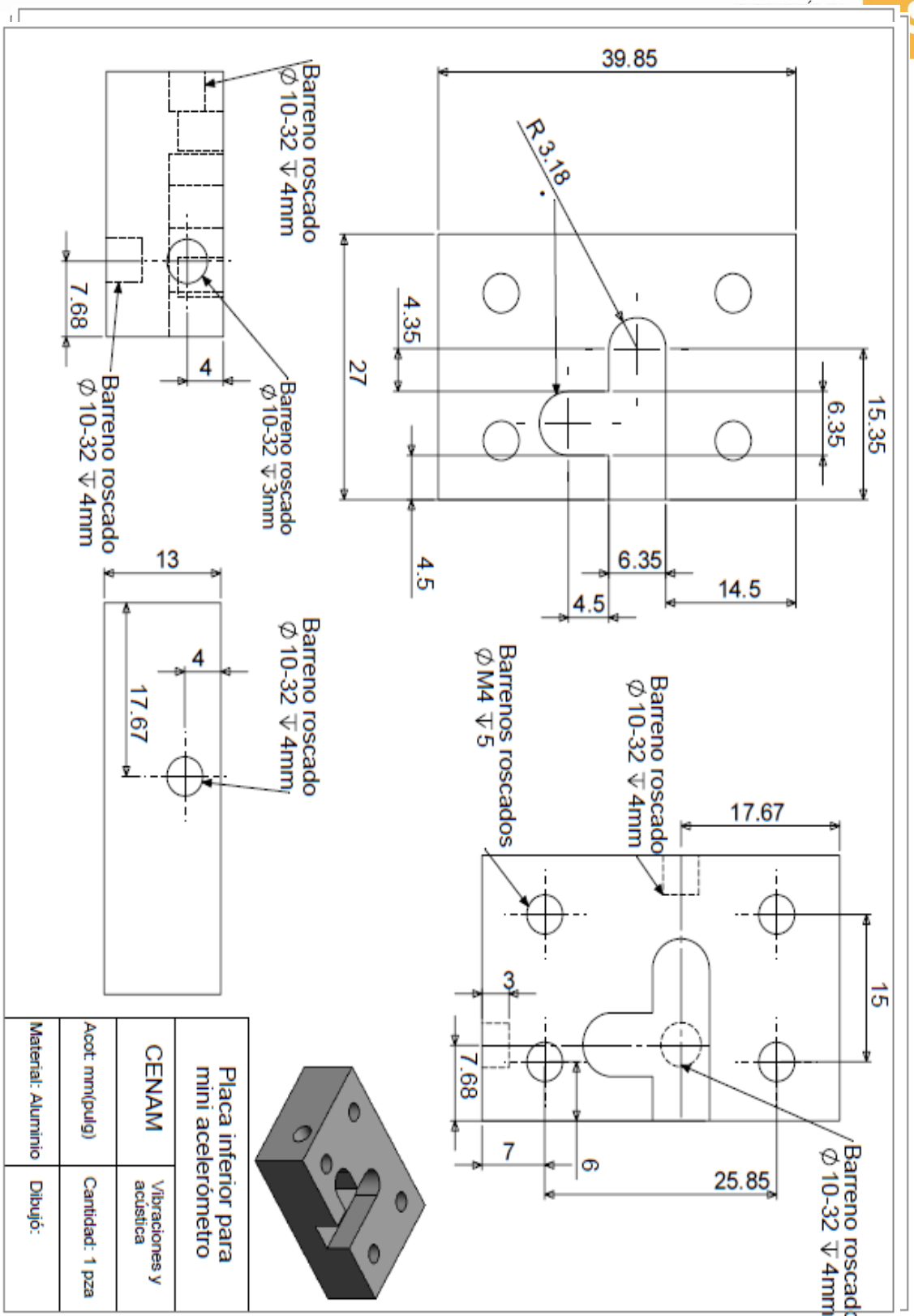


SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

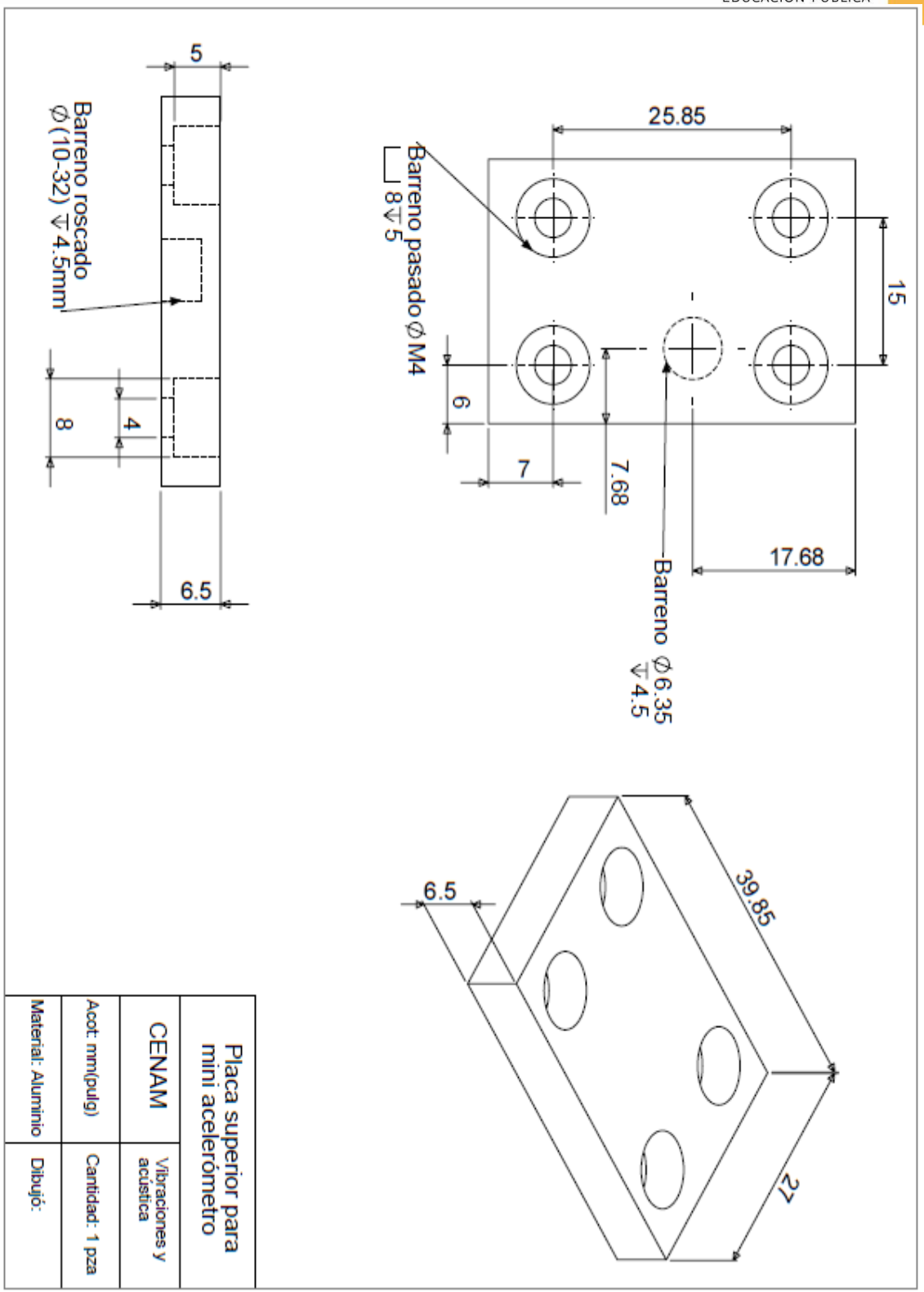
SEP

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIO
TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Placa superior para mini acelerómetro	
CENAM	Vibraciones y acústica
Acot: mm(pulg)	Cantidad: 1 pza
Material: Aluminio	Dibujó: