



**Diseño y construcción de un prototipo para el análisis del comportamiento dinámico de estructuras
civiles a escala**

Bolaños Núñez, Eduardo Xavier

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

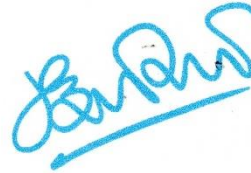
Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Msc. Abatta Jácome, Lenin Rómulo

20 de agosto de 2021

Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS BOLAÑOS EDUARDO URKUND.pdf (D111521666)
Submitted: 8/20/2021 9:56:00 PM
Submitted By: lrabatta@espe.edu.ec
Significance: 3 %



Firmado
digitalmente por
LENIN ROMULO
ABATTA JACOME
Fecha: 2021.08.20
15:05:03 -05'00'

Sources included in the report:

TFG José Pañeda Fonseca10.30.pdf (D76141768)
Trabajo de grado Italo Cunto UCSG.doc (D9701315)
<https://gtindustrias.com/productos/esponja-de-neopreno-y-epdm-de-celula-cerrada/>
<http://www.mootio-components.com/blog/es/regulacion-velocidad-motor-corriente-continua/>
<https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>
<https://www.roydisa.es/archivos/5419>
<http://www.superrobotica.com/conmotor.htm>
http://repositorio.ual.es:8080/bitstream/handle/10835/6992/TFG_ARTERO%20REAL%2C%20ANGEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instances where selected sources appear:

11



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño y construcción de un prototipo para el análisis del comportamiento dinámico de estructuras civiles a escala**” fue realizado por el señor **Bolaños Núñez, Eduardo Xavier** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de agosto de 2021

Firma:

Firmado digitalmente
por LENIN ROMULO
ABATTA JACOME
Fecha: 2021.08.26
09:52:08 -05'00'

Ing. MSc. Abatta Jácome Lenin Rómulo

C. C 1723180707



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Bolaños Núñez, Eduardo Xavier**, con cédula de ciudadanía n°1725031726 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un prototipo para el análisis del comportamiento dinámico de estructuras civiles a escala”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 20 de agosto de 2021

Firma

Bolaños Núñez, Eduardo Xavier

C.C.:1725031726



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Bolaños Núñez, Eduardo Xavier**, con cédula de ciudadanía n°1725031726, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un prototipo para el análisis del comportamiento dinámico de estructuras civiles a escala”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 20 de agosto de 2021

Firma

Bolaños Núñez, Eduardo Xavier

C.C.:1725031726

Dedicatoria

Con todo mi amor a mi esposa MSc. Lorena Balseca, quien me ha apoyado incondicionalmente en este arduo camino y me ha conducido de su mano a la obtención de esta importante meta para mí, brindándome su incondicional amor y comprensión.

Este logro es de los dos como pareja.

A mis padres que inculcaron en mí sus valores y me guiaron con amor y respeto, siempre deseando que sus cuatro hijos sean profesionales como una meta en sus vidas.

A Dios que ha guiado mis pasos según su voluntad y me ha conducido durante toda mi vida.

Al MSc. Lenin Abatta y MSc. David Loza, quienes con paciencia y confianza me apoyaron para terminar mi vida universitaria.

Eduardo Bolaños

Agradecimiento

Agradezco a todas las personas que han influido durante este proceso de aprendizaje, mi esposa, amigos, compañeros, maestros, familia, Dios que ha contribuido en su momento para mi desarrollo personal y profesional.

Agradezco a mis suegros que han sido como unos segundos padres para mí, por todo su cariño preocupación y apoyo.

Agradezco a la empresa Ecuainsetec Cia Ltda, quienes fueron partícipes de este proyecto a través de su conocimiento y apoyo económico, una empresa de la que guardo un gran cariño y deseo lo mejor para su futuro.

Eduardo Bolaños

Índice de contenidos

Certificado del director	3
Autoría de responsabilidad	4
Autorización	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de tablas	13
Índice de figuras.....	14
Resumen	18
Abstract.....	19
Capítulo 1	20
Generalidades	20
Antecedentes	20
Definición del proyecto.....	23
Justificación e importancia	24
Área de influencia	25
Objetivos.....	26
Objetivo general.....	26

	9
Objetivos específicos	26
Alcance del proyecto.....	26
Capítulo 2	28
Estructuras civiles	28
Connotación de las estructuras en la humanidad	28
Elementos de una estructura.....	28
Introducción a las estructuras civiles	29
Carga Sísmica	33
Análisis de vibraciones.....	34
Sistemas vibratorios.....	34
Tipos de movimiento	36
Sistemas subamortiguados	37
Amortiguamiento.....	38
Tipos de Amortiguamiento	39
Sistema de vibración	40
Mesas Vibratorias	42
Tipos de mesas Vibratorias	43
Acelerómetros	44
Control de velocidad	45
Motores reductores	47

	10
Capítulo 3	49
Diseño mecánico	49
Criterios de selección	50
Análisis mecánico de las estructuras	52
Construcción de estructura civil	70
Selección de materiales	72
Diseño de apoyos deslizantes	72
Selección de rodamientos	72
Selección de los amortiguadores	77
Selección de motor	79
Selección del motor reductor	80
Cálculo de la potencia	82
Selección de mecanismo para transmisión de movimiento	83
Dimensionamiento de mecanismo de correa dentada	85
Distancia	85
Cálculo de correas y poleas dentadas	87
Selección de Controlador lógico programable	94
Selección de driver para el motor	98
Diseño electrónico	99
Conversión de señales	100

	11
Capítulo 4	105
Construcción de la estructura	105
Implementación de circuitos eléctricos	113
Implementación de algoritmos de programación	116
Programa	117
Configuraciones de control de HMI	117
Implementación de sistema de adquisición de datos para señales de vibración.....	120
Programa Arduino.....	121
Capítulo 5	122
Análisis de resultados	122
Resultados obtenidos de pruebas con acelerómetro	123
Datos para generación de sismo.....	124
Análisis de datos entregados por acelerómetro.....	126
Prueba N1	128
Prueba N2	129
Prueba N 3.....	130
Capítulo 6	133
Conclusiones y recomendaciones.....	133
Conclusiones	133
Recomendaciones	133

	12
Trabajos Futuros	134
Capítulo 7	135
Análisis económico	135
Bibliografía	137

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Ejemplos de trabajos existentes de equipos para análisis de estructuras.</i>	21
Tabla 2 <i>Datos técnicos de mesas sísmicas ordenadas de menor a mayor tamaño</i>	44
Tabla 3 <i>Matriz de selección para mesa base según materiales</i>	51
Tabla 4 <i>Lista de componentes de la estructura</i>	53
Tabla 5 <i>Esfuerzos máximo y mínimo producidos en la viga</i>	56
Tabla 6 <i>Esfuerzos máximo y mínimo producidos en la unión</i>	59
Tabla 7 <i>Esfuerzos máximo y mínimo producidos en las columnas</i>	62
Tabla 8 <i>Factores de carga que soportan las columnas</i>	64
Tabla 9 <i>Esfuerzos máximo y mínimo producidos en las uniones</i>	67
Tabla 10 <i>Frecuencias que soporta la mesa</i>	70
Tabla 11 <i>Tabla de pesos de materiales utilizados</i>	73
Tabla 12 <i>Características caucho neopreno</i>	78
Tabla 13 <i>Matriz de selección para el motor</i>	81
Tabla 14 <i>Características de los diferentes mecanismos</i>	84
Tabla 15 <i>Matriz de selección para el controlador</i>	94
Tabla 16 <i>Características del plc afp0r</i>	97
Tabla 17 <i>Matriz de selección para el driver</i>	98
Tabla 18 <i>Tabla lógica para el giro del motor</i>	99
Tabla 19 <i>Parámetros de posición y velocidad para movimiento de la mesa</i>	124
Tabla 20 <i>Gráficos obtenidos de las pruebas</i>	131
Tabla 21 <i>Tabla de costo</i>	135

Índice de figuras

Figura 1 Estructuras metálicas de construcción simple de un solo piso.....	30
Figura 2 Estructura de marco rígido de un solo cuerpo.	31
Figura 3 Estructura de marco compuesta.	31
Figura 4 Estructuras con arriostramiento concéntrico y excéntrico.....	33
Figura 5 Sistema sin amortiguamiento en vibración libre.	35
Figura 6 Movimientos amortiguado, sobreamortiguado y críticamente amortiguado.....	36
Figura 7 Respuesta de amortiguamiento según coeficientes 2% 5% 10% y 20%.....	37
Figura 8 Razón de decremento de movimiento en sistema vibratorio.....	42
Figura 9 Acelerómetro adxl335.....	45
Figura 10 Funcionamiento de un pwm.....	47
Figura 11 Motor reductor.....	48
Figura 12 Componentes de la estructura en vista frontal de la estructura.....	52
Figura 13 Componentes de la estructura en vista inferior de la estructura.....	53
Figura 14 Fuerzas existentes en las vigas.....	54
Figura 15 Mallado adaptativo columnas.....	55
Figura 16 Análisis estático vigas.....	55
Figura 17 Análisis de factor de seguridad.....	56
Figura 18 Fuerzas existentes en la unión I.....	57
Figura 19 Mallado adaptativo columnas.....	58
Figura 20 Análisis estático unión con la mesa.....	58
Figura 21 Análisis de factor de seguridad.....	59

	15
Figura 22 Fuerzas existentes en las columnas.....	60
Figura 23 Mallado adaptativo columnas	61
Figura 24 Análisis estático columnas	61
Figura 25 Análisis de factor de seguridad	62
Figura 26 Análisis de pandeo en columnas	63
Figura 27 Resultante de la amplitud para modelamiento	63
Figura 28 Fuerzas existentes en las uniones	65
Figura 29 Mallado adaptativo uniones	66
Figura 30 Análisis estático uniones	66
Figura 31 Análisis de factor de seguridad	67
Figura 32 Mesa a ser analizada con frecuencia	68
Figura 33 Mallado de la mesa.....	69
Figura 34 Hertz que soporta la mesa	69
Figura 35 Estructura civil.....	71
Figura 36 Diagrama de factor de dureza f_H	75
Figura 37 Diagrama para el factor de duración de vida f_L	76
Figura 38 Neopreno.....	79
Figura 39 diámetro del rodamiento	86
Figura 40 longitud de la banda	86
Figura 41 Factores de servicio para selección de la potencia de diseño	88
Figura 42 Factores de servicio para selección de la potencia de diseño	89
Figura 43 Selección de la sección de la correa	90
Figura 44 Selección de la sección de la correa	91

Figura 45 Selección de número de dientes	92
Figura 46 Selección de la polea dentada en función de los dientes y paso	93
Figura 47 Conversión de señal pnp a npn	101
Figura 48 Diseño integral de circuito eléctrico de acoplamiento	103
Figura 49 Diseño de pcb en software	103
Figura 50 Diseño 3d de pcb en software	104
Figura 51 Simulación de circuito de acoplamiento de señal con salida plc en bajo	104
Figura 52 Simulación de circuito de acoplamiento de señal con salida plc en alto	105
Figura 53 Montaje de cuatro rodamientos en la placa de aluminio perfilado.....	107
Figura 54 Alineación y posterior montaje de soportes fijos de placa base con rodamientos de placa perfilada	108
Figura 55 Acople ensamblado a partir de placa de aluminio para transmisión de movimiento .	109
Figura 56 Montaje de la mesa en placa base.....	110
Figura 57 Chumaceras para soporte de eje extremo de correa dentada.....	111
Figura 58 Montaje de motor en placa base con engrane para correa dentada	111
Figura 59 Montaje de soporte para barras	112
Figura 60 Implementación mecánica fue desarrollada en el taller de la empresa ecuainetec ..	113
Figura 61 Pcb de acoplamiento entre plc y drive puente h	114
Figura 62 Conexiones principales de plc y alimentación a bornas cage clamp.....	114
Figura 63 Conexión de pcb de acoplamiento con plc y drive puente h	115
Figura 64 Circuitos eléctricos y de control conexiónados en su totalidad.....	115
Figura 65 Pantalla principal hmi	117
Figura 66 Pantalla principal hmi	121

Figura 67 <i>Prototipo completo</i>	123
Figura 68 <i>Detalle del desplazamiento de la mesa</i>	125
Figura 69 <i>Detalle de la velocidad de la mesa</i>	125
Figura 70 <i>Estructura sin desacoplamiento de la superestructura</i>	126
Figura 71 <i>Estructura con barras de neopreno</i>	127
Figura 72 <i>Estructura con amortiguadores de neopreno en cimentación</i>	127
Figura 73 <i>Prueba 1</i>	128
Figura 74 <i>Prueba 2</i>	129
Figura 75 <i>Prueba 3</i>	130

Resumen

El presente trabajo pretende realizar un prototipo para generación de movimientos sísmicos, para conocer el comportamiento dinámico de estructuras civiles a escala. El trabajo se desarrolla con la construcción de la estructura generadora de sismos, determinando componentes mecánicos, electrónicos y de control que permitan realizar un conjunto funcional. Para el desarrollo del trabajo se utiliza la metodología en V, que es adecuada para el tipo de trabajo que se realiza. La estructura civil a escala, es generada por un conjunto de elementos metálicos con uniones magnéticas, que dan flexibilidad para una construcción de estructuras realistas. Se utiliza un PLC para cumplir con todas las funciones de control de manera que se utilizan bloques y algoritmos propios de un control de movimiento adecuado para el tipo de mecanismo que se desea controlar. Finalmente, se puede apreciar los resultados de la construcción del prototipo con las pruebas de funcionamiento y análisis de vibración con el uso de un acelerómetro incorporado a la estructura civil, dando la facilidad de estudiar la dinámica de la estructura ante una influencia vibratoria con utilización de componentes neopreno para amortiguar dichos efectos. Para concluir este trabajo se observa en los resultados de las pruebas, una reducción de alrededor del 30% de aceleración suministrada a los elementos de la estructura civil, estos resultados dan un argumento favorable para el desacoplamiento de súper estructuras.

Palabras clave

- **MESA VIBRATORIA**
- **SISMOS**
- **ESTRUCTURA CIVIL**
- **AMORTIGUAMIENTO**
- **PROTOTIPO**

Abstract

The present work aims to make a prototype for the generation of seismic movements, to analyze the dynamic behavior of civil structures at scale. The work is developed with the construction of the earthquake-generating structure, determining mechanical, electronic and control components that will allow a functional set to be made. For the development of the work, the V methodology is used, which is appropriate for the type of work that is carried out. The scale civil structure is generated by a set of metallic elements with magnetic joints, which give flexibility for the construction of realistic structures. A PLC is used to fulfill all the control functions in such a way that blocks and algorithms of a suitable motion control are used for the type of mechanism to be controlled. Finally, the results of the construction of the prototype can be appreciated with the performance tests and vibration analysis with the use of an accelerometer incorporated into the civil structure, giving the facility to study the dynamics of the structure before a vibratory influence with the use of neoprene components to cushion these effects. To conclude this work, it is observed in the results of the tests, a reduction of around 30% of acceleration supplied to the elements of the civil structure, these results give a favorable argument for the decoupling of super structures.

Key Words

- **SHAKING TABLE**
- **EARTHQUAKES**
- **CIVIL STRUCTURE**
- **DAMPING**
- **PROTOTYPE**

Capítulo 1

Generalidades

El capítulo a continuación comprende los antecedentes, alcance, objetivos y justificación del presente proyecto de investigación. Se observa el enfoque que tiene el proyecto referente al estudio del comportamiento dinámico de las estructuras civiles ante sismos oscilatorios, se analiza la respuesta en vibraciones de una estructura bajo diversas condiciones de amortiguación. Se abordan temas referentes al diseño y construcción del prototipo, en cuanto a sus componentes eléctricos, de control y el software que se han utilizado en el proyecto. De igual manera se detalla una corta descripción del contenido a desarrollarse en los siguientes capítulos.

Antecedentes

En el pasado, el primer objetivo que se trazaba en el estudio estructural, era el análisis estático, con esto se trataba de garantizar que las fuerzas estén correctamente distribuidas y equilibradas, además se seleccionaba los materiales necesarios para alcanzar una adecuada resistencia de los materiales. Actualmente la tendencia en la construcción se enfoca en la reducción de costos, mediante la disminución de materiales. Esto ha generado que se reduzca la capacidad de amortiguamiento de las estructuras ante diferentes fuerzas. En función a lo mencionado y a la seguridad que una estructura civil debe ofrecer, se ha dado paso al estudio de las cargas dinámicas a las que pueden estar expuestas todas las estructuras, que en un ejemplo práctico se puede distinguir un sismo. (Olloquiegui, 2018)

Existen fenómenos como los vientos o los sismos que pueden generar grandes trastornos en la resistencia de los materiales, estos fenómenos son ligados directamente al tiempo y no se los puede considerar estáticos o estudiarlos de la misma manera. Este tipo de fenómenos se los determina en el dominio de la frecuencia, al ser un estudio de las vibraciones generadas y que efecto causan, en las estructuras y componentes. (E-STRUC, 2017)

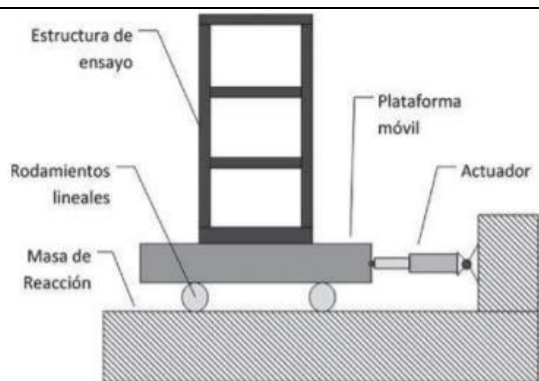
Debido a las condiciones geográficas de nuestro país, el Ecuador, se ha generado la necesidad en los últimos años de utilizar estructuras sismo-resistentes que tengan un adecuado comportamiento ante eventualidades sísmicas latentes. Para la generación de este tipo de estructuras es necesario realizar estudios de la influencia de vibraciones puntuales o casos críticos de sismos reales; de modo que se pueda comprender el efecto causado del fenómeno previo a dar una solución comprobada. (Ordoñez, 2016)

El presente trabajo busca diseñar y construir un sistema para determinación del comportamiento dinámico de estructuras civiles a escala, de modo que se evidencien los efectos causados por determinadas vibraciones sísmicas en una estructura de pruebas y sus componentes. En la Tabla1 se encontrarán algunos trabajos similares a lo que se desea realizar.

Tabla 1

Ejemplos de trabajos existentes de equipos para análisis de estructuras.

Trabajos anteriores	Equipo y Características
Evaluación del diseño de una pequeña mesa vibratoria para ensayos en ingeniería sismo-resistente	Control: Lazo abierto Grados de libertad: 1 grado de libertad

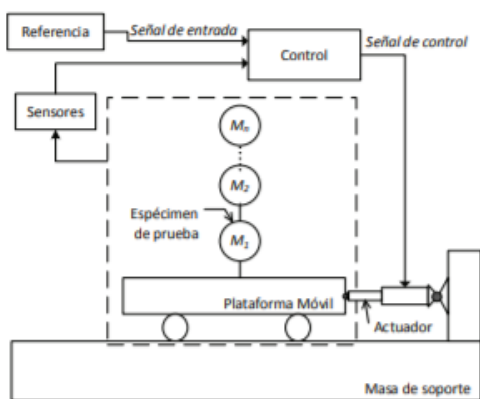


Desplazamiento máximo:100mm

(Porras, 2013)

Sistemas de control para mesas vibratorias: una revisión crítica

Control: Lazo cerrado



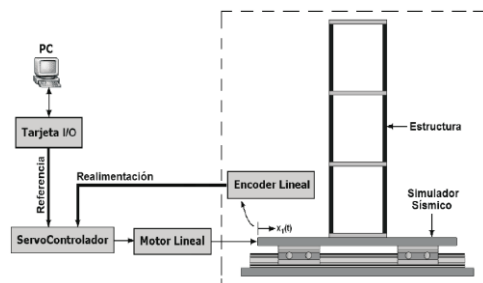
Grados de libertad: 1 grado de libertad

Desplazamiento máximo:150mm

(Bernal, 2015)

Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable para modelos estructurales a pequeña escala.

Control: Lazo abierto



Grados de libertad: 1 grado de libertad

Desplazamiento máximo:150mm

(Coral, 2010)

Nota La tabla muestra los diferentes tipos de equipos que existen para analizar estructuras

Mediante los modelos observados se determina que el movimiento sísmico oscilatorio es el más frecuente, por lo que será tomado como el punto de análisis en este proyecto. El movimiento oscilatorio genera daños estructurales en función al tiempo de su ejecución, y podrá dar lugar al estudio de cargas axiales y flexión en vigas y columnas. (Gonzalez, 2015)

Definición del proyecto

El prototipo a desarrollar comprende un mecanismo de transformación de movimiento, que se encarga de que la mesa que soporta la estructura civil, realice un movimiento oscilatorio vinculado directamente al movimiento rotacional propiciado por un motor de corriente continua. Se busca replicar los movimientos oscilatorios provocados por sismos a una base de pruebas para el respectivo análisis de consecuencias bajo diferentes parámetros de soporte para la estructura.

Algunos de los elementos más importantes dentro de los componentes mecánicos son:

- Mecanismo correa y polea dentada
- Estructura civil
- Apoyos deslizantes

Algunos de los elementos más importantes dentro de los componentes electrónicos son:

- Motor de corriente continua
- Acelerómetro
- Sensor de posición (encoder)

Se desarrolla el control de movimiento mediante un controlador lógico programable que recibe información de una interfaz de usuario que proporciona las coordenadas del desplazamiento a realizar por parte del conjunto motriz.

Se realizan comparativas para definir el desgaste del material de manera real con el prototipo y de forma ideal mediante un software para análisis de esfuerzos en estructuras.

Justificación e importancia

Colaborando con el avance tecnológico que supone la reducción del uso de algunos materiales y mejoramiento de otros para la optimización del uso de recursos, es importante puntualizar que las estructuras metálicas son el presente y futuro tanto en el sector industrial como en el sector de la construcción. (Caicedo, 2010)

De aquí que el análisis estructural es una de las más interesantes ramas de estudio que se maneja en la actualidad, se puede derivar un sin número de análisis como composición del material, reacción de los materiales ante distintos tipos de cargas, elementos disipadores de energía, concentradores de cargas, comportamiento dinámico, etc. (ITEA, 2015)

El proyecto está enfocado como una herramienta de aprendizaje que ayudará al estudio del comportamiento de estructuras ante eventos sísmicos en la formación de profesionales del DECEM.

Existen diferentes estudios que se pueden realizar sobre el comportamiento dinámico de estructuras, entre los cuales se pueden determinar:

- Estudio de comportamiento dinámico de elementos y sistemas estructurales.
- Demostración de resistencia estructural bajo cargas dinámicas.

- Generación y comprobación de modelos de análisis vibratorios.
- Comportamiento de elementos mecánicos ante sismos oscilatorios.

Mientras mayor sea la cantidad de información que se posee sobre un fenómeno es más fácil llegar a determinar una vía para poder neutralizarlo o utilizarlo en un beneficio, precisamente se desea llegar a un estudio de causa efecto, lo más cercano a la realidad posible, que permita comprender el reaccionar de una estructura sometida a un movimiento sísmico y recabar información de la posición, velocidad y aceleración generadas.

Los factores de análisis a tomar en consideración se plantean en posición y frecuencia, variables que son muy determinantes en el campo de la vibración.

Área de influencia

El proyecto de investigación pretende realizar un análisis del comportamiento de estructuras civiles ante sismos oscilatorios, este equipo a escala podrá ser utilizado en vibraciones, mecanismos, selección de materiales, resistencia de materiales, diseño de elementos estructurales; aportando diferentes criterios de mejora en diseños estructurales, selección de materiales y selección de elementos disipadores de energía.

En el área de la construcción las estructuras se manejan en el día a día y se busca la reducción de materiales y mantener las características de resistencia necesarias dentro de los estándares de calidad.

El estudio de los fenómenos que afectan a las estructuras metálicas permiten manejar un adecuado conocimiento de los materiales idóneos para soportar dichas cargas y no presentar fallos que pueden ser perjudiciales tanto a nivel industrial como referente a la vida humana. Las

estructuras metálicas son utilizadas en la industria y la construcción, estas se vuelven elementos críticos en diseño por lo que es necesario un conocimiento adecuado de los efectos producidos por fenómenos dinámicos.

Se busca un mejoramiento en eficiencia de materiales y un análisis de vibraciones más cercano a la realidad.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y Construir un prototipo para analizar el comportamiento dinámico de estructuras civiles a escala.

Objetivos específicos

- Diseñar una mesa vibratoria de un grado de libertad.
- Implementar el sistema de control para generar las aceleraciones y desplazamientos correspondientes en la mesa vibratoria.
- Analizar el comportamiento dinámico de estructuras civiles a escala para obtener resultados de respuesta de la estructura ante sismos.

Alcance del proyecto

En el accionar normal del prototipo, se generan las oscilaciones específicas para un sismo determinado de modo que la estructura civil montada sobre la mesa esté sometida a dicho fenómeno y se pueda analizar puntualmente la vibración causada versus el desplazamiento propiciado.

En un sismo generalmente se tienen dos movimientos un oscilatorio y un trepidatorio, el oscilatorio hace que las estructuras civiles sean sometidas a fatiga en los materiales en un corto periodo de frecuencia.

Por esta razón se implementa un acelerómetro en la zona superior de la estructura civil de modo que se determine las vibraciones causadas y se pueda realizar un análisis ideal y práctico de las consecuencias causadas y posibles fallos estructurales.

Se determina los comportamientos a diferentes circunstancias en el caso de no tener elementos amortiguadores y en otro caso con elementos que puedan amortiguar los movimientos, es decir tengan la capacidad de disipar la energía cinemática del sismo.

Capítulo 2

El capítulo a continuación se enfoca en conceptos que encaminan al estudio a realizarse, se abordan temas referentes a los componentes del prototipo y detalles sobre principios de estructuras civiles, aquí se podrán encontrar algunas terminologías importantes que referencian al estudio a realizarse. Uno de los temas a abordarse es el análisis de vibraciones con el cuál se observa un comportamiento dinámico de estructuras ante frecuencias de vibración variadas, se tomará en cuenta un análisis del control de velocidad y como se integra el amortiguamiento al análisis de vibraciones.

Estructuras civiles

Connotación de las estructuras en la humanidad

Desde la antigüedad se han utilizado las estructuras como una forma de proteger a la humanidad o una forma de conectar o comunicar a las personas, se han utilizado una gran cantidad de materiales siempre con el objetivo de mejorar la resistencia y optimizar la cantidad de material utilizada. La evolución de las estructuras ha ido de la mano con la evolución del hombre, a medida que los conocimientos y estándares de vida crecen, la calidad y modernización de las estructuras tienen un avance proporcional, de manera que se ha permitido la Innovación de mecanismos de desarrollo estructurales que permitan mejorar la seguridad (Cabg, 2016).

Elementos de una estructura

Dentro de una estructura civil existen elementos importantes que ayudan a cumplir sus funciones a cabalidad, los elementos principales que se encontrarán en el común de todas las estructuras civiles son, columnas y vigas.

Las columnas cumplen con la función de soportar las cargas a las que está sometida una estructura, ya sea su propio peso o pesos adicionales como cargas externas. Estas columnas se forman en posición vertical, estarán sujetos a compresión y tensión mecánicamente.

Las vigas en cambio se apoyan por lo general sobre columnas, cumplen la función de unir y realizar una cadena, están enlazadas a las columnas, por lo que estarán sujetas a fuerzas de compresión, tracción y flexión.

Estos elementos son muy importantes en la resistencia a cargas inesperadas como por ejemplo una Carga Sísmica.

Introducción a las estructuras civiles

Desde la épocas muy remotas se han utilizado las estructuras como una forma de proteger a la humanidad o una forma de conectar o comunicar a las personas, se han utilizado una gran cantidad de materiales siempre con el objetivo de mejorar la resistencia y optimizar la cantidad de material utilizada. La evolución de las estructuras ha ido de la mano con la evolución del hombre, a medida que los conocimientos y estándares de vida crecen, la calidad y modernización de las estructuras tienen un avance proporcional, de manera que se ha permitido la Innovación de mecanismos de desarrollo estructurales que permitan mejorar la seguridad (Cabg, 2016).

Estructuras de acero

El acero es un material ampliamente utilizado en el campo de la construcción de estructuras, esto se debe a las numerosas propiedades mecánicas que ofrece, existen factores como la soldabilidad, resistencia a la fatiga o también resistencia a la corrosión que hacen que el acero sea una de las mejores opciones para realizar estructuras (Williams, 2011).

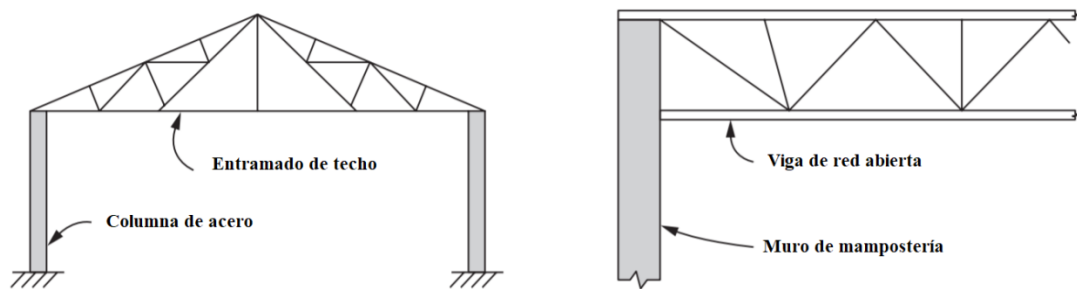
Tipos de estructuras de acero

Las estructuras de acero son en general estructuras de perímetro, se pueden encontrar estructuras simples como en un solo piso o estructuras mucho más complejas de varios pisos de composición. Una de las estructuras más simples que se pueden encontrar es un techo de acero o una viga abierta, sustentadas por columnas de acero según el perfil utilizado.

En la Figura 1 se observan los dos tipos de estructuras simples:

Figura 1

Estructuras metálicas de construcción simple de un solo piso.

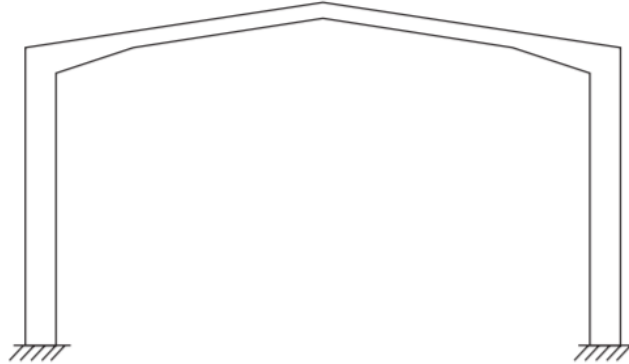


Nota: La Figura representa como están compuestas las estructuras metálicas que son de un solo piso. Tomado de *Steel Structures Desing*, (p.5) por Alan William, 2011, McGrawHill.

Otra de las técnicas alternativas de construcción es una estructura de marco rígido de un solo cuerpo, a continuación se observa en la Figura 2 un ejemplo de la estructura:

Figura 2

Estructura de marco rígido de un solo cuerpo.

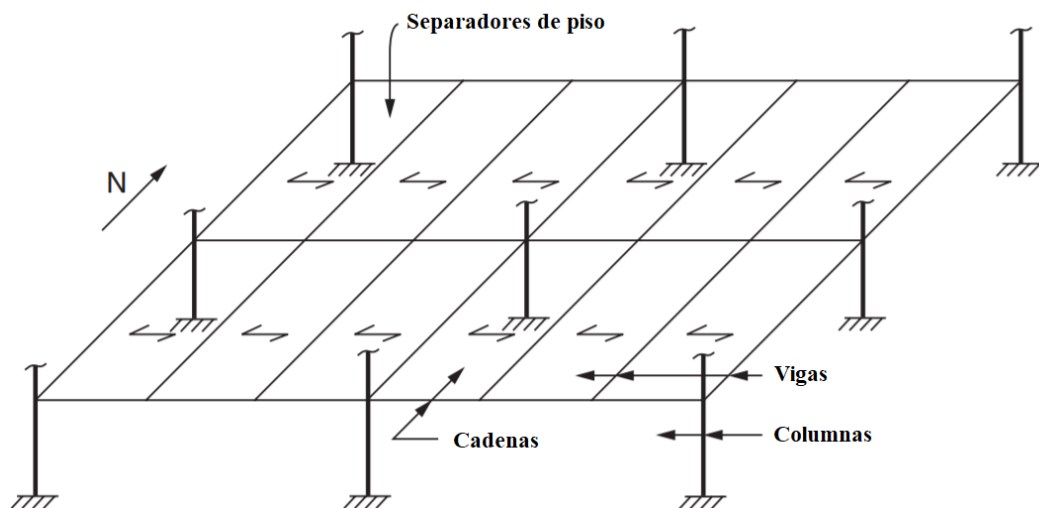


Nota: Tomado de Steel Structures Desing,(p.5) por Alan William, 2011, McGrawHill.

Como se observa en la Figura 3 existen además estructuras de marco compuestas por separadores de piso (losas), vigas, cadenas y columnas estas pueden ser de uno o más pisos convirtiéndose el último separador en un techo, a continuación se muestra:

Figura 3

Estructura de marco compuesta.



Nota: Tomado de Steel Structures Desing,(p.5) por Alan William, 2011, McGrawHill.

El diseño de las estructuras no solo debe estar dimensionado para resistir cargas vinculadas con la gravedad, también deben estar consideradas las cargas laterales que se generen por factores externos como lo son vientos fuertes y terremotos.

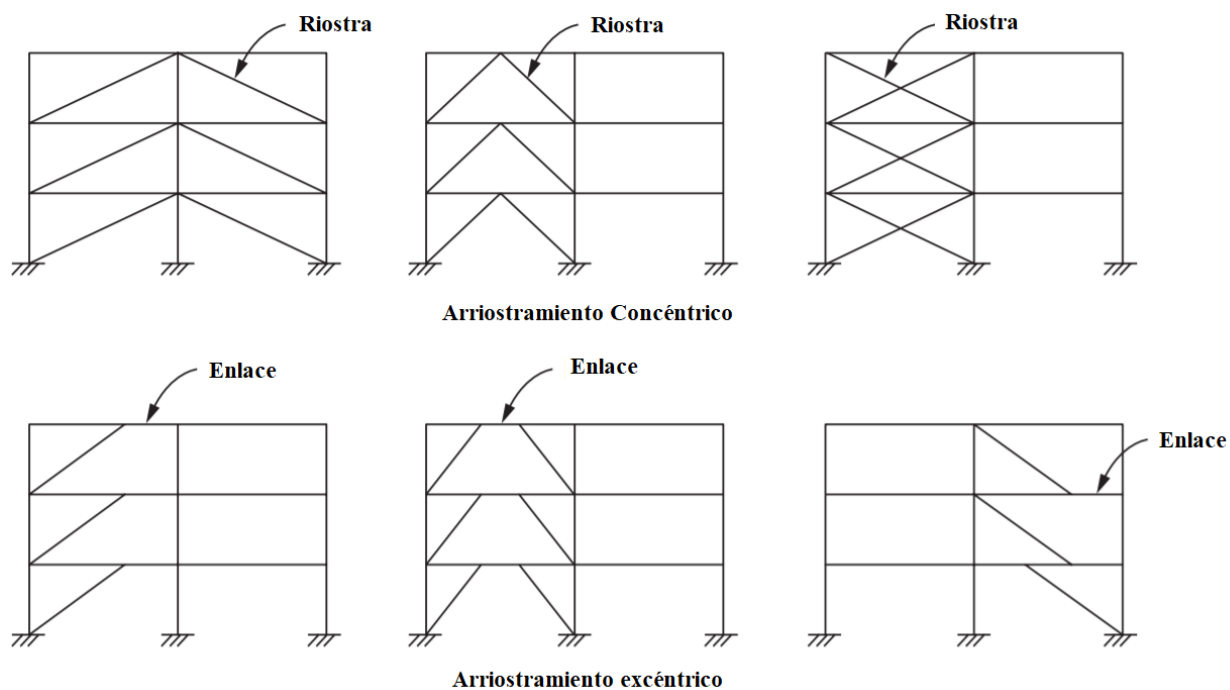
Existen varias técnicas que proporcionan la resistencia necesaria para contrarrestar movimientos laterales, algunas de las técnicas son marcos especiales con resistencia al momento, marcos arriostrados y muros de corte. (Williams, 2011)

Para ganar ductilidad en las articulaciones y poder disipar toda la energía proporcionada por movimientos laterales se utilizan las conexiones de flexión.

Existen dos teorías referentes al reforzamiento de estructuras, en las dos se incluye la utilización de riostras o soportes diagonales para que exista mayor soporte y mejor distribución de cargas, estas alternativas son más eficientes y económicas que otras soluciones simples, pero al mismo tiempo limita la altura de las estructuras y el diseño arquitectónico. A continuación se observa en la Figura 4 la teoría de arriostramiento concéntrico descrito por Cochran y Honeck, y arriostramiento excéntrico descrito por Becker e Ishler (Williams, 2011).

Figura 4

Estructuras con arriostramiento concéntrico y excéntrico



Nota: Tomado de Steel Structures Desing,(p.7) por Alan William, 2011, McGrawHill.

Carga Sísmica

Al existir movimientos horizontales en el punto de fijación de una estructura, vuelve a sus componentes más susceptibles a deformaciones que pueden causar daño a la integridad de la estructura, incorporar un mecanismo o sistema de aislamiento en la base de la estructura permite reducir la energía que reciben los componentes de la estructura durante un sismo. El objetivo fundamental de un aislamiento es reducir la frecuencia fundamental a la que está sometida la estructura (Gómez, 2001).

Análisis de vibraciones

Según Águila “La vibración se define como el movimiento oscilante que hace una partícula alrededor de un punto fijo. Este movimiento puede ser regular en dirección frecuencia o intensidad, también puede ser aleatorio que son los casos más comunes” (Aguila, 2008).

Las variables con mayor significancia o peso en el estudio de las vibraciones son la frecuencia y las fuerzas que intervienen en el fenómeno, con estas variables es posible determinar qué tan nocivo sean los diferentes tipos de fenómenos vibratorios en un determinado cuerpo o estructura.

Al momento de analizar una vibración en una estructura, es necesario tener en claro su fuente y su posible perjuicio sobre la estructura (Aguila, 2008).

Sistemas vibratorios

Un sistema masa-resorte-amortiguador, al representar un movimiento de un sistema lineal de un grado de libertad, obtiene como Ecuación 1.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

m : masa de un sistema de 1GDL

\ddot{u} : aceleración

c : coeficiente de amortiguamiento viscoso

\dot{u} : velocidad

k : matriz de rigidez

u : desplazamiento o deformación

Para obtener un modelo de vibración libre, se debe establecer que $p(t) = 0$; si para los sistemas sin amortiguamiento la variable c de la ecuación (2) es igual a cero entonces:

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

Al sacar a un sistema del equilibrio estático se da cabida a un sistema de vibración libre, en el instante inicial se otorga a la masa un desplazamiento, velocidad y aceleración, en el mismo instante (Chopra, 2014).

La resolución para la ecuación (2.2) planteada está sujeta a las condiciones iniciales con lo que se obtiene:

$$u(t) = u(0) \cos w_n t + \frac{\dot{u}(0)}{w_n} \sin w_n t \quad \text{Ecuación 3}$$

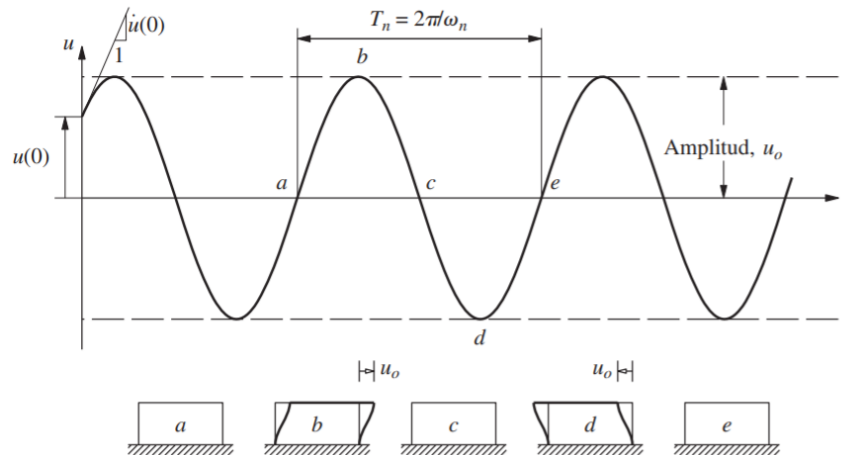
De donde se obtiene

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Ecuación 4}$$

En la siguiente Figura 5 se observa el comportamiento de la Ecuación 3.

Figura 5

Sistema sin amortiguamiento en vibración libre.



Nota: Tomado de *Dinámica de estructuras*, Chopra (p.40) 2014, Pearson educacion.

Para que el sistema sin amortiguamiento complete un ciclo de vibración libre se requiere un tiempo que en este caso será el periodo natural de vibración del sistema, con unidades en segundos. Relacionado con la frecuencia circular natural se obtiene la Ecuación 5:

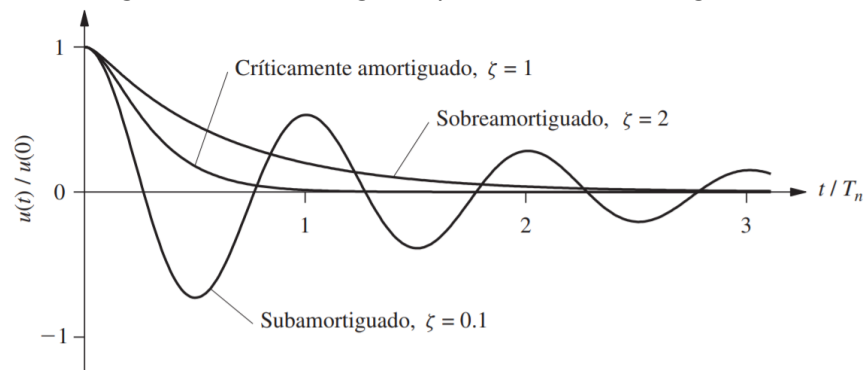
$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad \text{Ecuación 5}$$

Tipos de movimiento

Los sistemas vibratorios pueden responder de tres maneras según el tipo de amortiguamiento que los caracterice, como se observa en la Figura 6. Al ser $\zeta < 1$ se dice que el sistema oscilará en torno a su posición de equilibrio mientras existe una disminución progresiva de la amplitud, a este movimiento se lo denomina subamortiguado. Al ser $\zeta = 1$ el sistema vibratorio retorna al equilibrio sin ninguna oscilación de por medio, este movimiento se lo denomina críticamente amortiguado. Finalmente si $\zeta > 1$ en el sistema vibratorio no existirán oscilaciones para que pueda llegar al equilibrio, pero al contrario del movimiento críticamente amortiguado, para este movimiento su respuesta es más lenta, este movimiento se denomina sobreamortiguado. En la Figura 6 se evidencia una ejemplificación de los movimientos.

Figura 6

Movimientos amortiguado, sobreamortiguado y críticamente amortiguado.



Nota: Tomado de *Dinámica de estructuras*, Chopra (p.49) 2014, Pearson education.

En el estudio de estructuras podemos encontrar un factor de amortiguamiento menor a 0.10 por lo que el enfoque debe ser directamente a sistemas subamortiguados, estructuras como puentes, edificios, represas, etc. Ingresan dentro de esta categorización (Chopra, 2014).

Sistemas subamortiguados

Para sistemas subamortiguados la ecuación que caracteriza el movimiento está dada por la siguiente expresión:

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[u(0) \cos \omega_D t + \frac{u(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \text{sen } \omega_D t \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

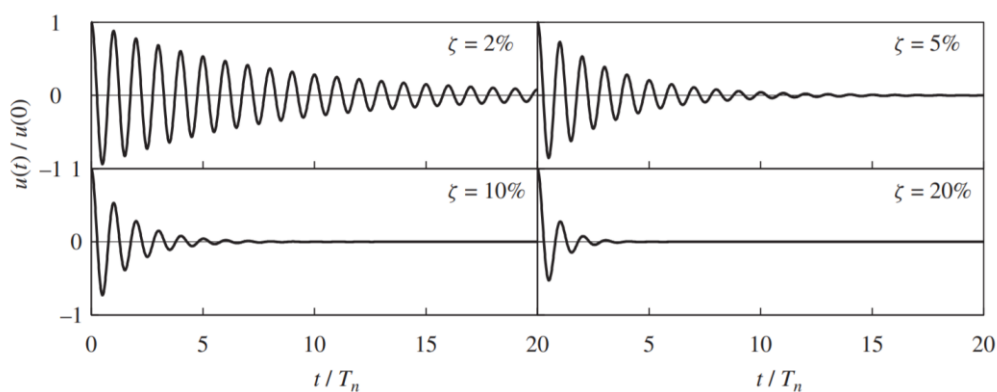
En donde:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Según Chopra “El efecto más importante del amortiguamiento es sobre la rapidez de decaimiento en vibración libre” esto es aplicable en las estructuras al momento de determinar la velocidad con la que se quiere disipar un determinado movimiento vibratorio que pueda generar consecuencias negativas sobre la estructura como se observa en la Figura 7 (Chopra, 2014).

Figura 7

Respuesta de amortiguamiento según coeficientes 2% 5% 10% y 20%.



Nota: Tomado de *Dinámica de estructuras*, Chopra (p.51) 2014, Pearson educación.

La mayoría de estructuras metálicas y obras civiles presentan razones de amortiguamiento menores al 10% por lo cual el caso de interés en este estudio es un sistema subamortiguado.

Al amortiguamiento al permitir disminuir la amplitud y duración de las vibraciones es de gran importancia, como se puede observar en la Figura 7 donde se muestra un sistema de vibración libre con diferentes razones de amortiguamiento pero misma frecuencia natural.

Amortiguamiento

Mientras la tecnología y la población crecen se requieren aprovechar los espacios, es por eso que se optó por el desarrollo de edificaciones a gran escala, como rascacielos o puentes de gran magnitud, esto dio pie a que se haga una consideración sobre el amortiguamiento en las estructuras (Gómez, 2001).

En una estructura se pueden encontrar diversos elementos que son importantes en su desarrollo y composición: estos elementos son vigas, losa o placa, planta, base, muros, tensores y arcos. Cada uno de los elementos aporta con ciertas características al sustento de toda la estructura y al fortalecimiento de las diferentes zonas críticas (Giordani, 2009).

Según Gómez “El amortiguamiento estructural está limitado por la capacidad de disipación de energía de los materiales, generalmente concreto y acero. En estructuras flexibles, como rascacielos y puentes colgantes, el amortiguamiento aerodinámico puede contribuir a disipar energía dependiendo de la forma estructural y de la velocidad y dirección del viento” (Gómez, 2001).

El amortiguamiento que se genera entre el suelo y la estructura, determina un importante canalizador de energía, estos canalizadores de energía permiten que el producto de un sismo por ejemplo, sean difuminados para evitar daños a su alrededor (Gómez, 2001).

Tipos de Amortiguamiento

Mediante la amortiguación se disipa la energía de vibración en un sistema mediante diferentes mecanismos. A continuación se detalla los dos principales mecanismos físicos para amortiguación, que son del material y estructural.

Amortiguación del material

Permite la disipación de energía mediante la fricción interna generada por el material cuando este vibra, esta fricción está relacionada con la microestructura del material como es la granularidad o impurezas. Los agentes que intervienen son dos superficies en contacto la una con la otra, aquí existirá una disipación de energía que va ligada con el coeficiente de rozamiento del material, cada material tiene su propio coeficiente de rozamiento y este incrementa o disminuye dependiendo del tipo de acabado superficial que se pueda generar en el objeto. Generalmente en este tipo de amortiguamiento la energía cinética disipada se convierte en calor.

Amortiguación estructural

Permite la disipación de energía por medio de la fricción entre los elementos que conforman la estructura, como lo son las uniones o conectores. En las estructuras se puede encontrar diferentes materiales, los materiales más utilizados son los metálicos, lastimosamente este tipo de materiales no son adecuados disipadores de energía, para lograr una correcta disipación es necesario la utilización de materiales plásticos blandos y caucho (Arosquipa, 2015).

Las estructuras están constantemente sometidas a diferentes cargas que en sí, pueden ser la carga física o peso que soportan por su construcción, fenómenos naturales como vientos, sismos o mareas. Las cargas de vientos o sismos no se puede determinar en primera instancia su dirección o sentido por lo que se vuelven más difíciles de predecir que las cargas físicas impuestas en la estructura que sean impulsadas por eventos gravitacionales (Gómez, 2001).

En zonas sísmicas es necesario un constante estudio estructural de los diferentes edificios, puentes o cualquier estructura crítica como hospitales principalmente. Es mucho más fácil actuar sobre una estructura en construcción, si se desea incorporar todas las seguridades y disipadores de energía necesarios para contrarrestar los movimientos generados por un sismo.

Cuando ya la estructura está terminada aumenta la dificultad para lograr un aseguramiento estructural adecuado.

En esta investigación se utilizará el amortiguamiento estructural para evaluar como varia la amplitud y tiempo de onda al utilizar más conexiones y uniones dentro de la estructura.

Sistema de vibración

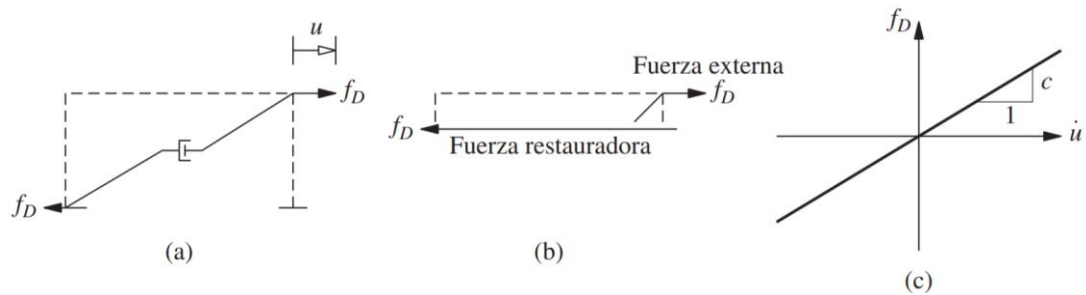
Para alcanzar una reducción constante de una vibración libre es necesario aplicar amortiguamiento. Debido al amortiguamiento existe una disipación controlada de la energía que interviene en el sistema de vibración, existen diferentes métodos para realizar dicha disipación, en algunos sistemas es necesario más de dos mecanismos para realizar la disipación de la energía con la que el sistema vibra. En las estructuras civiles existen varios métodos para disipar energía, ya sea la fuerza de fricción que se genera en conexiones de acero, generación de minúsculas fisuras y rozamiento con elementos no estructurales. (Chopra, 2014)

Existe únicamente una forma idealizada de representar el amortiguamiento en estructuras reales, de aquí que para fines prácticos el amortiguamiento en un sistema de un grado de libertad se lo puede representar con un amortiguador viscoso lineal. (Chopra, 2014)

Según Chopra “El coeficiente de amortiguamiento se selecciona de modo que la energía disipada sea equivalente a la energía disipada en todos los mecanismos de amortiguamiento, combinados presentes en la estructura real” (Chopra, 2014).

Figura 8

Razón de decremento de movimiento en sistema vibratorio



Nota: Tomado de *Dinámica de estructuras*, Chopra (p.13) 2014, Pearson educacion.

En la Figura 8(a) se evidencia una fuerza f_D en dirección de movimiento de un grado de libertad "u", esta fuerza somete a un amortiguador viscoso lineal, de esta manera obtendremos la relación entre la fuerza interna del amortiguador y la fuerza externa f_D , de modo que la fuerza responde a la siguiente ecuación:

$$f_D = c\dot{u} \quad \text{Ecuación 8}$$

De esta ecuación se determina al coeficiente de amortiguamiento viscoso a "c" y la velocidad que está dada por " \dot{u} ".

Aparte del amortiguamiento, se disipa energía debido al comportamiento inelástico de la estructura cuando esta se somete a considerables deformaciones.

Mesas Vibratorias

Son plataformas móvil que simula movimientos vibratorios sobre una estructura, son construidas generalmente de metal, las cuales por medio de controladores y actuadores logran

reproducir un movimiento sísmico tomando en consideración el escalamiento de una señal de entrada de aceleración, frecuencia y desplazamiento (Clavijo & Ramirez , 2011).

En las últimas décadas las mesas vibratorias han ido evolucionando de acuerdo a la tecnología, desde mecanismos simples hasta mesas inteligentes con sensores y procesamiento de datos.

A finales del siglo XIX se desarrollaron las primeras mesas vibratorias, estas tenían movimientos generados manualmente por mecanismo de rueda manivela con una plataforma móvil sobre rieles. Después de unas décadas con la llegada de la electricidad se sustituyó el movimiento manual por motores eléctricos. En 1930 Jacobsen propone una mesa vibratoria que produce su movimiento a través de un primer impulso, el cual es generado a partir de un péndulo de impacto y el movimiento generado se transmite a través de un resorte.

Las mesas vibratorias actuales funcionan con actuadores y sistemas de control para simular sismos. La primera mesa de gran tamaño fue construida en la Universidad de California, esta mesa permitía movimientos verticales como horizontales, lo que inspiró a la realización de mesas vibratorias con mayor número de grados de libertad.

Estas mesas vibratorias son de gran utilidad puesto que permiten desarrollar estudios sobre los efectos que causan los sismos en una estructura, estos estudios facilitan la validación, calibración y predicción de modelos para tener un correcto análisis y diseño de edificios, puentes, entre otros (Valdiviezo, 2019).

Tipos de mesas Vibratorias

Las mesas vibratorias se pueden clasificar según su tamaño, el tipo de actuador para generar los movimientos y los grados de libertad como se observa en la Tabla 2.

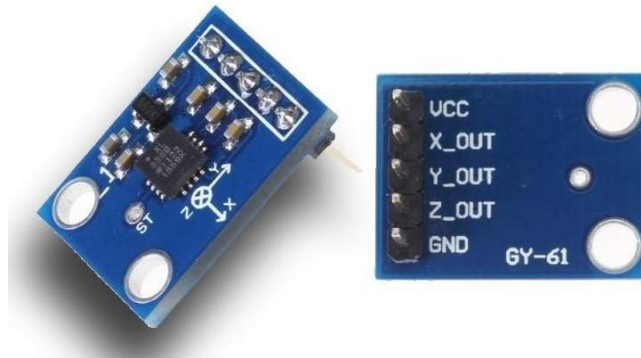
Tabla 2*Datos técnicos de mesas sísmicas ordenadas de menor a mayor tamaño*

Mesas Vibratorias instaladas	Dimensiones m	Límite de carga KN	aceleración máxima	distancia máxima cm	frecuencia máxima
Pequeñas					
Universidad de Stanford	1,5x1,5	22,2	5	6,35	50
Universidad Rice	1,5x1,5	6,67	6	7,62	70
Universidad de Calgary	1,4x1,4	8,9	220	7,62	
Medianas					
Universidad de California en Berkeley	6,1x6,1	444,8	1,5	12,7	15
Universidad Illinois	3,65x3,65	44,8	7	10,16	100
Corporación americana de ingenieros	3,65x3,66	53,38	34	5,59	200
Universidad estatal de Nueva York en Buffalo	3,65x3,67	195,7	4,2	15,24	60
Grandes					
Centro nacional de investigaciones Japón	15,24x15,24	4448,2	0,6	3048	16
Berkeley -Propuesta	30,5x30,5	177792,9	0,6	15,24	

Nota: Tabla sacada de (Rives, 2018)

Acelerómetros

Los acelerómetros permiten medir la vibración o aceleración de un movimiento estructural. La fuerza que se genera por dicha vibración o el cambio de movimiento hace que la masa comprima el material piezoeléctrico, y se genera una carga eléctrica proporcional a la fuerza que se ejerce sobre él. En la Figura 9 se puede observar un acelerómetro (OMEGA, 2021)

Figura 9*Acelerómetro adxl335**Nota: Recuperado de (Descubre Arduino)***Control de velocidad**

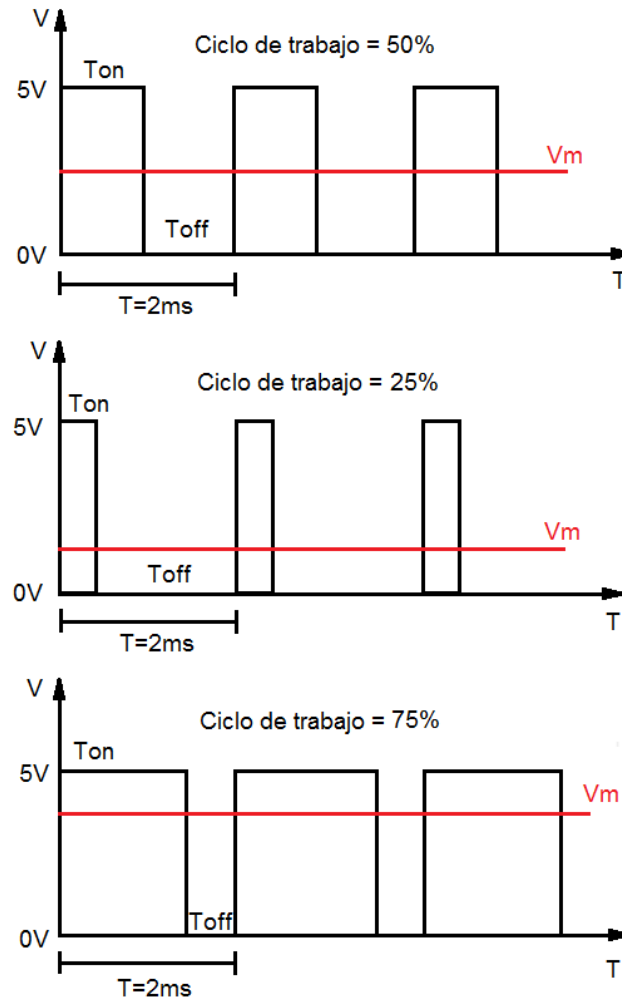
Para el trabajo se ha seleccionado un motor de corriente continua puesto que permite un amplio rango de velocidad y puede proporcionar un alto par-motor con control más sencillo y económico que cualquier motor de corriente alterna. (Alvarado, 2009)

Para alcanzar la velocidad deseada, el valor de la consigna se compara continuamente con la velocidad real. La diferencia se aplica al motor a través de la etapa de potencia y el valor de la consigna se introduce en la electrónica mediante una tensión analógica. Para la regulación de la velocidad del motor se utiliza la técnica denominada PWM (Modulación de ancho de pulso) por su fiabilidad y sencillez a la hora de implementarlo.

La técnica del PWM trabaja con una señal digital cuadrada, en la cual se puede variar el ciclo de trabajo sin variar la frecuencia. Con PWM lo que se hace es aplicar la máxima tensión, pero no todo el tiempo, si no a pulsos, con lo que se consigue regular la velocidad manteniendo la potencia del motor. (Super robotica, 2019) El ciclo de trabajo describe la cantidad de tiempo

que la señal está en un estado lógico alto, como un porcentaje del tiempo total que este toma para completar un ciclo completo. La frecuencia determina con qué rapidez se completa un ciclo, y por lo tanto, con qué velocidad se cambia entre los estados lógicos alto y bajo. Al modificar una señal de estado alto a bajo; en un espacio temporal reducido y con un cierto ciclo de trabajo, la salida parecerá comportarse como una señal analógica constante cuando está siendo aplicada a algún dispositivo. (Mootio, 2017)

En la Figura 10 se puede observar cómo funciona un PWM.

Figura 10*Funcionamiento de un pwm**Nota: Recuperado de (DIY makers)***Motores reductores**

Son máquinas compactas que combinan un reductor de velocidad con un motor. Se encuentran unidos en una sola pieza, se usan para reducir la velocidad de un sistema. Sus principales componentes son:

Par o torque que es la fuerza que permite que el motor gire a una velocidad determinada.

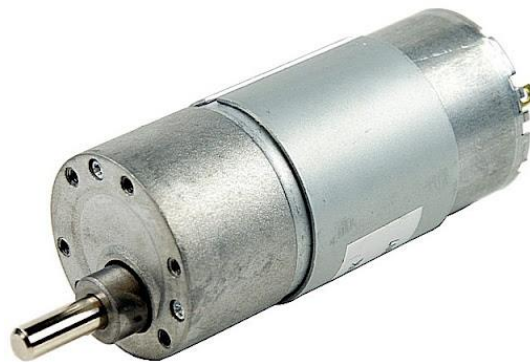
Cuando el torque se une con un tiempo determinado, se conoce como potencia de un motorreductor.

La velocidad de giro del motor depende de la potencia aplicada al motorreductor.

En la Figura 11 se aprecia un motor reductor (Roydisa).

Figura 11

Motor reductor



Nota: Recuperado de (superrobotica, 2021)

Capítulo 3

El siguiente capítulo se compone de todos los diseños realizados para la consecución del presente trabajo, la idea es involucrar las tres ramas fundamentales que componen este trabajo que son la mecánica, la electrónica y los sistemas de control. Como un primer punto se desarrollará el diseño mecánico segmentado en los puntos más influyentes para un adecuado movimiento del prototipo, posteriormente se hace énfasis en la electrónica que permite generar el movimiento y finalmente en el control que se realizará para que los todo desplazamiento sea efectivo y especificado.

Diseño mecánico

La estructura civil está compuesta por un conjunto de accesorios de la marca MOLA comprendidos en un kit estructural, son elementos de acoplamiento imantado lo que permite una gran versatilidad en construcción de estructuras, es decir con los mismos elementos se puede realizar varios tipos de conjuntos estructurales ya sea de dos tres pisos y sobre todo variar en cuanto al soporte de vigas y columnas para comprobar las vibraciones que se generan según la estructura armada.

Los elementos estructurales constan de:

- Una superficie base de dimensiones:

Largo: 267mm

Ancho: 178mm

Espesor: 1mm

- Dieciocho esferas metálicas de diámetro 15mm.

- Doce soportes trapezoidales imantados en sus caras de base 26mm y altura 10mm.
- Nueve extensores imantados en sus extremos 110mm.
- Veinticuatro extensores imantados en sus extremos 95mm.
- Tres bases cuadradas plásticas con ángulos imantados 83mm por lado.
- Seis soportes redondos diámetro 45mm con esfera metálica en el centro.
- Treinta vigas o columnas longitud 75mm diámetro 6mm.
- Dieciocho vigas o columnas longitud 46mm diámetro 6mm.
- Doce soportes trapezoidales de base 43mm y altura 10mm.
- Doce soportes trapezoidales de base 43mm y altura 12mm.

En conjunto y debido a su composición imantada se generarán varios tipos de estructuras para determinadas pruebas que se deseen realizar por motivos de análisis en el presente trabajo se realizará el estudio sobre una estructura que se detalla en el análisis de resultados.

Criterios de selección

Esta investigación estudia el comportamiento de una estructura en pórtico la cual estará sujeta a diferentes condiciones tales como ensamble tridimensional arriostrado de un grado de libertad con y sin amortiguamiento.

Para el estudio se utiliza una mesa vibratoria de dimensiones 40 x 30 cm donde se asienta y asegura la estructura civil, ya que esta transmite el movimiento del motor hacia la estructura. En la Tabla 3 se puede apreciar la matriz de selección de materiales para la mesa.

Tabla 3*Matriz de selección para mesa base según materiales*

Matriz de selección para mesa base			
Características			
	Aluminio Perfil	Tablero MDF	Tablero Aluminio
Masa	2.50 Kg	1.68 Kg	6.48 Kg
Sujeción	Flexible - Modificable	Flexible - Definitivo	Definitivo
Material	Aluminio Anodizado	Madera MDF	Aluminio
Dimensiones (HxAxE)	400x300x20 (mm)	400x300x20 (mm)	400x300x20 (mm)
Costo	USD 50	USD 39	USD 95
Dureza Brinell	245	2.5	245
Carga Vibratoria	Alto	Bajo	Alto
Resistencia flexión	300 N/mm ²	30 N/mm ²	300 N/mm ²
Ponderación			
	Aluminio Perfil	Tablero MDF	Tablero Aluminio
Masa	2	3	1
Sujeción	3	2	1
Material	3	1	3
Dimensiones (HxAxE)	3	3	3
Costo	2	3	1
Dureza Brinell	3	1	3
Carga Vibratoria	3	1	3
Resistencia flexión	3	1	3

Nota. En la tabla se puede observar las características de cada material, siendo el más efectivo el perfil de aluminio.

Análisis mecánico de las estructuras

La estructura se compone de una mesa y soportes, a continuación en las Figuras 12 y 13 se aprecian los componentes.

Figura 12

Componentes de la estructura en vista frontal de la estructura

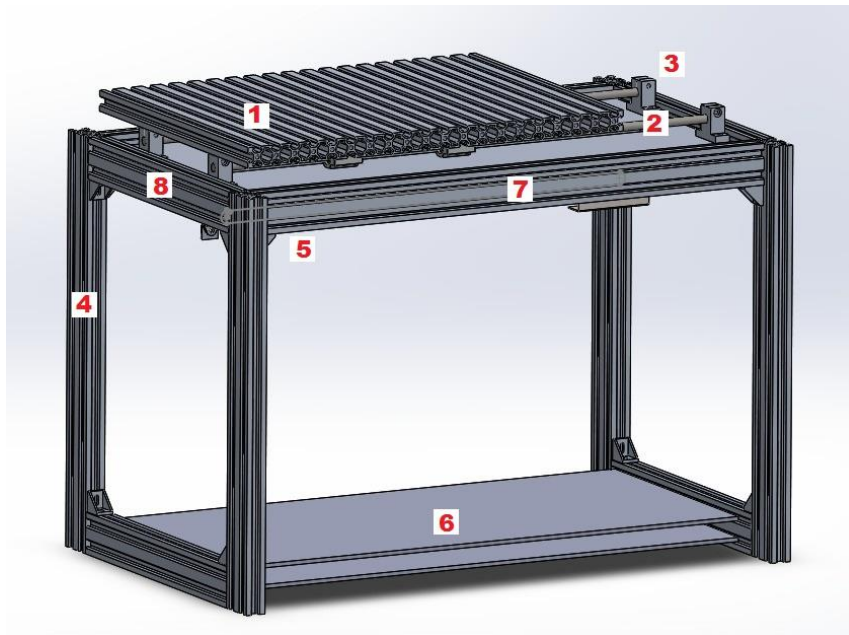
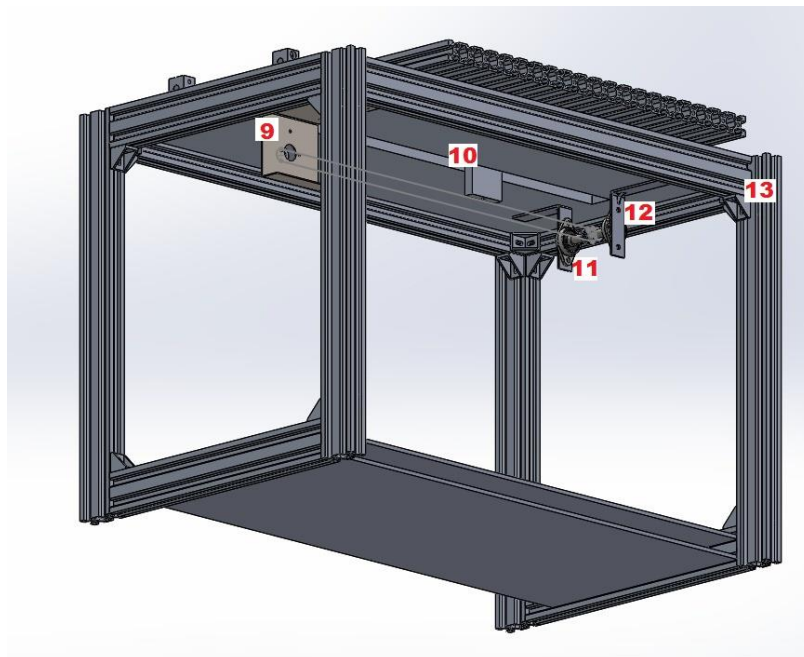


Figura 13

Componentes de la estructura en vista inferior de la estructura



En la tabla 4 se detallan los componentes de la estructura.

Tabla 4

Lista de componentes de la estructura

Item	Descripción	Cantidades
1	Mesa	1
2	Guías para rodamientos	2
3	Soporte de guías	4
4	Columnas	4
5	Correa dentada	1
6	Soporte para electrónica	1
7	Viga frontal	2
8	Viga lateral	2
9	Soporte para motor	1
10	Unión mesa con correa	1
11	Chumaceras	2
12	Soporte para chumaceras	2

Item	Descripción	Cantidades
13	Uniones	16

Se realiza el análisis estático de las vigas empleando el software SolidWorks.

Análisis viga frontal

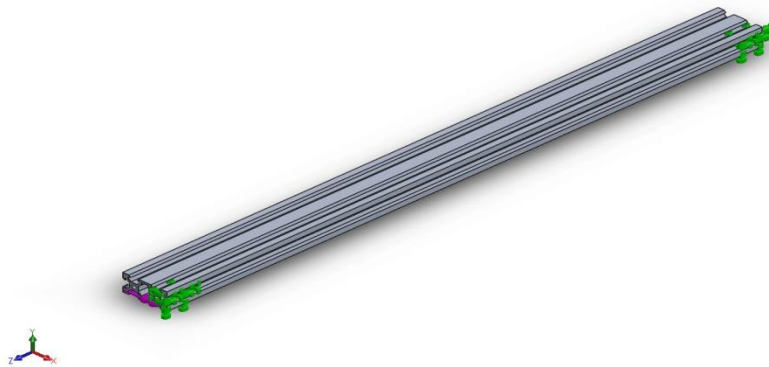
El análisis de la viga Frontal se puede observar en la Figura 14. Las vigas soportan el peso de la placa.

Masa: 8.8 Kg dividido entre 4 vigas.

Fuerza: 21.58 N

Figura 14

Fuerzas existentes en las vigas



Realizando un mallado adaptativo del sólido como se observa en la Figura 15, se obtuvieron los siguientes resultados:

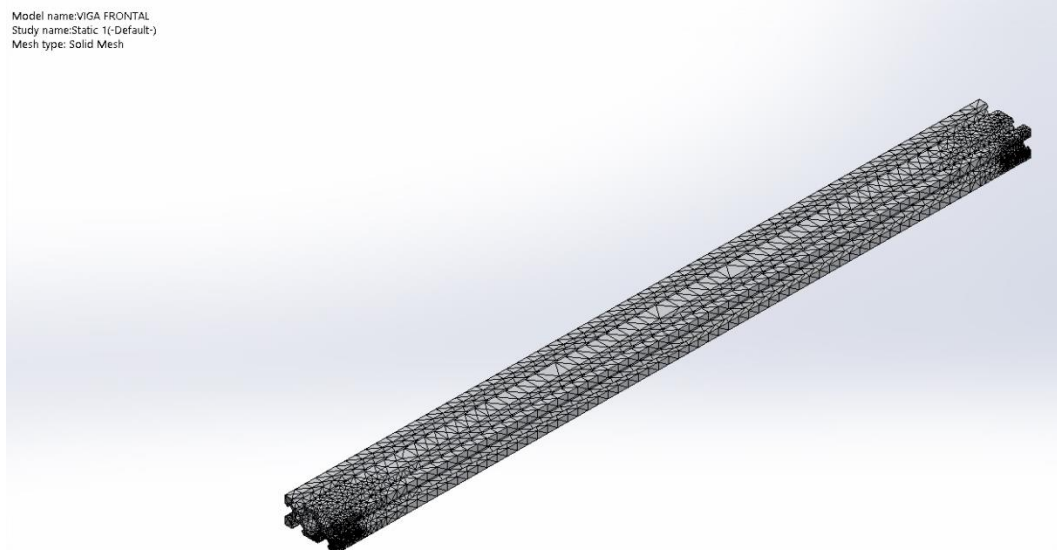
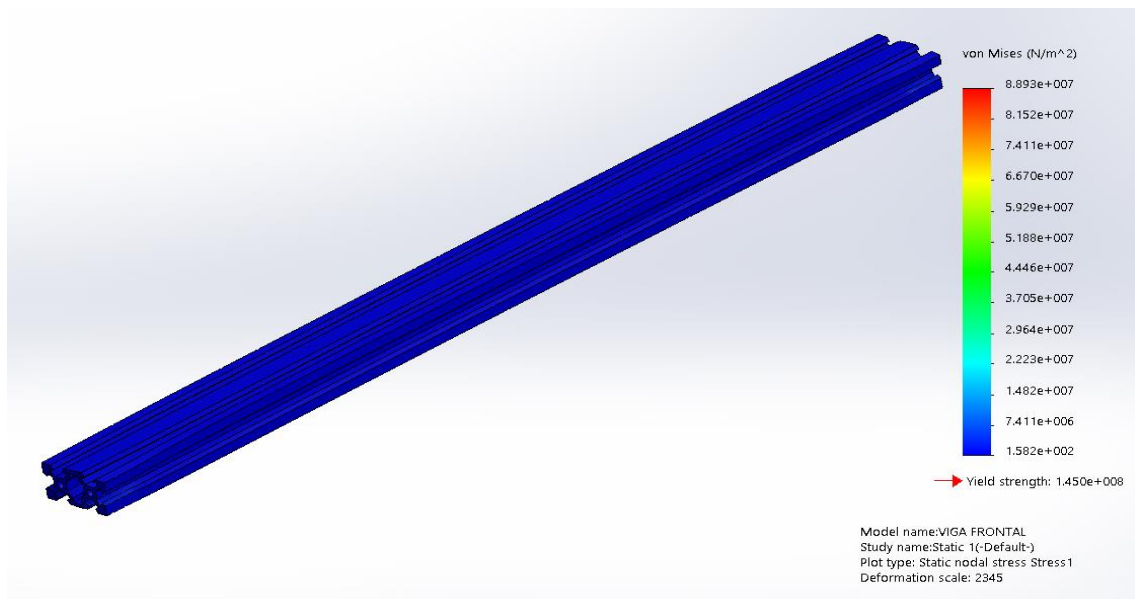
Figura 15*Mallado adaptativo columnas***Figura 16***Análisis estático vigas*

Tabla 5

Esfuerzos máximo y mínimo producidos en la viga

Nombre	Valor mín	Valor máx
Esfuerzo de Von Mises (N/m^2)	158.198	8.89296e+007

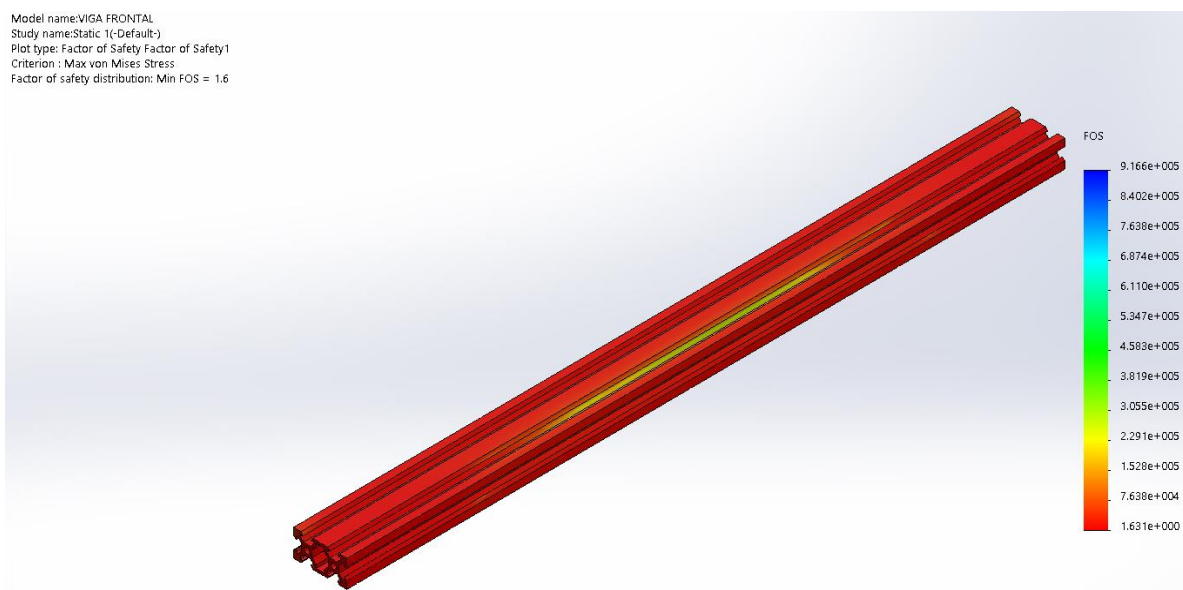
De acuerdo con el análisis realizado como se observa en la Figura 16 y Tabla 5 se tiene como valor máximo 88.9 (MN/m^2).

Realizando el análisis para factor de seguridad.

Figura 17

Análisis de factor de seguridad

Model name: VIGA FRONTAL
 Study name: Static 1 (Default)
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1
 Criterion: Max von Mises Stress
 Factor of safety distribution: Min FOS = 1.6



Se obtiene un factor de seguridad de 1.6.

Análisis unión entre la mesa y correa dentada

El análisis de la pieza que une la mesa con la corredera se puede apreciar en la Figura 18, este acomple se encarga de transmitir el movimiento suministrado por la correa hacia la mesa perfilada de aluminio.

Torque máximo motor: 4 Kg.cm

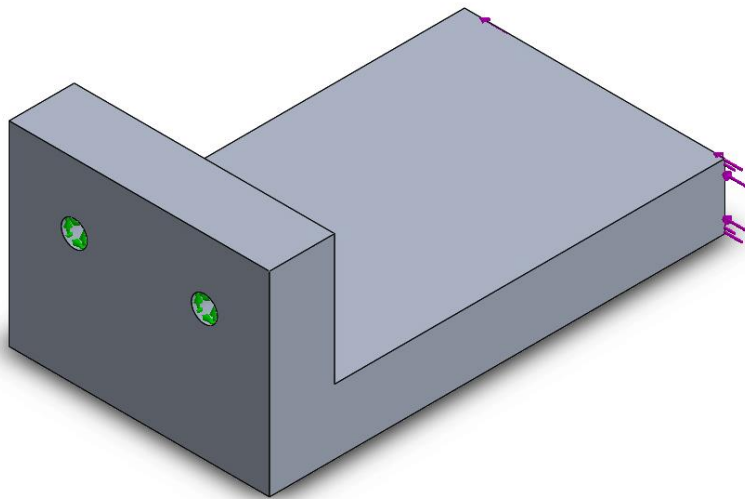
Radio: 6 mm => 0.6 cm

Proporción de reducción: 31.2

Fuerza máxima: $(4 \text{ Kg.cm} / 0.6\text{cm}) * 9.81\text{m/s}^2 = 65.4 \text{ N}$

Figura 18

Fuerzas existentes en la unión I



Realizando un mallado adaptativo del sólido como se observa en la Figura 19, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 19

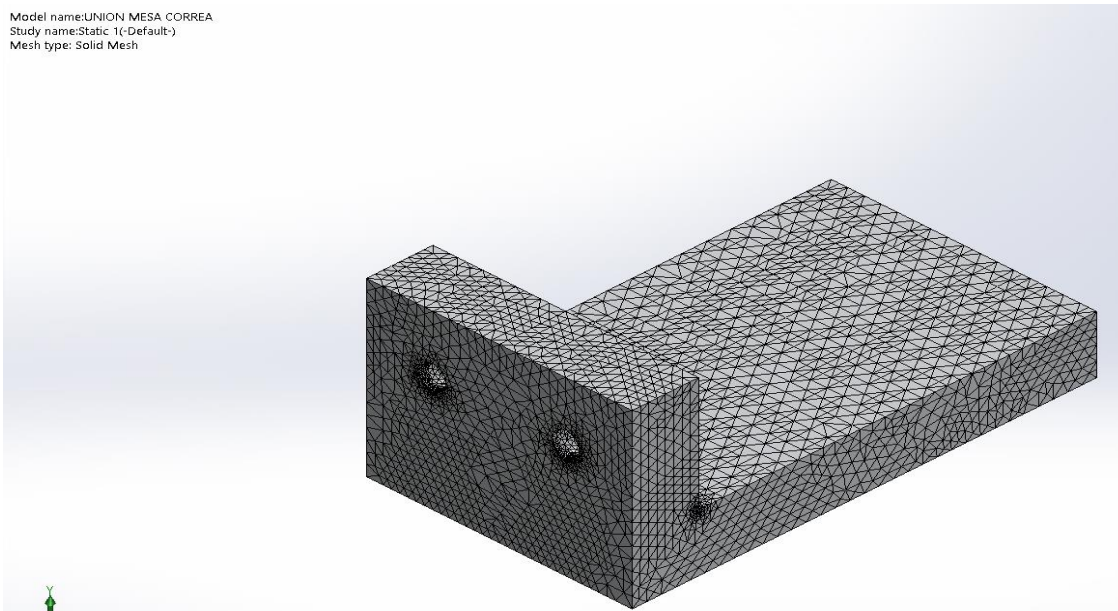
Mallado adaptativo columnas

Figura 20

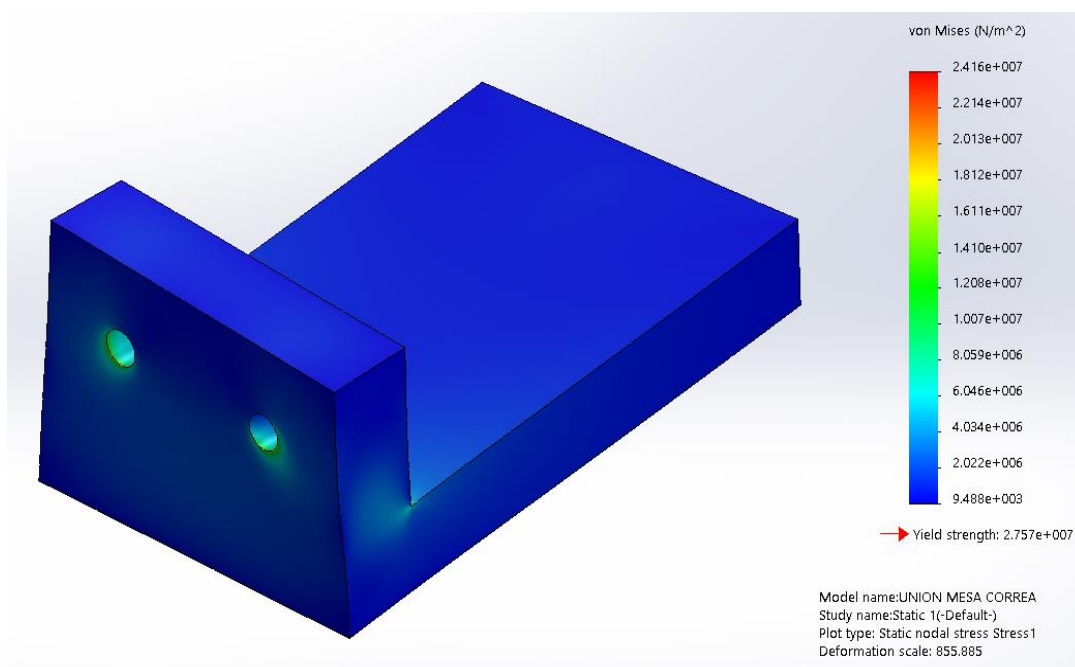
Análisis estático unión con la mesa

Tabla 6

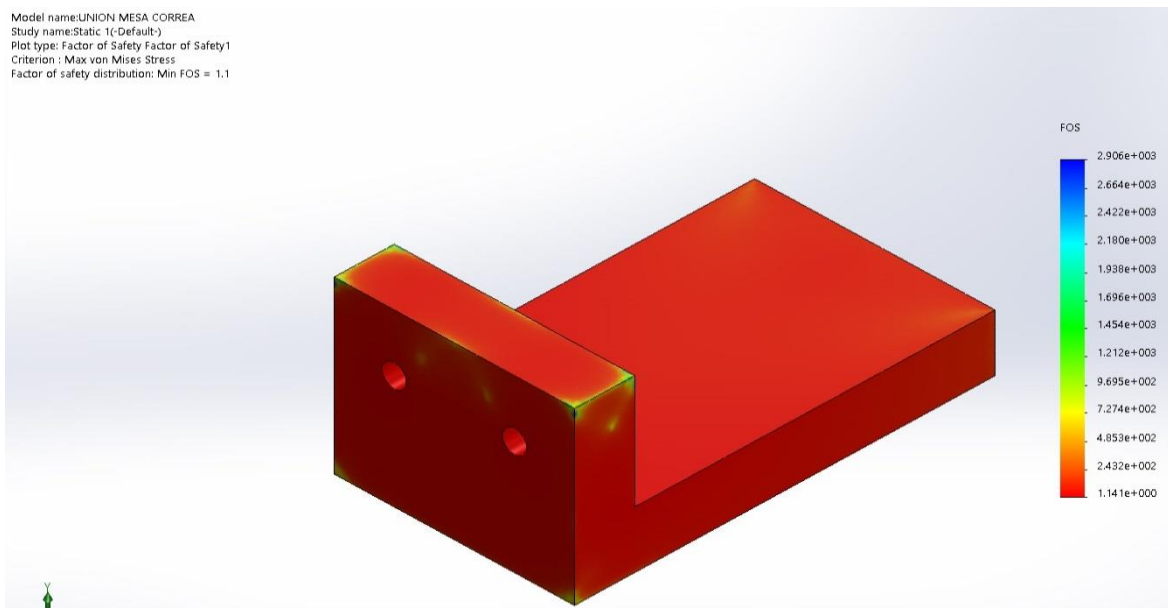
Esfuerzos máximo y mínimo producidos en la unión

Nombre	Valor mín	Valor máx
Esfuerzo de Von Mises (N/m^2)	9487.99	2.4157e+007

De acuerdo con el análisis realizado se tiene como valor máximo 24.15 (MN/m^2), en la Figura 21 se puede observar el factor de seguridad obtenido.

Figura 21

Análisis de factor de seguridad



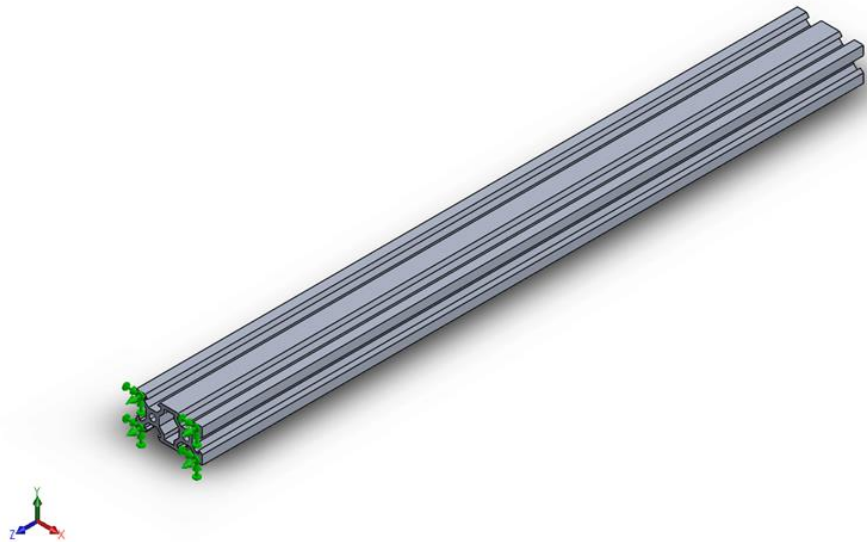
Se obtiene un factor de seguridad de 1.1, al ser mayor que 1 se acepta.

Análisis de las columnas

En la Figura 22 se puede apreciar el sentido de las fuerzas que se generan en las columnas.

Figura 22

Fuerzas existentes en las columnas



En base a ello y realizando un mallado adaptativo del sólido como se observa en la Figura 23, se obtuvieron los siguientes resultados:

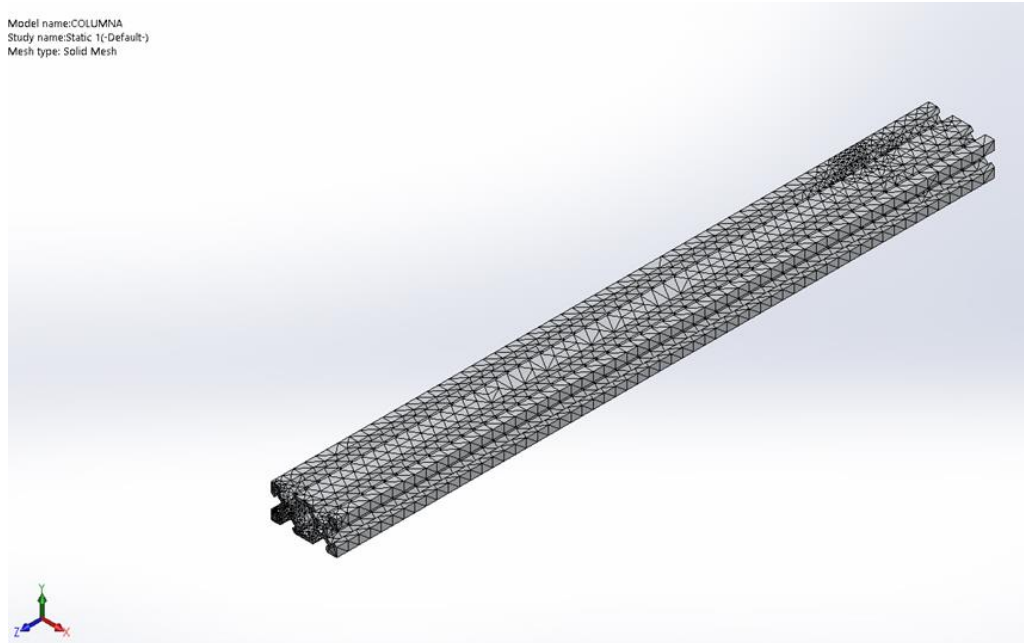
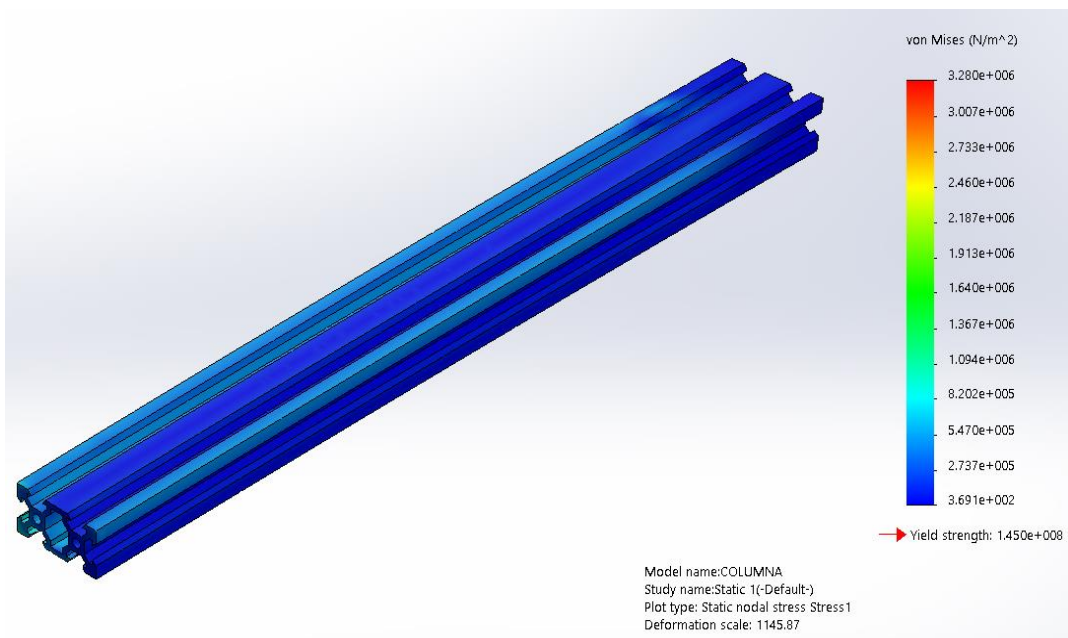
Figura 23*Mallado adaptativo columnas***Figura 24***Análisis estático columnas*

Tabla 7

Esfuerzos máximo y mínimo producidos en las columnas

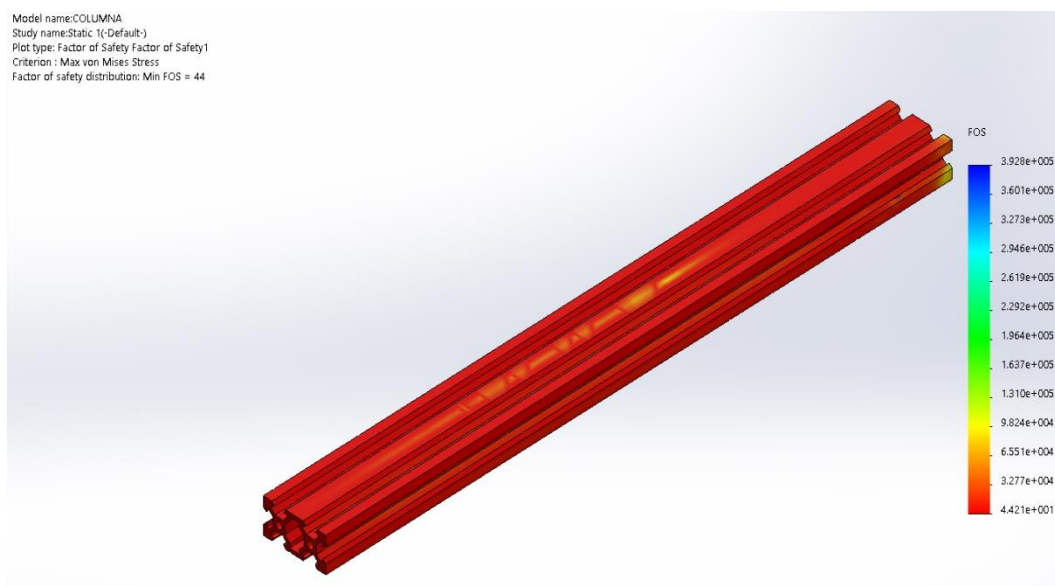
Nombre	Valor mín	Valor máx
Esfuerzo de Von Mises (N/m^2)	369.136	3.27989e+006

De acuerdo con el análisis realizado se tiene como valor máximo 3.27 (MN/m^2).

Finalmente se obtiene el factor de seguridad como se observa en la Figura 25 para verificar un adecuado diseño de las columnas y fallas.

Figura 25

Análisis de factor de seguridad



El valor obtenido es de 44, mismo que supera al valor ideal establecido $n=1$; por tanto, se acepta el diseño. Por los que se realiza un análisis de pandeo elástico para evaluar la capacidad a compresión de la columna.

Análisis de pandeo elástico de las columnas

Como se puede observar en la Figura 26 se muestran las cargas que soportan las columnas por pandeo.

Figura 26

Análisis de pandeo en columnas

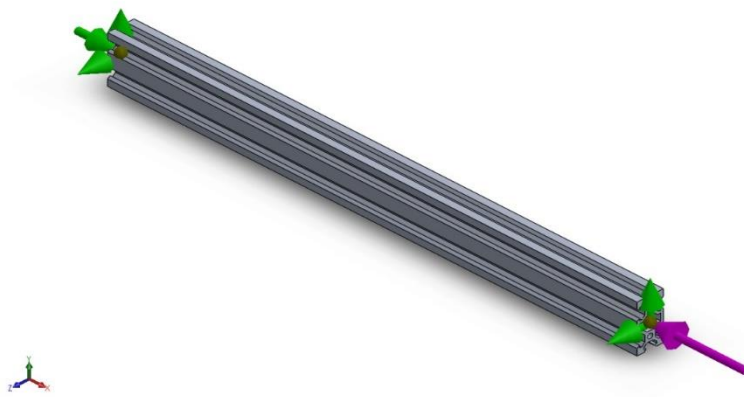


Figura 27

Resultante de la amplitud para modelamiento

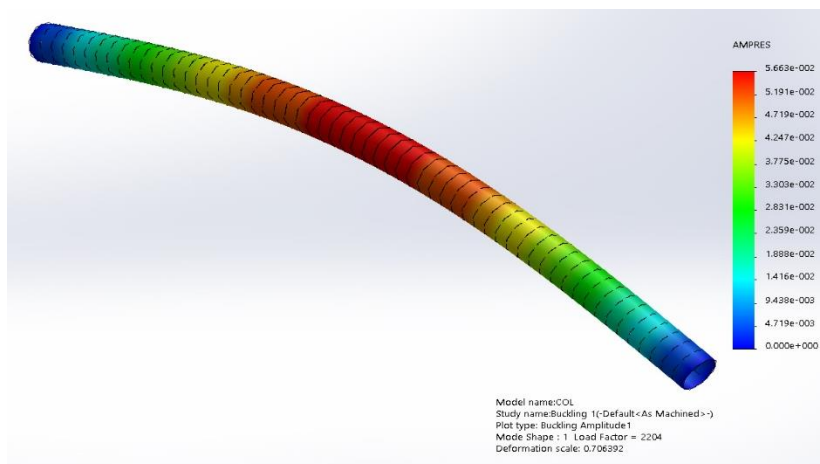


Tabla 8

Factores de carga que soportan las columnas

Modelamiento	Factor de carga
1	2204
2	8300.7
3	8394.9
4	17468
5	49032

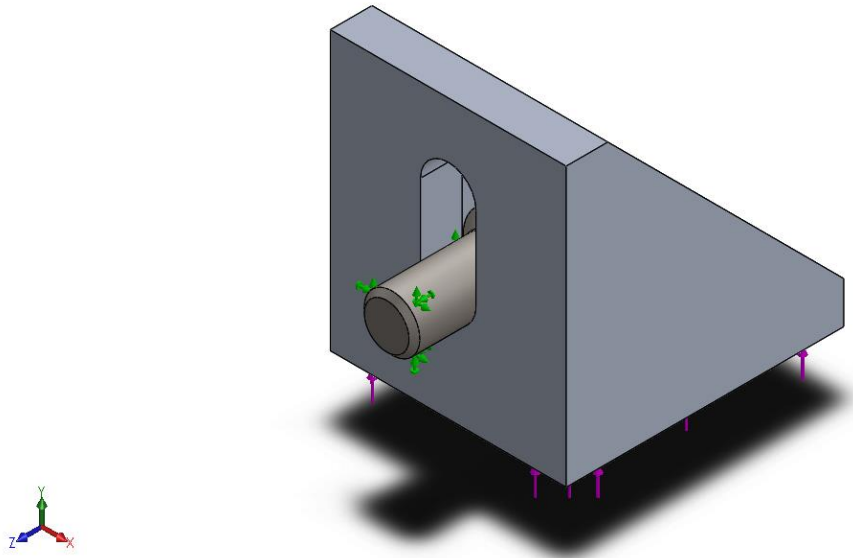
Dentro del análisis de pandeo se obtiene la Tabla 8 de la cual se toman en cuenta el factor 1 y 5 donde se observan las cargas adicionales presentes en las columnas y se acepta un factor de seguridad alto.

Análisis de las uniones

Las uniones son los elementos que más cargas soportan, unen las columnas con las vigas frontal y lateral, el total de la carga es de 101.04 N que son distribuidas entre 4 vigas y 4 columnas generando un uso de 8 uniones por ende la carga para cada unión se será de 12.63 N.

Figura 28

Fuerzas existentes en las uniones



Realizando un mallado adaptativo del sólido como se observa en la Figura 29, se obtuvieron los siguientes resultados:

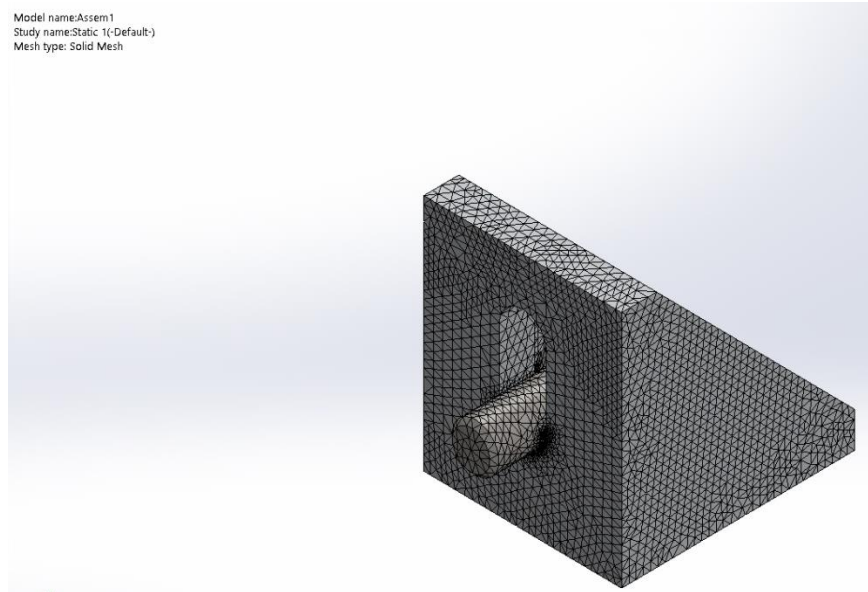
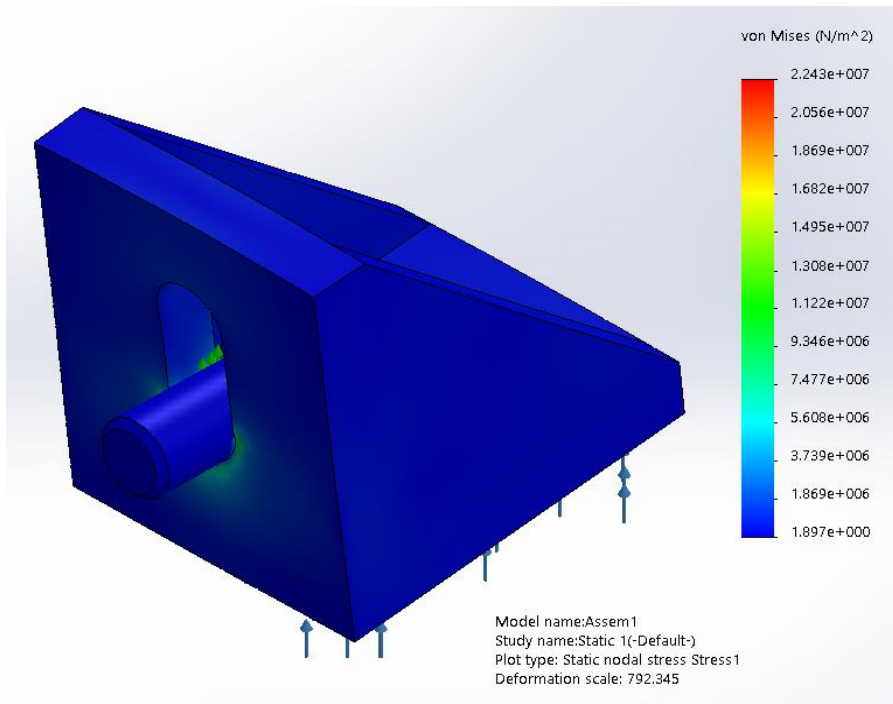
Figura 29*Mallado adaptativo uniones***Figura 30***Análisis estático uniones*

Tabla 9

Esfuerzos máximo y mínimo producidos en las uniones

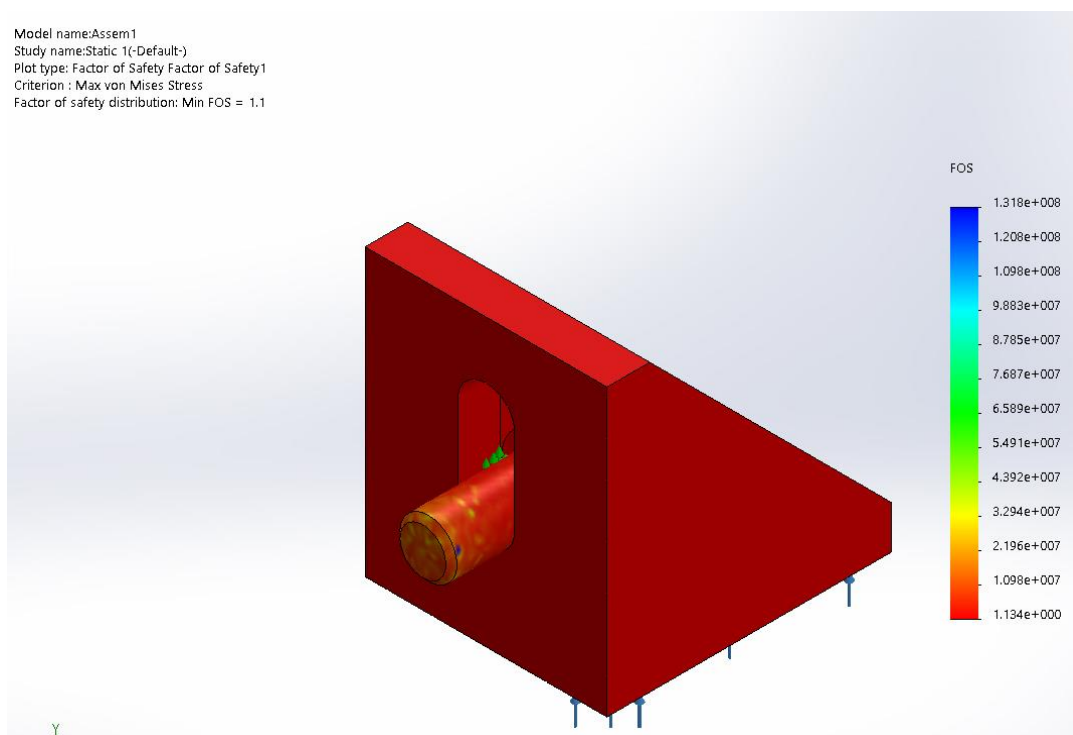
Nombre	Valor mín	Valor máx
Esfuerzo de Von Mises (N/m^2)	1.89719	2.24311e+007

De acuerdo con el análisis realizado se tiene como valor máximo 22.43 (MN/m^2).

Figura 31

Análisis de factor de seguridad

Model name: Assem1
 Study name: Static 1(-Default-)
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1
 Criterion : Max von Mises Stress
 Factor of safety distribution: Min FOS = 1.1



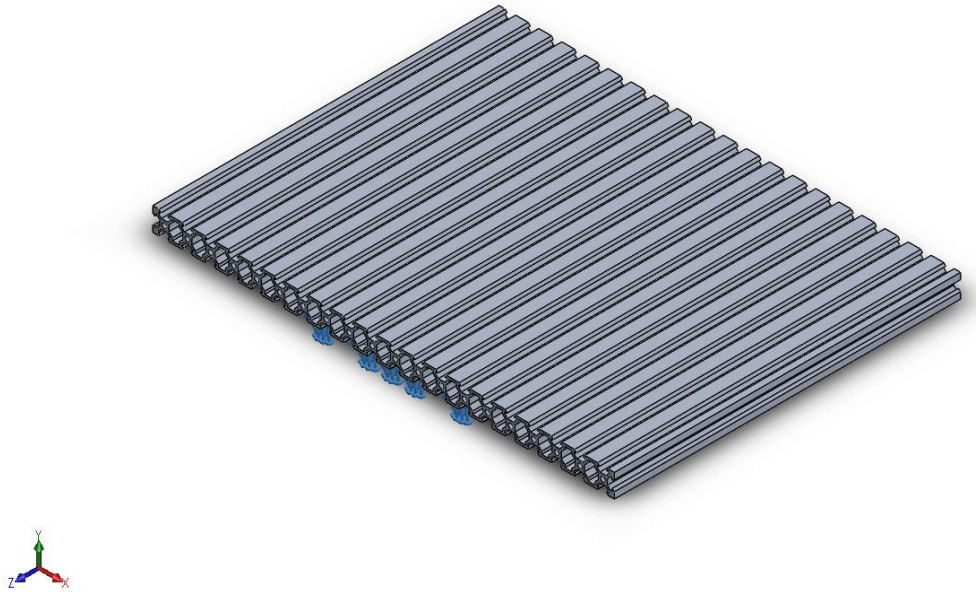
Se obtiene un factor de seguridad de 1.1.

Análisis de frecuencia en la mesa

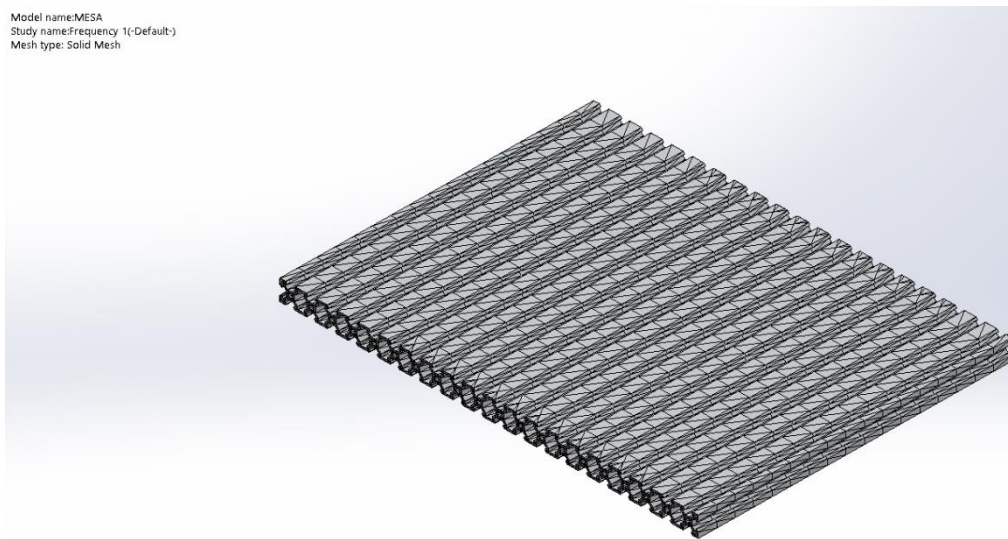
Se analiza hasta que frecuencia es capaz de resistir la mesa antes de sufrir algún daño.

Figura 32

Mesa a ser analizada con frecuencia



A la estructura de la mesa se le realiza un mallado como se observa en la Figura 33 para poder obtener los resultados.

Figura 33*Mallado de la mesa*

Como se observa en la Figura 34 y Tabla 10, la mesa puede soportar hasta 178 Hz.

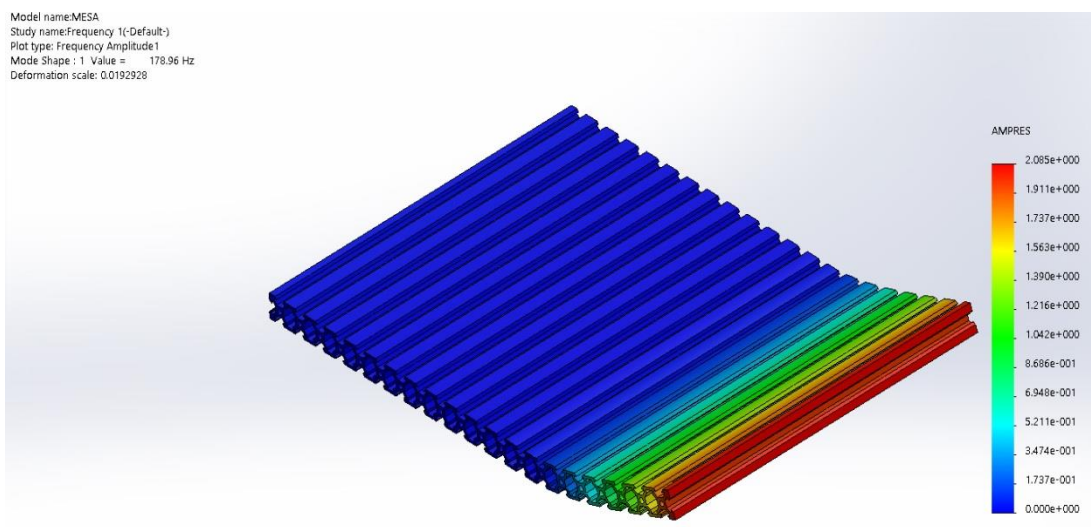
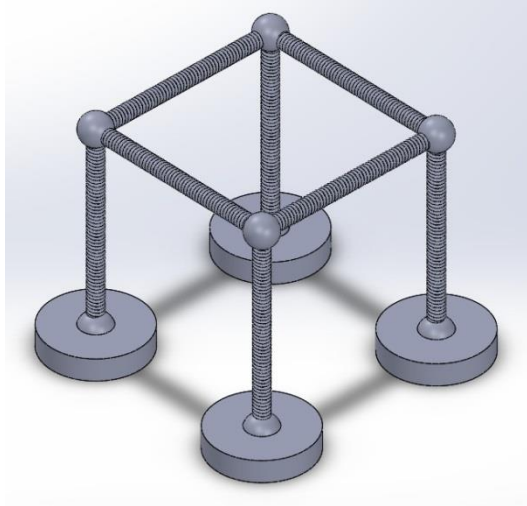
Figura 34*Hertz que soporta la mesa*

Tabla 10*Frecuencias que soporta la mesa*

Número de frecuencias	Rad/sec	Hertz	Seconds
1	1124.4	178.96	0.0055879
2	1125.2	179.08	0.0055841
3	3543.8	564.02	0.001773
4	3545.2	564.23	0.0017723
5	6705.3	1067.2	0.00093704
6	6708.1	1067.6	0.00093665
7	8985.7	1430.1	0.00069924
8	8987.6	1430.4	0.0006991
9	10028	1596	0.00062658
10	10029	1596.2	0.00062648

Construcción de estructura civil

Como se ha detallado en los objetivos del presente trabajo, se desea construir estructuras civiles de un grado de libertad y generar movimientos sísmicos para determinar su comportamiento dinámico, de modo que se ha seleccionado una estructura civil prismática tradicional, de un nivel como se observa en la Figura 35.

Figura 35*Estructura civil*

Las características dimensionales de los componentes de la estructura se han detallado en el apartado 3.1 de modo que la construcción se llevará a cabo con:

- Cuatro esferas metálicas de diámetro 15mm
- Cuatro vigas longitud 75mm diámetro 6 mm
- Cuatro columnas longitud 75mm diámetro 6 mm
- Cuatro soportes redondos diámetro 45mm con esfera metálica en el centro

Se realiza a continuación un análisis del comportamiento mecánico de los componentes de la estructura civil.

Selección de materiales**Diseño de apoyos deslizantes*****Selección de rodamientos***

Para la implementación del prototipo es necesaria la utilización de rodamientos lineales que permitan el avance y retroceso en el eje X, disminuyendo considerablemente el factor de rozamiento.

Desde el análisis del peso a la que se verán sometidos los rodamientos en base a la siguiente tabla:

Tabla 11*Tabla de pesos de materiales utilizados*

Descripción	Cantidad	Peso [kg]
Estructura Civil	1	0.8
Mesa	1	2.50
Soporte de sensor	1	0.1
Sensor	1	0.144
Amortiguadores	2	0.24

Nota: El peso total del conjunto Mesa: 3.78 Kg

El peso total debe ser distribuido para los 4 rodamientos con los que contarán las guías lineales como se observa en Ecuación 9:

$$F_r = \frac{Peso_{total}}{4} * g \quad \text{Ecuación 9}$$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$F_r = \frac{2.79 \text{ Kg}}{4} * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$F_r = 9.27 \text{ N}$$

Utilizando el diseño para duración de vida tomado del catálogo de rodamientos lineales de la marca Bosch (AG, 2015)

Se tiene que la duración de vida en metros será estimada por la Ecuación 10:

$$L = 2 * s * n_s * 60 * L_h \quad \text{Ecuación 10}$$

En donde:

S: recorrido de carrera (m)

L: duración de vida nominal (m)

L_h : duración de la vida mínima (h)

n_s : frecuencia de la carrera (min)

Datos:

$S=0.3$ m

$L_h= 10000$ h

$n_s= 6$ min (carreas dobles por min)

Entonces:

$$L = 2 * 0.3 * 6 * 60 * 10000$$

$$L = 21.6 * 10^5 \text{ m}$$

Para el cálculo de la capacidad de carga tenemos la Ecuación 11:

$$C_{req} = \frac{F_r}{f_h * f_t * f_s * f_l} \quad \text{Ecuación 11}$$

En donde:

C_{req} : Capacidad de carga requerida

F_r : Carga dinámica equivalente

f_h : Factor de dureza de los ejes

f_t : Factor de temperatura

f_s : Factor para carrera corta

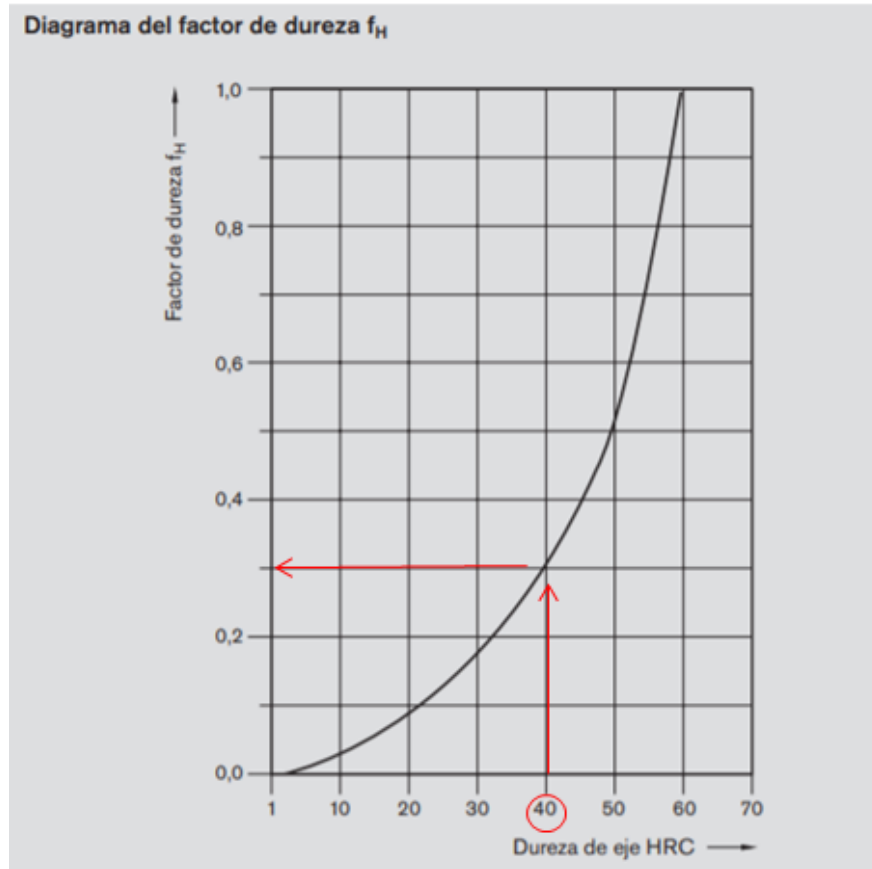
f_l : Factor de duración de vida

Para determinar el factor de dureza de los ejes utilizamos la Figura 36 del catálogo de

Bosch:

Figura 36

Diagrama de factor de dureza f_H



Nota: Tomado de Catalogo de rodamiento lineales Boch (p.16)

Utilizando ejes de acero inoxidable tipo 304 se tiene una dureza de 40 HRC por lo que podemos determinar un factor de dureza de 0.3.

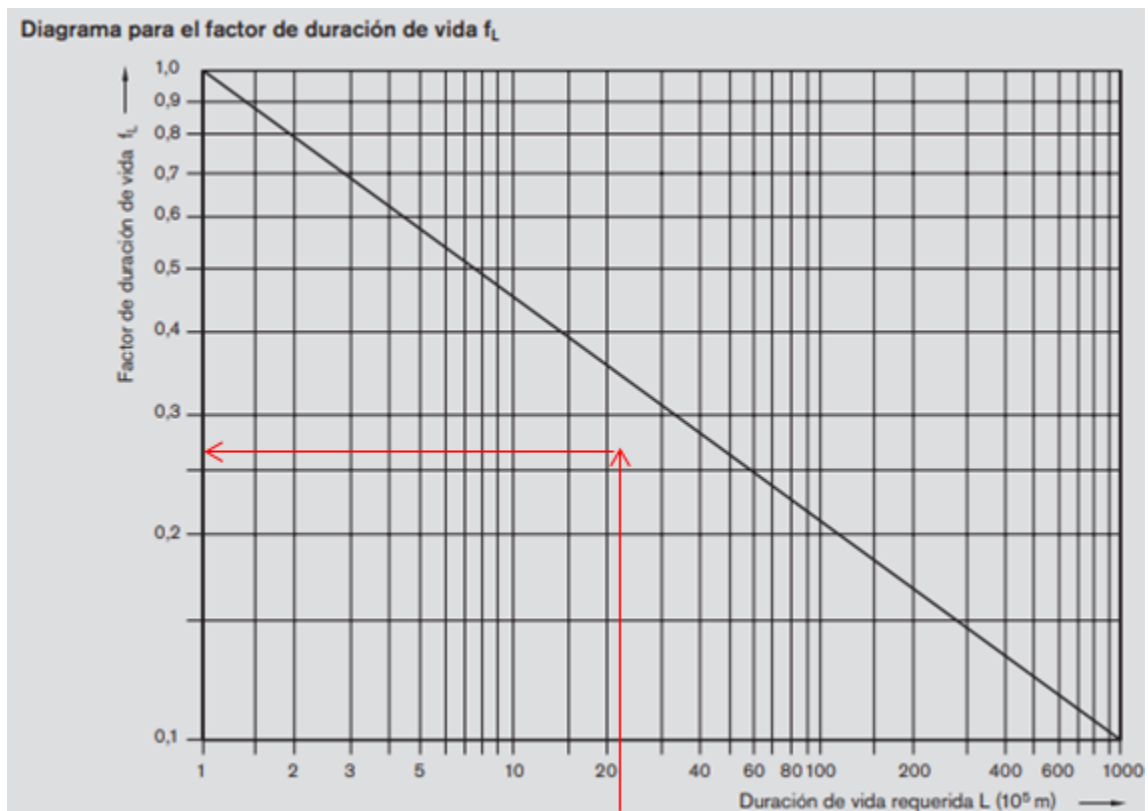
En el catálogo de Bosch se muestra que para temperaturas menores a 100 C se utiliza un factor de temperatura de 1 (AG, 2015).

Para carreras mayores a tres veces la longitud del rodamiento se debe utilizar un factor de carrera corta de 1 (AG, 2015).

Con la Figura 37 y en base al cálculo de la duración de vida requerida “L” determinamos el factor de duración de vida.

Figura 37

Diagrama para el factor de duración de vida f_L



Nota: Tomado de Catalogo de rodamiento lineales Boch (p.17)

El factor para una duración de vida requerida de $21,6 \cdot 10^5$ m se tiene un factor de duración de vida de 0.33.

Entonces reemplazando en la Ecuación 12:

$$C_{req} = \frac{F_r}{f_h \cdot f_t \cdot f_s \cdot f_l} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$C_{req} = \frac{9,27}{0,3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,33}$$

$$C_{req} = 93.63N$$

Según el dimensionamiento los rodamientos para este prototipo deben ser de diámetro 5 milímetros, por temas comerciales y aplicativos se selecciona un diámetro superior “8 mm” con lo que se establece una duración de vida superior otorgando un factor de seguridad como se determina a continuación:

$$S_0 = \frac{C_0}{F_r} \quad \text{Ecuación 13}$$

En donde:

S_0 : es el factor de seguridad

C_0 : es la capacidad de carga estática

F_r : Carga estática máxima

$$S_0 = \frac{240 N}{93.63 N}$$

$$S_0 = 2.56$$

Selección de los amortiguadores

El material que se selecciona como elemento viscoso de amortiguación es caucho de Neopreno, un material esponjoso con adecuadas características mecánicas y disponibles en el mercado, en la Tabla 12 se detallan algunas de sus características.

Tabla 12*Características caucho neopreno*

Caucho de neopreno y EPDM		
Características	Valor	Método de prueba
Densidad	0.128 g/cm ³	ASTM D1056
Resistencia a la tensión	689.5 kPa	ASTM D412
Resistencia a la Elongación	150%	ASTM D412
Deformación permanente	25%	ASTM D1056
Deflexión por compresión	13.8-34.4 kPa	ASTM D1056
Rango de temperatura	-10 – 120 C	
Dimensiones superficie	5X2.5 cm	
Color	Negro	

Nota: Tomado (Gtindustrias)

En la Figura 38 se puede apreciar el material seleccionado como amortiguador.

Figura 38*Neopreno***Selección de motor**

Para poder realizar la adecuada selección del motor es necesario conocer todos los parámetros que intervienen en dicha selección. Los datos más representativos para la selección del motor son torque, velocidad y potencia.

El valor del torque se dará según el cálculo que se realice para la generación de movimiento según la masa total del sistema.

La velocidad será dimensionada según la frecuencia del sismo y el desplazamiento de la mesa.

La potencia viene ligada directamente al torque requerido y la velocidad de desplazamiento de la mesa.

Selección del motor reductor

Tomando en cuenta que se ha realizado ya el dimensionamiento y selección de materiales para la mesa y componentes móviles, se puede realizar el debido cálculo para la obtención del motor.

Se diseña con los siguientes requerimientos utilizando la Ecuación 14.

- Carga: 3.8 Kg peso que soporta
- Diámetro: 1.2 cm
- Velocidad deseada: 12cm/s (amplitud de velocidad de una mesa sísmica promedio)
(Universidad de Alicante)
- Cantidad de motores: 1

$$\mathbf{Torque = Fuerza \times distancia} \qquad \mathbf{Ecuación 14}$$

$$Torque = 3.8kg \times 0.6cm$$

$$Torque = 2.28 \text{ kg} * cm$$

Calculamos lo que recorre un engrane en una vuelta usando la Ecuación 15:

$$\mathbf{Perímetro = 2 * \mu * radio} \qquad \mathbf{Ecuación 15}$$

$$Perímetro = 2 * \pi * 0.6cm = 3.77cm$$

El perímetro es igual a la distancia que recorre un engrane al dar una vuelta, la velocidad la podemos hallar con la Ecuación 16.

$$\mathbf{Velocidad = Espacio/tiempo} \qquad \mathbf{Ecuación 16}$$

En motores tenemos la velocidad dada en RPM y la velocidad mínima es de 12cm/s, por tanto convertimos esta velocidad a RPM (revoluciones por minuto), la velocidad en minutos que da 360cm/min, la dividimos para lo que debemos recorrer.

$$\frac{720cm}{3.77cm} = 190.98$$

Por lo tanto requerimos dar 191 vueltas por minuto.

Tenemos Torque constante de 2.28kg y Velocidad de 95.50RPM, los motores que tienen estas características se encuentran en la Tabla 13.

Tabla 13

Matriz de selección para el motor

	SKU: 5-02-62	GBL35-BG-17120	GB3730	
Voltaje	12	12	24	
RPM	540	230	330	
Reducción	19:1	30:1	30:1	
Torque	1.5kg cm	4 kg cm	2.5kg cm	
Costo	USD 25	USD 35	USD 40	
Ponderación				
	SKU: 5-02-62	GBL35-BG-17120	GB3730	
Voltaje		3	3	1
RPM		1	3	2
Reducción		1	3	3
Torque		1	3	3
Costo		3	2	1

Descartamos un motor 19:1 porque el torque continuo es de 1.5kg*cm dejando como opción el motor 30:1 con 230RPM GBL35-BG-17120 y torque continuo cercano a 4kg*cm.

Cálculo de la potencia

Calculamos la potencia del motor con la Ecuación 17 (Castillo, Rojas, & Martínez, 2017).

$$P = T * \omega = \frac{T * n}{\frac{60}{2\pi}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

P : Potencia del motor (W)

T : Torque (Nm)

ω : Velocidad angular del eje (rad/s)

n : Revoluciones por minuto

$$T = 4kg * cm$$

$$T = 0.04kg * m$$

$$T = 0.04kgm * 9.8 * m/s^2$$

$$T = 0.3924Nm$$

$$P = \frac{0.3924 * 230}{\frac{60}{2\pi}}$$

$$P = 9.45W$$

La potencia hallada es la que tiene la caja reductora, a la cual se debe adicional la potencia del motor sin reducción.

$$P = V * I \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde

V : es el voltaje de entrada =24 [V]

I : es la corriente del motor= 2 [A]

Se obtiene una potencia del motor

$$P_m = 24 * 2$$

$$P_m = 48 [W]$$

La potencia total es de

$$P_T = P_m + P \quad \text{Ecuación 19}$$

$$P_T = 48 + 9.45$$

$$P_T = 57.45 [W]$$

Selección de mecanismo para transmisión de movimiento

En la mecánica, la transmisión de movimiento se da por varios tipos de mecanismos dependiendo las necesidades y las características del sistema de movimiento desarrollado.

En el presente caso se debe tomar en cuenta que el movimiento rotatorio generado por el elemento motriz, que es el motor que se ha seleccionado, debe transformarse en un movimiento netamente lineal puesto que la mesa de aluminio tendrá su desplazamiento sobre el eje X del plano cartesiano, es decir que la transmisión del movimiento requerirá de un elemento que convierta movimiento circular a lineal.

Dentro de los mecanismos más utilizados para este tipo de necesidades son:

- Engranajes
- Transmisión por cadena
- Transmisión por correa
- Ruedas de fricción

Es necesario identificar las ventajas y desventajas de cada sistema previo al dimensionamiento del mecanismo definitivo a utilizarse.

En la Tabla 14 se observan detalles importantes de cada sistema previo a la selección del definitivo:

Tabla 14

Características de los diferentes mecanismos

	Engranajes piñón cremallera	Transmisión por cadena	Transmisión por correa	Ruedas de fricción
Velocidad	1	2	3	2
Resistencia	2	3	2	1
Exactitud	3	2	3	1
Repetibilidad	3	2	2	1
Ruido	1	1	3	2
Lubricación	1	1	3	3
Costo	1	1	3	2

Nota. *Un sistema de correa dentada ofrece características de exactitud en su posicionamiento si es únicamente correa no tendrá los mismos resultados requeridos.

Analizando la Tabla 14 podemos deducir que un mecanismo de correa ofrece en primer lugar la posibilidad de transmitir velocidades altas siendo el más adecuado para las necesidades del prototipo. En función a la velocidad el mecanismo más adecuado.

Si se analiza el tema resistencia, los materiales son un factor fundamental dentro de las características de los mecanismos, en este caso la transmisión por cadena muestra características de resistencia superiores a sus competidores.

En temas de exactitud se concluye que los elementos dentados ofrecen un menor porcentaje de error en sistemas móviles, esto es debido a que el movimiento transferido es

totalmente sincronizado entre los ejes conductores y conducidos por lo que da un mínimo espacio a movimientos inesperados o tolerancias excesivas.

Dentro de la repetibilidad, de igual manera va ligado al concepto anterior si los movimientos son definidos y sincronizados no hay espacio para errores muy notorios dentro de los elementos dentados usando correa dentada.

El ruido en los sistemas mecánicos viene ligado de igual manera al material, en el caso de utilizar materiales sintéticos, cauchos o polímeros existe mejor absorción de choques, golpes y rozamientos. De tal manera que un mecanismo de correa nos dará los mejores resultados en función al ruido que se puede generar.

En función a los costos influyen directamente factores como materiales a utilizar, cantidad, vida útil y complejidad de manufactura, es por esto que los mecanismos de correa son los más accesibles económicamente.

Después del análisis realizado se toma en cuenta que el mejor mecanismo para el sistema a implementar es el de correas en particular los de correa dentada en donde se ha enfocado el presente análisis, con este tipo de mecanismo se obtendrán los mejores resultados y se optimizarán materiales al igual que recursos económicos.

Dimensionamiento de mecanismo de correa dentada

Distancia

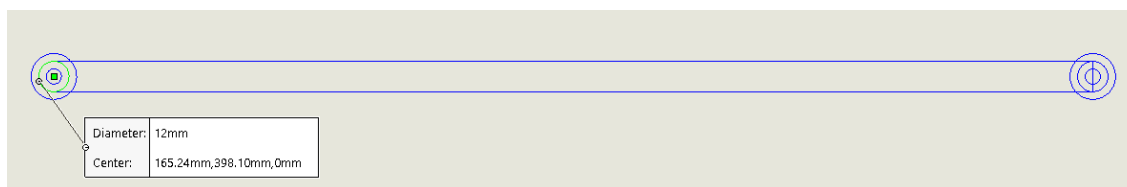
En función a la distancia se ha tomado en cuenta la carrera total de recorrido de la mesa la misma que es 320 mm, se ha establecido como el desplazamiento máximo entre ejes, adicionalmente existe un rango de seguridad de 90 mm, para evitar colisiones contra los ejes. A

partir de estos datos se establece que la distancia total entre los ejes motor y conductor de la banda deben ser 410 mm.

Para obtener la longitud total de la banda es necesario considerar la longitud entre los ejes motor y conductor de igual manera el perímetro de los ejes tomando en cuenta los siguientes esquemas que se pueden apreciar en las Figuras 39 y 40:

Figura 39

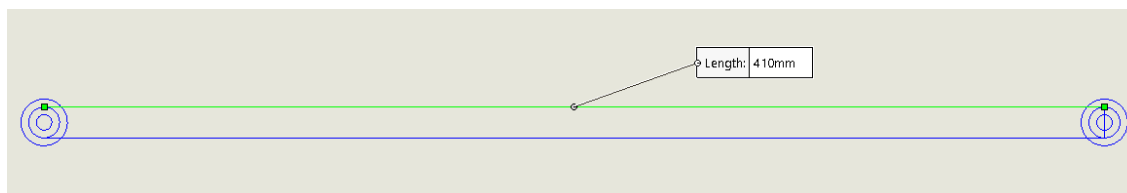
Diámetro del rodamiento



Nota: El diámetro del rodamiento es de 12 mm, creación propia.

Figura 40

Longitud de la banda



Nota: La longitud de la banda es 410 mm, creación propia.

Como se observa en los esquemas anteriores la distancia total de la correa necesaria, viene dada por la suma de dos distancias entre ejes más dos semicircunferencias que corresponden a los ejes, es decir:

$$L_t = (2 * L_c) + 2 * \frac{(2 * \pi * r)}{2} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$L_t = (2 * L_c) + (2 * \pi * r)$$

Donde:

L_t : Es la longitud total de la banda

L_c : Es la longitud entre ejes

r : Es el radio de los ejes

Reemplazando los datos en la Ecuación 20 se obtiene:

$$L_t = (2 * 410) + (2 * \pi * 3)$$

$$L_t = 838.85mm \approx 839mm$$

En total se utilizará una banda de 839mm que será conectada con un acople en el centro para unir la banda al carro de desplazamiento.

Cálculo de correas y poleas dentadas

Para optimizar el movimiento y desplazamiento de la mesa se decidió utilizar poleas dentadas puesto que se evita un desgaste excesivo a altas velocidades y se optimiza el recurso en mantenimiento y lubricación. Con los siguientes datos se procede a calcular las correas y poleas.

- Potencia: 9.45 W
- Velocidad: 230 r/min
- Trabajo: 8 horas /día
- Distancia entre centros aproximada= 400 mm

En primer lugar se debe conocer el factor de servicio por lo que se utilizan las tablas del catálogo de SKF que se observan en la Figura 41 y 42.

Figura 41

Factores de servicio para selección de la potencia de diseño

Table 1	Table 2	
Speed increase ratio	Types of prime mover	
For speed increasing drives of	Soft starts Electric motors:	Heavy starts Electric motors:
Speed ratio 1,00–1,24 multiply service factor by 1,00	AC – Star delta start	AC – Direct-on-line start
Speed ratio 1,25–1,74 multiply service factor by 1,05	DC – Shunt wound	DC – Series and compound wound
Speed ratio 1,75–2,49 multiply service factor by 1,11	Internal combustion engines with 4 or more cylinders	Internal combustion engines with less than 4 cylinders.
Speed ratio 2,50–3,49 multiply service factor by 1,18	Prime movers fitted with centrifugal clutches, dry or fluid couplings or electronic soft start devices	Prime movers not fitted with soft start devices
Speed ratio 3,50 and over multiply service factor by 1,25		

Nota: Tomado de (SKF, 2008).

Figura 42

Factores de servicio para selección de la potencia de diseño

Types of driven machinery		Soft starts			Heavy starts		
		Duty time h/day 10 and under	Over 10 to 16	Over 16	Duty time h/day 10 and under	Over 10 to 16	Over 16
Class 1 Light duty	Blowers, exhausters and fans (up to 7,5 kW), centrifugal compressors and pumps. Belt conveyors (uniformly loaded).	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9
Class 2 Medium duty	Agitators (uniform density), blowers, exhausters and fans (over 7,5 kW). Rotary compressors and pumps (other than centrifugal). Belt conveyors (not uniformly loaded), generators and excitors, laundry machinery, lineshafts, machine tools, printing machinery, sawmill and woodworking machinery, screens (rotary).	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0
Class 3 Heavy duty	Agitators and mixers (variable density), brick machinery, bucket elevators, compressors and pumps (reciprocating), conveyors (heavy duty). Hoists, mills (hammer), pulverisers, punches, presses, shears, quarry plant, rubber machinery, screens (vibrating), textile machinery.	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
Class 4 Extra heavy duty	Crushers (gyratory-jaw roll), mills (ball-rod-tube).	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,5

Nota: Tomado de (SKF, 2008).

Ya que la aplicación es de carga liviana, con arranque fuerte y su trabajo está enfocado para menos de 10 horas al día se selecciona:

$$C_2 = 1.7$$

A continuación se calcula la potencia de diseño para lo cual se utiliza la Ecuación 21 :

$$P_d = P_r C_2$$

Ecuación 21 (SKF, 2008)

En donde:

P_d : es la potencia de diseño

P_r : es la potencia del motor

C_2 : es el factor de servicio

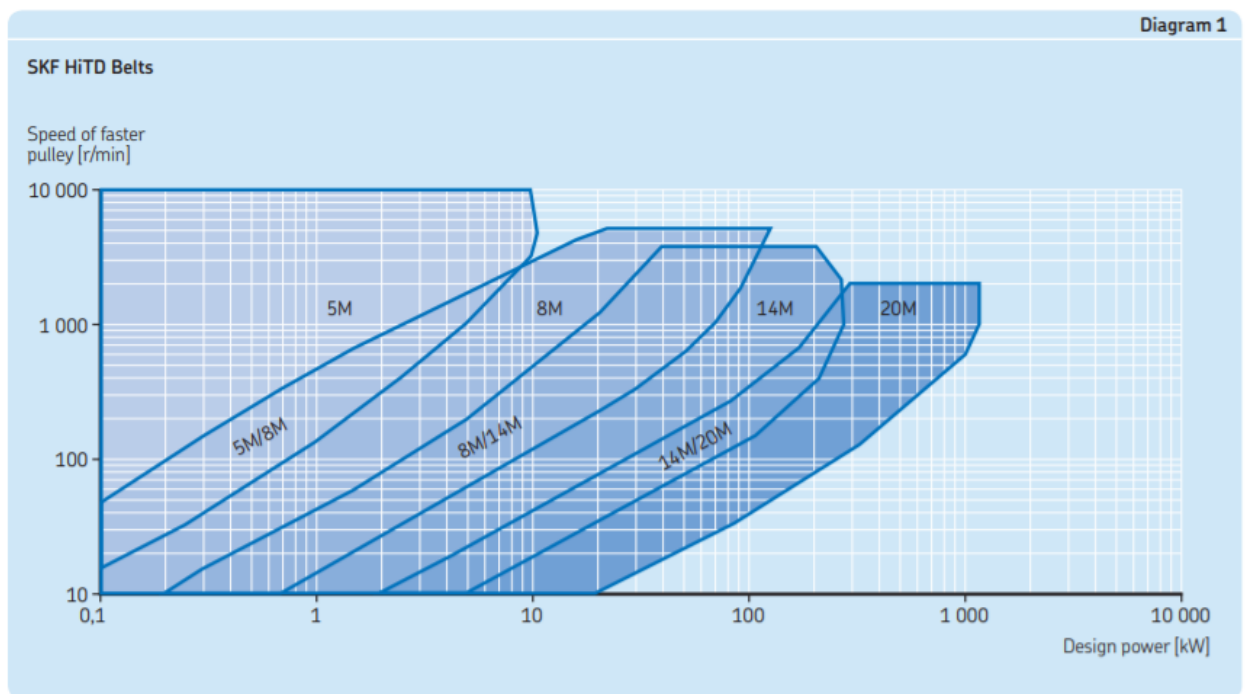
$$P_d = 9.45 \text{ W} \times 1.7 = 16.07 \text{ W}$$

En este caso no existirá reducción de las poleas por lo que el coeficiente de velocidad es igual a 1.

Para conocer la sección transversal de la correa es necesario utilizar los diagramas del catálogo de SKF que se observan en las Figuras 43 y 44:

Figura 43

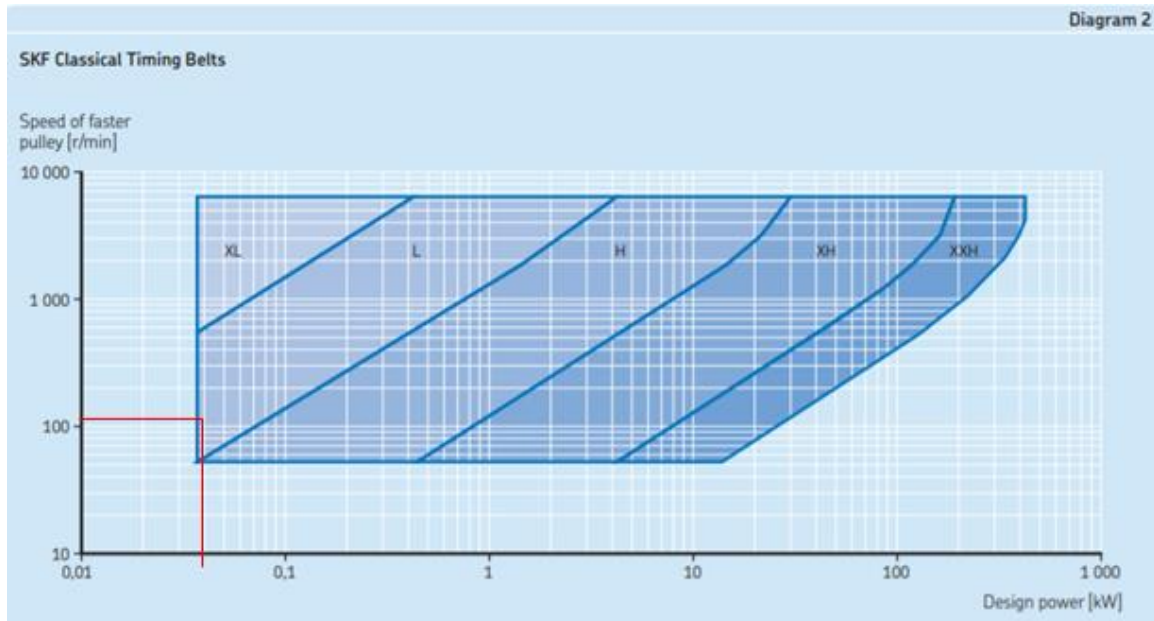
Selección de la sección de la correa



Nota: Tomado de (SKF, 2008).

Figura 44

Selección de la sección de la correa



Nota: Tomado de (SKF, 2008).

Mediante el diagrama 2 se obtiene que según la velocidad y la potencia de diseño se requiere una correa tipo L clásica síncrona.

A continuación se determina el diámetro de la polea y el número de dientes:

A través de la tabla que se observa en la Figura 45 se obtiene el número recomendado de dientes para polea pequeña.

Figura 45

Selección de número de dientes

Z_1	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
10	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	
11		1,00	1,09	1,18	1,27	1,36	1,45	1,55	1,64	1,73	1,82	1,91	2,00	2,09	2,18	
12			1,00	1,08	1,17	1,25	1,33	1,42	1,50	1,58	1,67	1,75	1,83	1,92	2,00	
13				1,00	1,08	1,15	1,23	1,31	1,38	1,46	1,54	1,62	1,69	1,77	1,85	
14					1,00	1,07	1,14	1,21	1,29	1,36	1,43	1,50	1,57	1,64	1,71	
15						1,00	1,07	1,13	1,20	1,27	1,33	1,40	1,47	1,53	1,60	
16							1,00	1,06	1,13	1,19	1,25	1,31	1,38	1,44	1,50	
17								1,00	1,06	1,12	1,18	1,24	1,29	1,35	1,41	
18									1,00	1,06	1,11	1,17	1,22	1,28	1,33	
19										1,00	1,05	1,11	1,16	1,21	1,26	
20											1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	
21												1,00	1,05	1,10	1,14	
22													1,00	1,05	1,09	
23														1,00	1,04	
24															1,00	
25																1,00

Nota: Tomado de (SKF, 2008).

Para poleas pequeñas y con el coeficiente de velocidad igual a 1 es factible utilizar un número de dientes igual a 20 bajo la recomendación de utilizar valores comerciales.

$$Z_s = 20$$

Seleccionamos el paso de las tablas comerciales:

$$F = 2.5mm$$

Y tenemos:

$$d = \frac{Z_s * F}{\pi} = \frac{20 * 2.5}{\pi} = 15.91mm$$

Donde:

d: Diámetro de paso

F: es el paso de los dientes de la correa

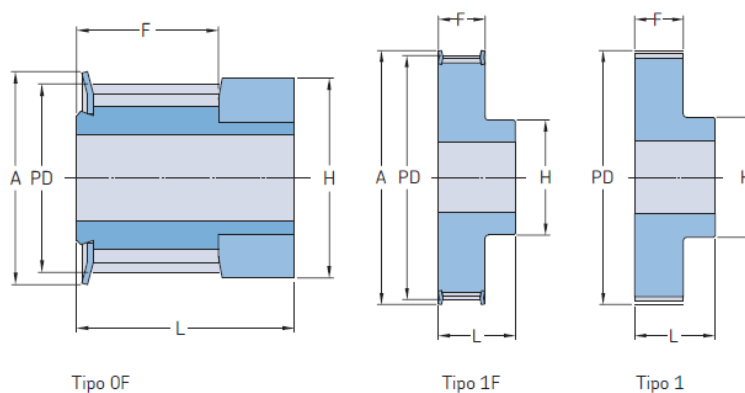
Con los datos obtenidos de número de dientes y el paso podemos seleccionar también la polea dentada del mismo catálogo de SKF.

Figura 46

Selección de la polea dentada en función de los dientes y paso

Poleas síncronas métricas

Mecanizado para agujero en bruto (RSB) 2,5 mm tipo T



Paso	Ancho de la correa	Diámetro primitivo PD	Número de dientes	Tipo de polea	Dimensiones Diámetro exterior OD	B		H	F	L	Peso	Designación	
						Mín.	Máx.						
–	mm	–	–	–	mm	–	–	–	–	–	kg	–	
2,5	4 y 6	7,96	10	OF	7,45	10	–	3	10	10	16	0,001	PHP 16-T2.5-10RSB
		8,75	11	OF	8,25	12	–	3	11	10	16	0,002	PHP 16-T2.5-11RSB
		9,54	12	OF	9,00	13	–	4	13	10	16	0,003	PHP 16-T2.5-12RSB
		10,35	13	OF	9,95	14	–	4	14	10	16	0,004	PHP 16-T2.5-13RSB
		11,14	14	OF	10,60	15	–	5	15	10	16	0,004	PHP 16-T2.5-14RSB
		11,94	15	OF	11,40	15	–	6	15	10	16	0,010	PHP 16-T2.5-15RSB
		12,73	16	OF	12,20	16	–	7	16	10	16	0,005	PHP 16-T2.5-16RSB
		13,53	17	OF	13,00	17	4	7	16	10	16	0,006	PHP 16-T2.5-17RSB
		14,32	18	1F	13,80	18	4	7	10	10	16	0,006	PHP 16-T2.5-18RSB
		15,12	19	1F	14,60	18	4	7	10	10	16	0,007	PHP 16-T2.5-19RSB
		15,92	20	1F	15,40	20	4	7	11	10	16	0,008	PHP 16-T2.5-20RSB
		16,71	21	1F	16,20	20	4	7	11	10	16	0,009	PHP 16-T2.5-21RSB
		17,51	22	1F	17,00	23	4	7	10	10	16	0,009	PHP 16-T2.5-22RSB
		18,30	23	1F	17,80	23	4	8	12	10	16	0,010	PHP 16-T2.5-23RSB
		19,10	24	1F	18,55	23	4	8	12	10	16	0,012	PHP 16-T2.5-24RSB

De la Figura 46 obtenemos la polea acorde a la selección tomando en cuenta el:

Paso = 2.5

Número de dientes = 20

Diámetro exterior = 15.40 mm

La misma tabla nos da el valor del ancho de la correa que en nuestro caso será 6 mm.

Selección de Controlador lógico programable

Para esta selección se enfocó en las características principales que se requieren para el sistema, es decir que las salidas digitales del equipo manejen PWM, se tenga la posibilidad de utilizar salidas lógicas TTL, tiempo de respuesta elevado y posibilidad de manejar comunicaciones sea con interfaz RS232 y RS485.

Tabla 15

Matriz de selección para el controlador

Matriz de selección para equipo de control			
Características			
	PLC Siemens S7-1200	ARDUINO UNO	PLC Panasonic
Lenguaje de programación	Ladder Texto estructurado Diagrama de bloques de función	Texto estructurado Diagrama de bloques de función	Ladder Texto estructurado Diagrama de bloques de función Lista de instrucciones Gráfico de funciones secuenciales
Número de entradas y salidas	Entradas y salidas 14 DI 10 DO 2AI	Entradas y salidas: 14 pines digitales (6 PWM) y 6 pines analógicos.	8 entradas digitales 8 salidas transistorizadas NPN
Flexibilidad de entradas y salidas	Rango abierto de 5 a 24VDC en funcionamiento de entradas y salidas	Limitadas a 5VDC con Entradas y salidas analógicas	Rango abierto de 5 a 24VDC en funcionamiento de entradas y salidas
Memoria de programación	EEPROM 1MB	EEPROM 1 KB	EEPROM 4 MB
Capacidad de programación	65000 pasos	8000 pasos	16000 pasos
Velocidad de operación	Instrucciones básicas: 0.08us Instrucciones temporizadas: 2.3us Instrucciones avanzadas: 1.7us	La velocidad del reloj: 16 MHz	Instrucciones básicas: 0.08us Instrucciones temporizadas: 2.2us Instrucciones avanzadas: 0.32us

	PLC Siemens S7-1200	ARDUINO UNO	PLC Panasonic
Contador de alta velocidad	6 contadores de alta velocidad hasta 80KHz	No	Una fase: seis puntos (máximo 50 kHz cada una) Dos fases: Tres canales (máximo 15 kHz cada canal)
Salidas de PWM	Tren de pulsos hasta 100 Khz en conjunto	Seis canales de 490 Hz	Cuatro puntos (máximo 50 kHz cada uno) Dos canales pueden ser controlados individualmente
Puerto Serial	Puerto Ethernet Comunicación MODBUS TCP Profinet	Un puerto serie RS232	Puerto al controlador Comunicación Modbus RTU Velocidad de transmisión hasta: 115.2 kbps Método de comunicación: Half Duplex Dos puertos RS232
Voltaje nominal 24VDC	24VDC	7-12VDC	24VDC
Corriente de salida	1600mA	40mA	200 mA
Funcionalidad In/Out con 24 VDC	24VDC	5 VDC	5-24VDC
Valor comercial	789	35	180
Ponderación			
	PLC Siemens S7-1200	ARDUINO UNO	PLC Panasonic
Lenguaje de programación	2	1	3
Número de entradas y salidas	3	3	3
Flexibilidad de entradas y salidas	3	2	3

	PLC Siemens S7-1200	ARDUINO UNO	PLC Panasonic
Memoria de programación	3	1	3
Capacidad de programación	3	1	3
Velocidad de operación	3	1	3
Contador de alta velocidad	3	1	3
Salidas de PWM	2	2	3
Puerto Serial	1	1	3
Voltaje nominal 24VDC	3	1	3
Corriente de salida	3	1	3
Funcionalidad In/Out con 24 VDC	3	1	3
Valor comercial	1	3	2

Por su gran posicionamiento en el mercado ecuatoriano al ser un equipo versátil, de grandes prestaciones y con características de optimización tanto de recursos como de espacio se optó por utilizar un PLC AFP0R de la marca PANASONIC.

El equipo posee comunicación MODBUS RTU además de comunicación serial mediante sus puertos RS485 y RS232.

En la Tabla 16 se presentan las principales características del equipo:

Tabla 16*Características del plc afp0r*

Característica	Especificación
Lenguaje de programación	Ladder Texto estructurado Diagrama de bloques de función Lista de instrucciones Gráfico de funciones secuenciales
Número de entradas y salidas	8 entradas digitales 8 salidas transistorizadas NPN
Memoria de programación	EEPROM
Capacidad de programación	16000 pasos
Velocidad de operación	Instrucciones básicas: 0.08us Instrucciones temporizadas: 2.2us Instrucciones avanzadas: 0.32us
Contador de alta velocidad	Una fase: seis puntos (máximo 50 kHz cada una) Dos fases: Tres canales (máximo 15 kHz cada canal)
Salidas de PWM	Cuatro puntos (máximo 50 kHz cada uno) Dos canales pueden ser controlados individualmente
Puerto RS485	Puerto incorporado al controlador Comunicación Modbus RTU Velocidad de transmisión hasta: 115.2 kbps Método de comunicación: Half Duplex
Voltaje nominal	24VDC
Voltaje de salidas	5-24VDC
Corriente de salida	0.2Amp
Voltaje entradas digitales	24VDC

Selección de driver para el motor

Para un control adecuado del movimiento del motor es necesario poder manipular la dirección y la velocidad para el motor.

Un puente H nos presta las facilidades requeridas tomando en cuenta que las características del motor son:

- Voltaje de funcionamiento: 24VDC
- Corriente máxima de funcionamiento: 2.5Amp

Se ha seleccionado un puente H que cumple con las características requeridas y es fácil de controlar mediante una lógica de direccionamiento TTL y un control de velocidad con PWM que simplifica notablemente las tareas de programación.

Tabla 17

Matriz de selección para el driver

Matriz de selección para driver de motor			
	Características		
	L298N	TB6612FNG	BTS7960
Voltaje de Alimentación 5V lógico	5VDC	5.5VDC	5VDC
Límite de Corriente	2 AMP	1.2 AMP	43 AMP
Protección contra sobre-voltaje	Regulador de voltaje	Diodos internos	Apagado térmico
Apagado por caída de voltaje	Si	Si	Si
Circuito de Control con entradas TTL	Apto para control lógico	Apto para control lógico	No apto para control lógico
Compatible con PWM	Entradas para PWM	Entrada para PWM	Entradas para PWM
Voltaje para motor compatible 24VDC	Hasta 35VDC	Hasta 15VDC	Hasta 35VDC
Valor comercial		6	7
			40

	Ponderación		
	L298N	TB6612FNG	BTS7960
Voltaje de Alimentación 5V	3	3	1
Límite de Corriente	3	1	3
Protección contra sobre-voltaje	2	1	3
Apagado por caída de voltaje	2	2	3
Circuito de Control con entradas TTL	3	3	3
Compatible con PWM	3	2	3
Voltaje para motor compatible 24VDC	3	1	3
Valor comercial	3	2	1

Para este requerimiento se ha tomado en consideración un puente H L298N que posee las características descritas previamente según su hoja de datos.

El giro del motor viene dado por la Tabla 18 lógica:

Tabla 18

Tabla lógica para el giro del motor

Sentido del Giro	Configuración 1	Configuración 2
Giro horario	1	0
Giro Anti horario	0	1
Sin movimiento	0	0

Nota: Para el funcionamiento del driver se necesitan 3 entradas que funcionan con 5V por lo cual se tendrá determinado giro dependiendo de la configuración seleccionada.

Diseño electrónico

Dado que dentro del prototipo existen elementos ya desarrollados como en el caso del controlador lógico programable es necesario acoplar dichos sistemas a los demás utilizados para formar un solo conjunto.

Es necesario acoplar las salidas del PLC con las entradas del drive para el motor tomando en cuenta que el funcionamiento de este último es con una tensión de 5VDC y son entradas de tipo PNP.

Dado que el modelo de PLC posee salidas de tipo NPN es fundamental poder acoplar las salidas de este con las entradas del drive a través de un diseño electrónico.

Conversión de señales

Utilizando la versatilidad de los transistores es posible realizar la conversión necesaria de potencial negativo a potencial positivo. Comúnmente este tipo de conversiones se las realiza a través de relés pero debido a que las señales que se utilizarán son de alta frecuencia el mejor camino es el uso de los transistores que no se ven afectados por la frecuencia de conmutación o la cantidad de conmutaciones en el tiempo como los relés.

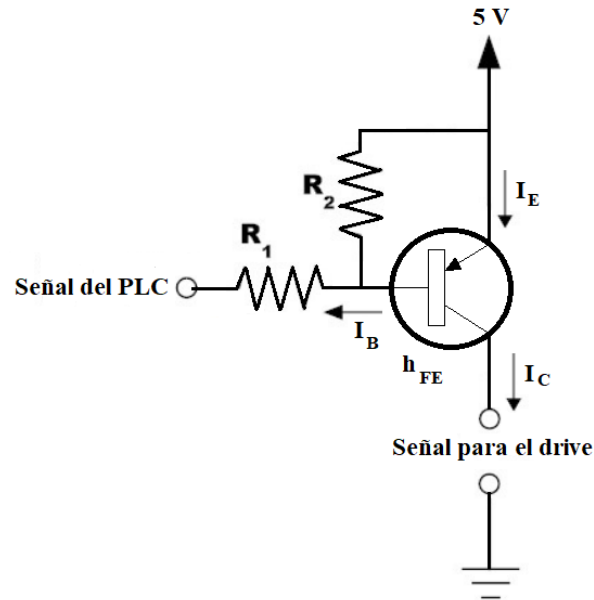
Para dar solución a esta necesidad se utilizará un transistor PNP como conmutador:

El ingreso de la señal proveniente del PLC será por la base del transistor, el voltaje de alimentación se le asigna al emisor y el colector cerrará el circuito a tierra a través de la carga; es decir se cerrará el circuito del transistor con la conexión al drive del motor.

El circuito antes descrito se lo evidencia en la Figura 47 donde se evidencian las corrientes del circuito a razón de la señal de entrada NPN proveniente del PLC.

Figura 47

Conversión de señal pnp a npn



A modo de calcular las corrientes del circuito se utilizan las siguientes Ecuaciones:

$$I_C = I_E - I_B \quad \text{Ecuación 22}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad \text{Ecuación 23}$$

$$I_B = I_C / \beta \quad \text{Ecuación 24}$$

Dado que por hoja técnica del drive L298N la corriente mínima requerida para la detección de una señal de entrada es de 100 mA. Se entiende que la corriente del colector tomará directamente este valor, y de igual manera por la hoja técnica del transistor BC557 $\beta = 90$. Por lo tanto:

$$I_B = 100mA/90$$

$$I_B = 1.11 \text{ mA}$$

Dando:

$$I_E = I_C + I_B \quad \text{Ecuación 25}$$

$$I_E = 100 \text{ mA} + 1.1 \text{ mA}$$

$$I_E = 101.1 \text{ mA}$$

Tomando en cuenta que:

$$I_{R1} = I_{R2} + I_B \quad \text{Ecuación 26}$$

$$V_E - V_{BE} = I_{R2} \cdot R2 \quad \text{Ecuación 27}$$

Reemplazando los valores en las Ecuaciones 24 y 25 obtenemos:

$$I_{R2} = \frac{5 - 0.650}{1000}$$

$$I_{R2} = 4.35 \text{ mA} \quad R2 = 1K\Omega$$

$$I_{R1} = 4.35 \text{ mA} + 1.1 \text{ mA}$$

$$I_{R1} = 5.45 \text{ mA}$$

$$R1 = V_{R1} - V_{PLC} / I_{R1}$$

$$R1 = 3.3K\Omega$$

El circuito fue diseñado para las 8 salidas que dispone el PLC a modo de que a futuro puedan ser utilizadas con otros fines fuera de este prototipo.

En las figuras 48, 49 y 50 se visualizan el diseño del circuito y posterior placa PCB.

Figura 48

Diseño integral de circuito eléctrico de acoplamiento

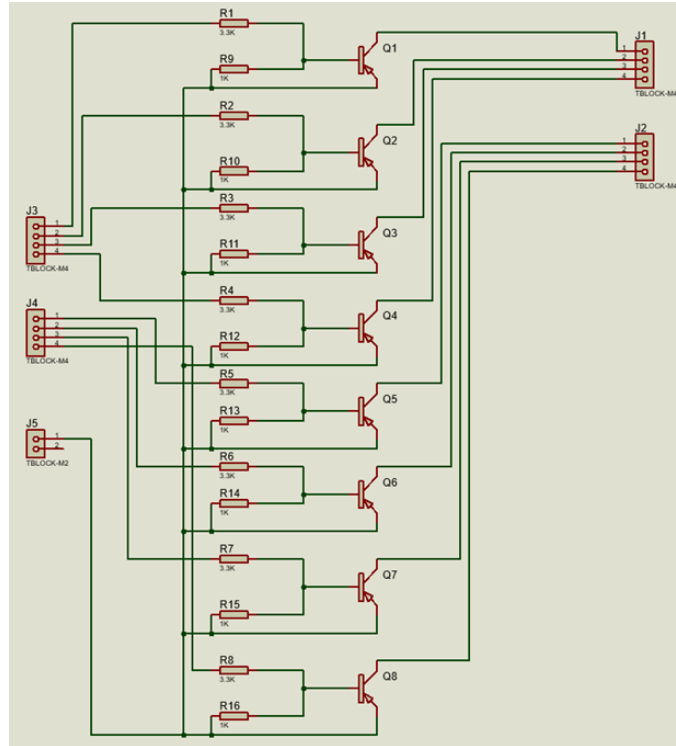


Figura 49

Diseño de pcb en software

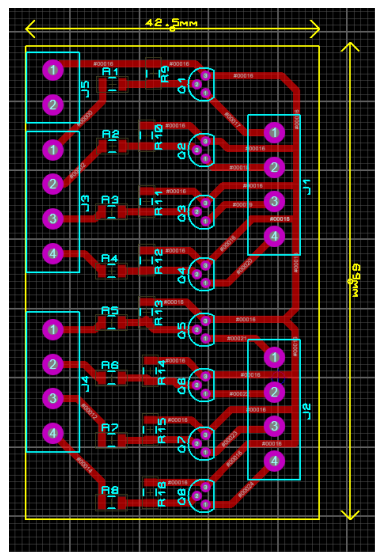
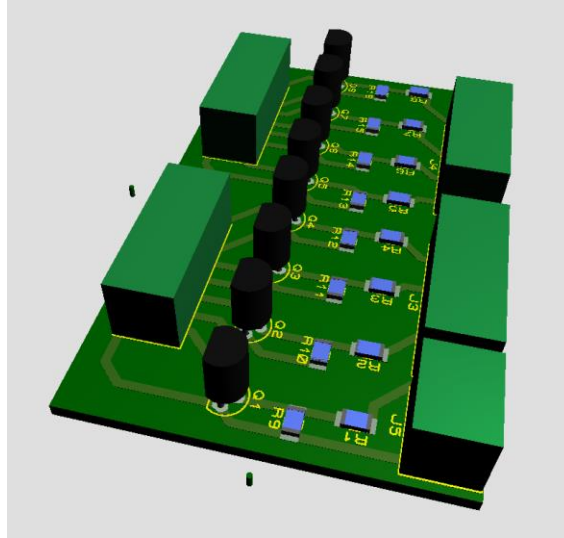


Figura 50*Diseño 3d de pcb en software*

A continuación en las figuras 51 y 52 se puede apreciar la simulación del circuito.

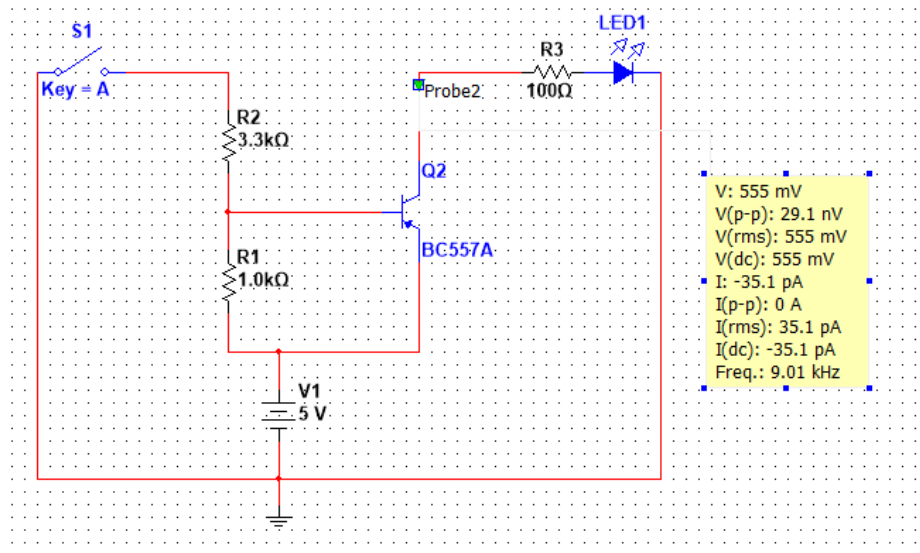
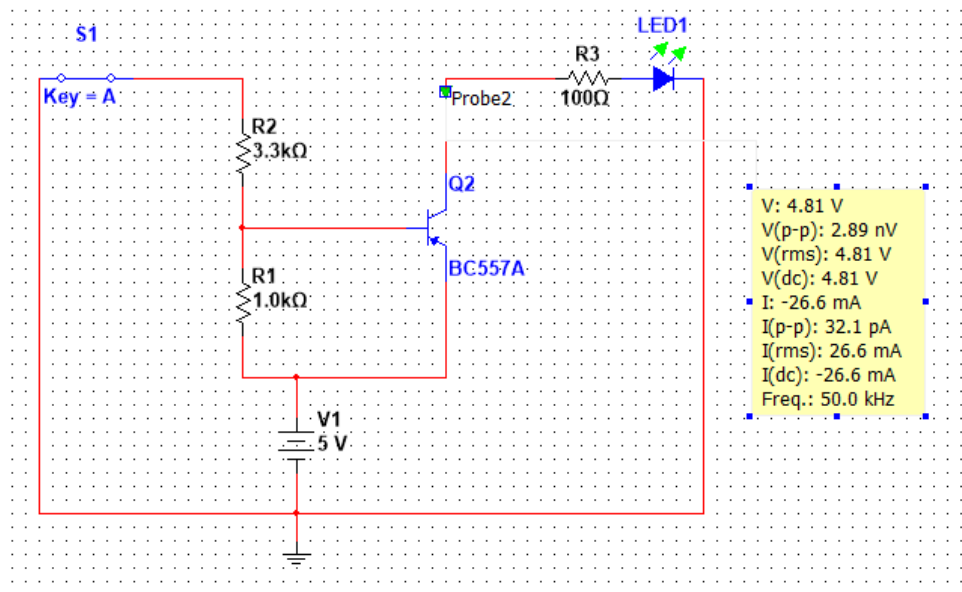
Figura 51*Simulación de circuito de acoplamiento de señal con salida plc en bajo*

Figura 52

Simulación de circuito de acoplamiento de señal con salida plc en alto



Capítulo 4

Una vez diseñado todo el sistema es necesario implementarlo con todos los elementos señalados en conjunto. Con los elementos dimensionados se procede a realizar el armado partiendo desde lo mecánico, lo eléctrico y electrónico y finalmente se desarrollará la programación de las secuencias de funcionamiento.

Construcción de la estructura

Con los diseños y selecciones realizadas de los elementos estructurales y mecánicos se procede al ensamblaje de la estructura y sus elementos motrices.

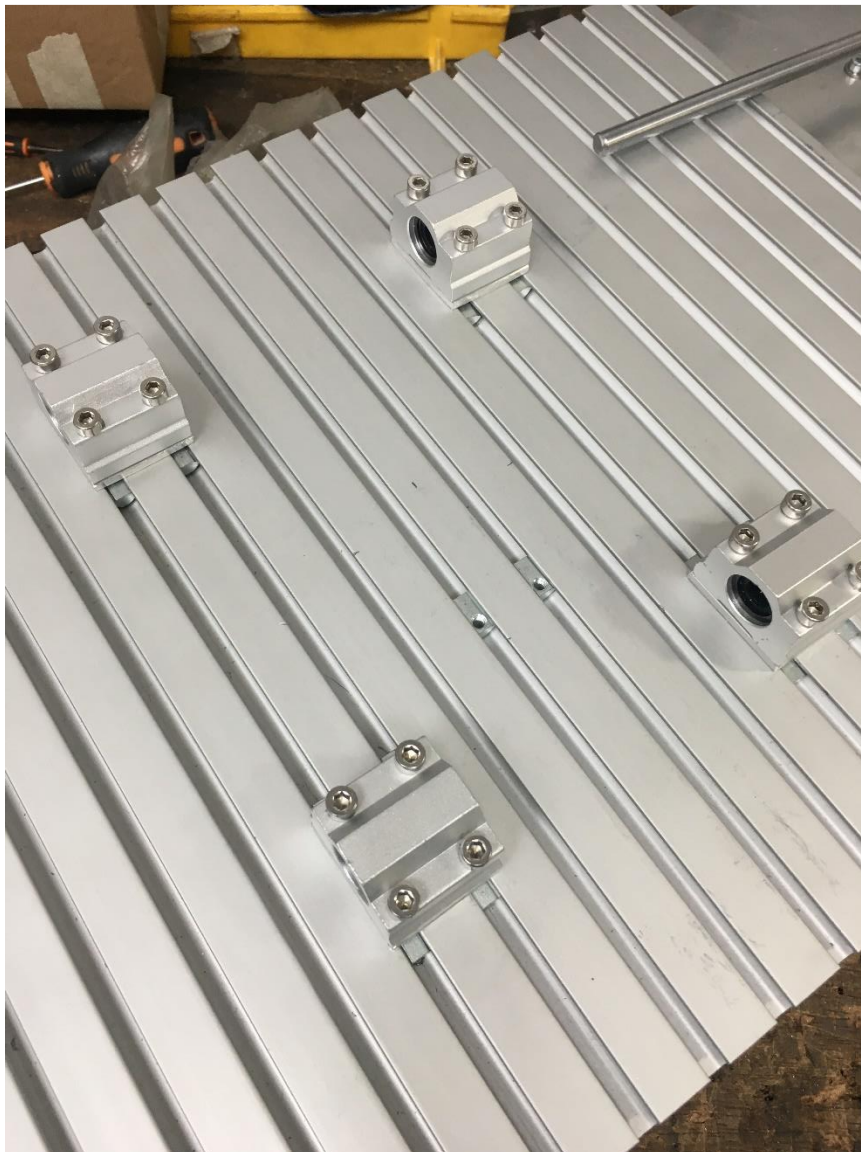
Los planos se encuentran en el ANEXO 1.

Utilizando la placa perfilada es más sencillo el acoplamiento de partes, otorga flexibilidad en el montaje y posibles adecuaciones para las estructuras civiles que se puedan armar sobre ella. Es necesario incluir tuercas de perfil para poder empernar todos los componentes como en el caso de los rodamientos que poseen cuatro pernos por punto en los que se debe fijar para darle seguridad y que tenga una adecuada nivelación.

En la Figura 53 se observa el montaje de los rodamientos a la superficie de aluminio perfilada. Como se mencionó se tiene cuatro pernos por rodamiento y deben ser alineados correctamente para evitar desbalance y exceso de rozamiento por des-alineamiento, esto influiría en un aumento de exigencia excesiva para el motor.

Figura 53

Montaje de cuatro rodamientos en la placa de aluminio perfilado



Una vez montados en la placa y tomando en cuenta que es necesario que las varillas sean fijadas a una superficie sólida, se utiliza una placa de aluminio sólida de un centímetro de espesor en donde se fijan de manera definitiva los soportes estáticos para las varillas, de igual manera es necesario trabajar en la alineación de los mismos para evitar cualquier tipo de

desbalance que perjudique su libre movilidad, deben estar perfectamente alineados con respecto a los rodamientos ya instalados en la placa de aluminio perfilada.

En la Figura 54 se puede ver el montaje de los soportes estáticos a la placa de aluminio.

Figura 54

Alineación y posterior montaje de soportes fijos de placa base con rodamientos de placa perfilada



Una vez terminado el ensamblaje de las bases se trabaja en los elementos motrices o generadores de movimiento. Para poder transmitir el movimiento a partir del motor a la placa perfilada se realiza un acople en L que es fijada en la misma y que tiene su otro extremo fijado a la correa dentada transmisora del movimiento.

En la Figura 55 se observa la preparación del acople en L para ser montado en el perfil de aluminio.

Figura 55

Acople ensamblado a partir de placa de aluminio para transmisión de movimiento



Según el recorrido fijado en el diseño, se abre una ranura en la placa base para permitir la libre movilidad del acople fijado a la placa perfilada de tal manera que el conjunto no sea susceptible a colisiones que perjudiquen la estructura.

La Figura 56 muestra el montaje de la mesa en la placa base.

Figura 56

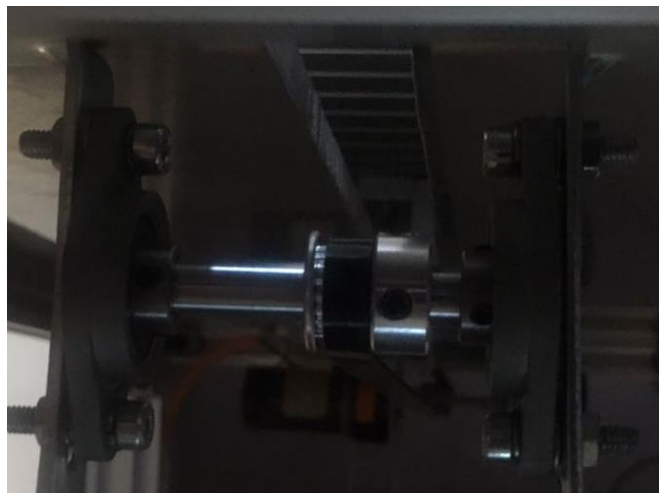
Montaje de la mesa en placa base



En la parte inferior de la placa base se fija el motor con su respectivo acoplamiento y en su contrario dos chumaceras alineadas para soportar el eje que tendrá el engrane extremo para la correa dentada como se observa en la Figura 57.

Figura 57

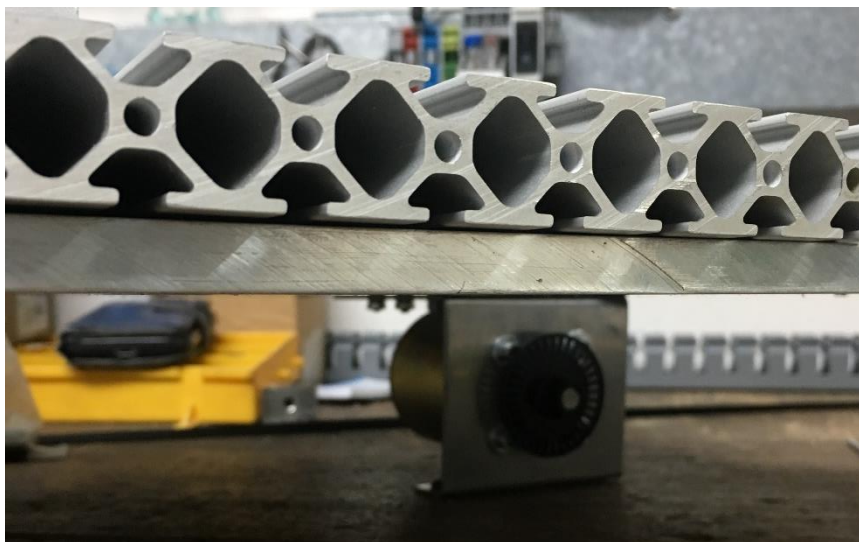
Chumaceras para soporte de eje extremo de correa dentada



En su opuesto como se mencionaba se coloca el motor con su debido acople para una adecuada sujeción como se evidencia en la Figura 58.

Figura 58

Montaje de motor en placa base con engrane para correa dentada



Una vez que los elementos fijos están montados se realizó el acoplamiento de todas las partes incluyendo la alineación de la correa dentada, ya que el engrane del eje con chumaceras es móvil deja una gran libertad para realizar el alineamiento necesario y posteriormente se fijó con un perno prisionero.

En la Figura 59 se observa la banda en el engranaje ya tensada, conjuntamente con todos los elementos ya montados y fijos con las alineaciones respectivas.

Figura 59

Montaje de soporte para barras



Figura 60

Implementación mecánica fue desarrollada en el taller de la empresa ecuainsetec

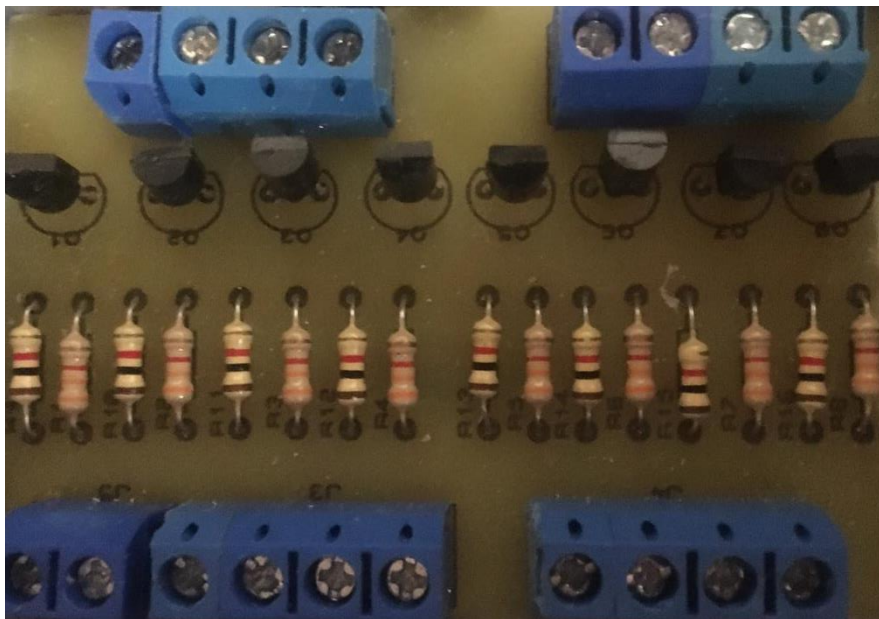


Implementación de circuitos eléctricos

Teniendo en cuenta el circuito diseñado en el capítulo anterior se realizó el armado de la PCB con los elementos señalados y las especificaciones del caso, en la Figura 61 se observa el PCB armado con sus componentes electrónicos.

Figura 61

Pcb de acoplamiento entre plc y drive puente h



Posteriormente se realizaron las conexiones como se indica en los planos eléctricos del prototipo, en las Figuras 62,63 y 64 se puede apreciar del armado eléctrico.

Figura 62

Conexiones principales de plc y alimentación a bornas cage clamp

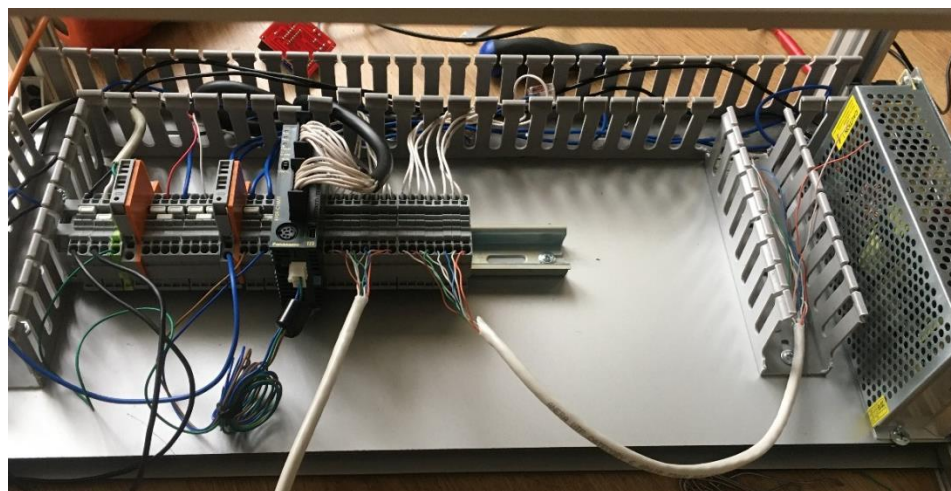
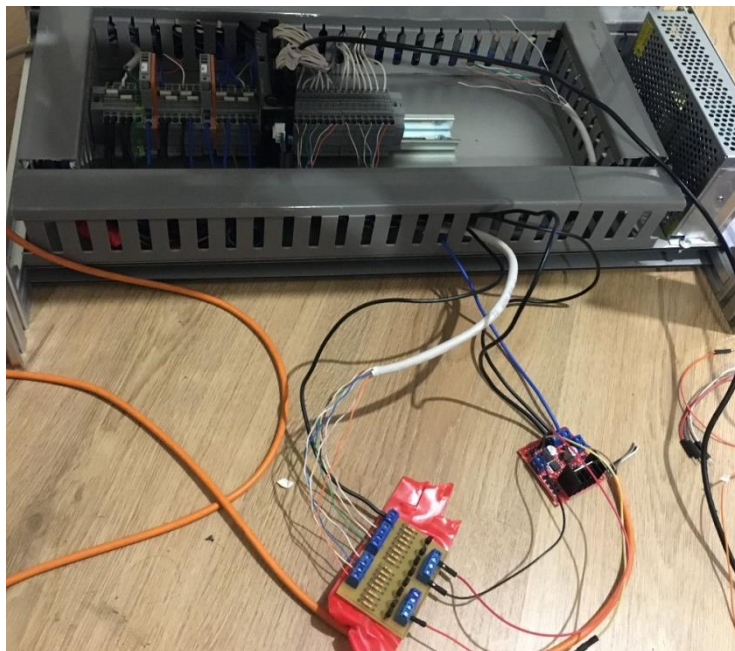
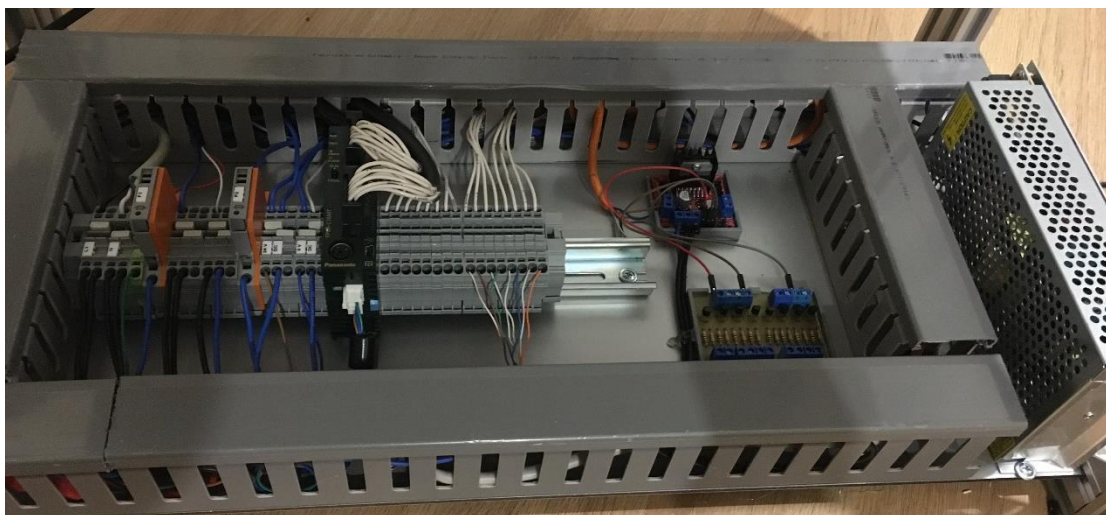


Figura 63

Conexión de pcb de acoplamiento con plc y drive puente h

**Figura 64**

Circuitos eléctricos y de control conexiónados en su totalidad



Implementación de algoritmos de programación

Uno de los motivos por los cuales se seleccionó un PLC para encargarse de la parte de control es la versatilidad y la flexibilidad que ofrece en el momento de realizar secuencias de programación o algoritmos extensos para poder otorgar al prototipo un adecuado control con alta eficiencia y optimización de recursos, es importante para un ingeniero saber utilizar las herramientas que el mercado pone a disposición para poder mejorar eficiencia y optimización de tiempos de trabajo.

De aquí que el PLC que se utiliza ofrece características fundamentales para el prototipo como son:

Conteo rápido de pulsos para tener una lectura de adecuada del encoder que cierra el lazo de control.

- Salidas PWM que permiten modular adecuadamente la velocidad de giro del motor a través de la variación de voltaje fruto de estas salidas.
- Bloques de función para control PID de velocidad y posicionamiento, permiten ingresar los factores de control según se requiera para el debido funcionamiento.
- Facilidad de comunicación para enlaces con entornos de visualización o interfaces usuario máquina, sin que sea una carga adicional para el elemento de control, la comunicación da la facilidad de transmitir señales e información a otros elementos sin sobrecargar memoria de programación o recursos de sistema.
- Considerable reducción de cableado y conexionado auxiliar para periféricas y entornos.

De esta manera se desarrolla la arquitectura de control y los algoritmos de programación.

Programa

La programación del PLC se encuentra en el ANEXO 2

Configuraciones de control de HMI

En la Figura 65 se puede apreciar la pantalla principal con la cual se podrá controlar el prototipo

Figura 65

Pantalla principal hmi



Dentro de la HMI tenemos distintas zonas que se describen a continuación:

Comunicación

La HMI está definida para el enlace de comunicación entre la interfaz computarizada y el PLC, ya que la comunicación utilizada es RS232 es necesario definir el puerto de comunicación serial y la velocidad de transmisión de los datos.

- Puerto: Se define como el puerto de comunicación de enlace entre la PC y el PLC es un campo de escritura por lo que se ingresará el puerto en el formato “COM#” donde # es el número de puerto que se puede verificar en Administrador de dispositivos.
- Velocidad: Se define como la velocidad de enlace de la comunicación entre la PC y el PLC es un campo de escritura por lo que se ingresará la velocidad de comunicación configurada en el PLC que se ha fijado en 9600.
- Conectar: Botón de función que permite enlazar la PC y el PLC con las respectivas configuraciones fijadas anteriormente con un clic en este botón se parametriza el puerto con dichas configuraciones y se establece el enlace.
- Desconectar: Botón de función para cerrar el enlace de comunicación entre la PC y el PLC, con este botón es posible cortar la comunicación en caso de requerirlo.
- Led de comunicación: Es un indicador luminoso del estado de la comunicación, cuando se enlacen los dos equipos se encenderá en verde y cuando se realice una desconexión se fijará en negro.

Control manual

En el control manual se ha establecido ingresar una posición y una velocidad para la mesa.

- **Posición:** Este parámetro está definido en centímetros se ingresará un valor del 0 al 30 que es referente al desplazamiento máximo que puede realizar la mesa.
- **Velocidad:** El parámetro velocidad está definido en RPM, se describe como la velocidad angular que se imprime al motor para el determinado movimiento que se ha preseleccionado.
- **Botón Posición:** El botón cumple la función de enviar el dato de la posición requerida hacia el PLC.
- **Botón Velocidad:** El botón cumple la función de enviar el dato de la velocidad requerida hacia el PLC.
- **Botón referencia:** Al tener un encoder incremental el valor de la posición al iniciar el sistema no está definido por lo que es necesario dar una posición inicial mediante un fin de carrera. Este botón permite que el sistema lleve a la mesa hacia el fin de carrera en donde se establecerá la posición cero.
- **Botón movimiento:** El botón movimiento ejecuta el desplazamiento hacia la posición asignada a la velocidad descrita. Se define como un botón de acción.

Control automático

En el control automático se ha establecido los puntos de desplazamiento de la mesa en una tabla en donde se ubican los puntos de movimiento y la velocidad. De igual manera que en el control manual se ha establecido la posición en cm y la velocidad en RPM.

- **Referencia:** De igual manera que para el caso del control manual es necesario referenciar al sistema por lo que el botón cumplirá la misma función que en el caso anterior.

- Arranque: El botón de arranque envía toda la información depositada en la tabla para que se almacene en las variables buffer del PLC y permite ejecutar el movimiento automático del sismo.
- Paro: El botón paro interrumpe el movimiento para casos de emergencia.
- LED Indicador: Con esta interfaz luminosa se constata el envío de todos los datos de la tabla hacia el PLC.

En el ANEXO 3 podemos contemplar la programación de la HMI.

Implementación de sistema de adquisición de datos para señales de vibración

Dado que la detección de la señal de vibración es un componente aislado, resultante del sistema de movimiento del prototipo, es posible realizar una segregación del mismo; es decir se puede realizar un sistema de adquisición de datos independiente al sistema de control de movimiento.

Uno de los beneficios de la independencia es evitar saturación en un sistema de adquisición veloz.

Otro beneficio es liberar de posibles ruidos que pueden distorsionar a la señal de vibración generando datos erróneos e inexactos que perjudiquen los experimentos.

Finalmente es también un beneficio el tener un sistema modular el cual pueda tener independencia propia y se pueda escalar a futuro para otras ramificaciones en las experimentaciones sísmicas.


De aquí que se opta por utilizar una tarjeta Arduino como una DAC para realizar los muestreos de vibración a través de un acelerómetro que puede ser ubicado según conveniencia en la estructura civil.

Programa Arduino

En la Figura 66 se puede apreciar el programa en Arduino para adquisición de datos del acelerómetro.

Figura 66

Pantalla principal hmi



```

sketch_ago21 | Arduino 1.8.13 (Windows Store 1.8.42.0)
File Edit Sketch Tools Help
sketch_ago21
const int xpin = A0; // eje X del acelerómetro
const int ypin = A1; // eje Y del acelerómetro
const int zpin = A2; // eje Z del acelerómetro

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("EJE_X EJE_Y");
}

void loop(void)
{
  int x = analogRead(xpin); //Leer valor de xpin
  delay(1);
  int y = analogRead(ypin); //Leer valor de ypin
  delay(1);
  int z = analogRead(zpin); //Leer valor de zpin
  delay(1);
  float zero_G = 512.0; //ADC es 0~1023 el cero g igual a salida Vs/2
  float scale = 102.3; //ADXL335330 sensibilidad es 330mv/g
  //330 * 1024/3.3/1000
  float ejex = ((float)x - 331.5)/65*9.8;
  float ejey = ((float)y - 329.5)/68.5*9.8;
  Serial.print(ejex); //Imprimir X en el plotter
  Serial.print(',');
  Serial.print(ejey); //Imprimir Y en el plotter
  Serial.println();
  delay(10); //Muestreo
}

```

Capítulo 5

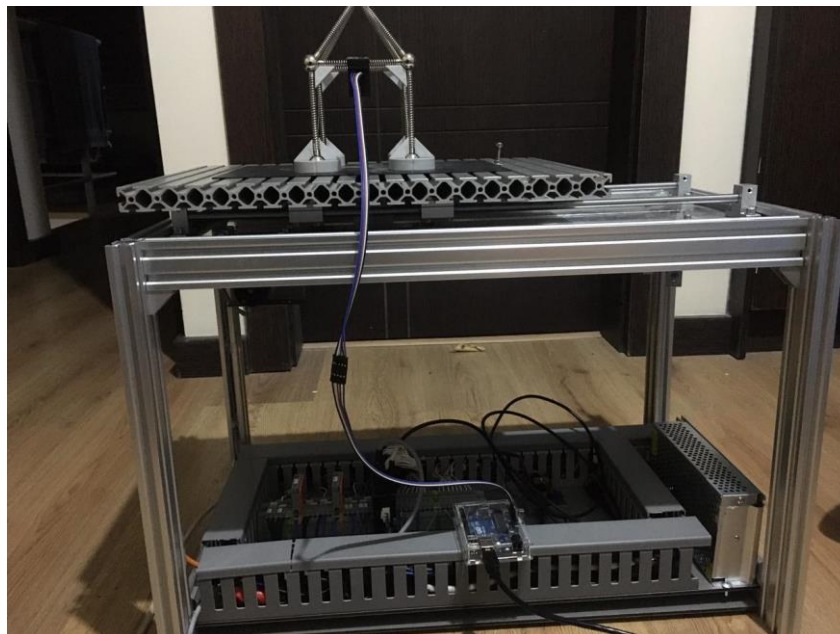
En el presente capítulo se realizará un análisis del sistema en funcionamiento tomando en cuenta los puntos y las velocidades ingresadas con respecto a la vibración producida en el acelerómetro, variables que se tomarán en cuenta en tres variaciones distintas de la estructura civil bajo los mismos parámetros de posición y velocidad.

Se observarán los datos del acelerómetro con estos parámetros y se verificará el porcentaje de inerencia de amplitud y velocidad de desplazamiento en cada estructura.

Análisis de resultados

En función a lo propuesto en el presente trabajo se ha logrado construir un prototipo que logre replicar movimientos oscilatorios similares a sismos para poder realizar un análisis dinámico de conjuntos estructurales de tipo civil.

En primera instancia se ha desarrollado el prototipo con un funcionamiento óptimo según los requerimientos establecidos, de tal manera que genere vibración directa hacia la estructura civil y poder medir sus picos de aceleración mediante un acelerómetro externo. Se presenta a continuación en la Figura 67 el prototipo ensamblado en su totalidad para un completo y eficiente funcionamiento, tanto en su parte mecánica como en la parte electrónica.

Figura 67*Prototipo completo***Resultados obtenidos de pruebas con acelerómetro**

Dado que el presente prototipo es un aporte para el desarrollo cognitivo de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se pudo realizar pruebas fructíferas de simulación de sismos para poder verificar aceleraciones generadas por la vibración de la estructura civil por el movimiento de la mesa.

Se ha detallado tres pruebas que son presentadas a continuación mediante un conjunto de gráficas de aceleración durante la ejecución de un sismo artificial.

Datos para generación de sismo

A continuación se presenta los datos del sismo con la posición a la que se desplaza la mesa y la respectiva velocidad ejercida por el motor. La posición se ha definido en centímetros y la velocidad del motor en revoluciones por minuto.

Tabla 19

Parámetros de posición y velocidad para movimiento de la mesa

Nro	Posición (CM)	Velocidad (RPM)
0	0	0
1	26	230
2	5	230
3	26	230
4	5	230
5	26	230
6	5	230
7	26	230
8	5	230
9	26	230
10	5	230
11	16	120
12	13	120
13	16	120
14	13	120
15	16	120
16	13	120
17	16	120
18	13	120
19	16	120
20	13	120
21	15	70
22	14	70
23	15	70
24	14	70
25	15	70
26	14	46
27	15	46
28	14	46

Nro	Posición (CM)	Velocidad (RPM)
29	15	46
30	5	46

Nota: Creación propia.

Los datos de la Tabla 19 se interpretan con las Figuras 68 y 69.

Figura 68

Detalle del desplazamiento de la mesa

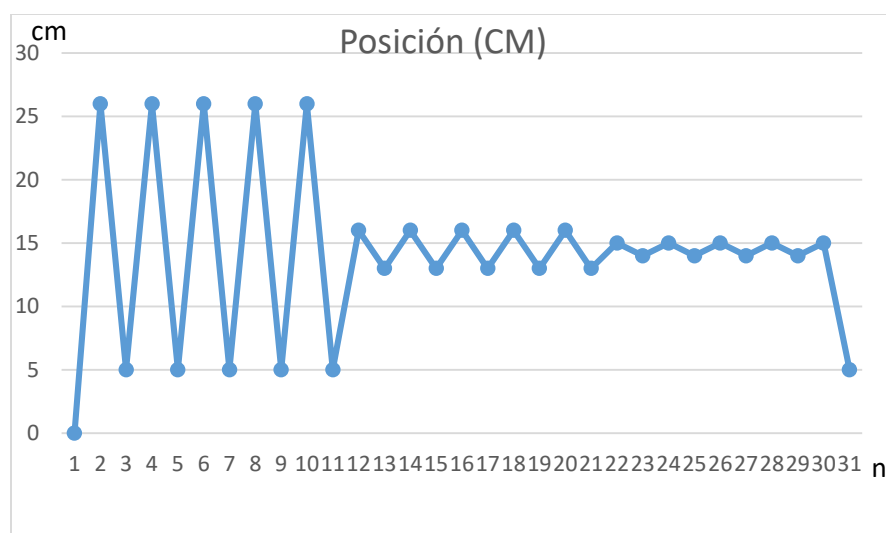
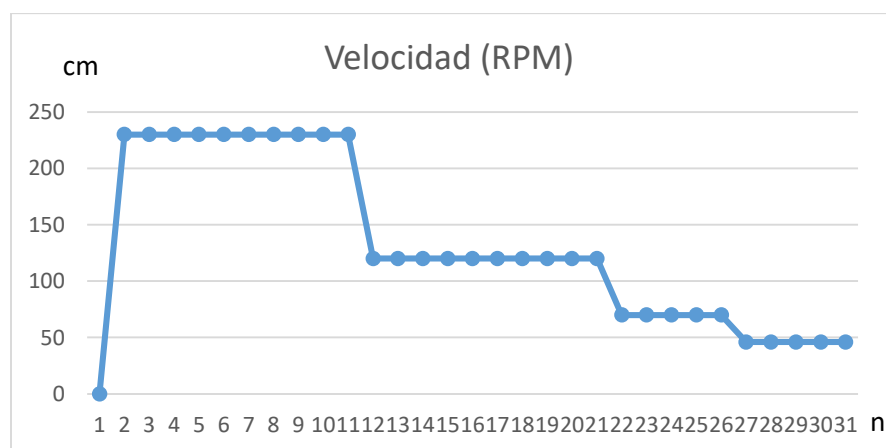


Figura 69

Detalle de la velocidad de la mesa



En la Figura 68 se observa el movimiento realizado por la mesa dentro del espacio definido del prototipo que es de 30 CM.

La velocidad se generó de manera decreciente para observar distintas respuestas según el cambio de velocidad en los desplazamientos realizados.

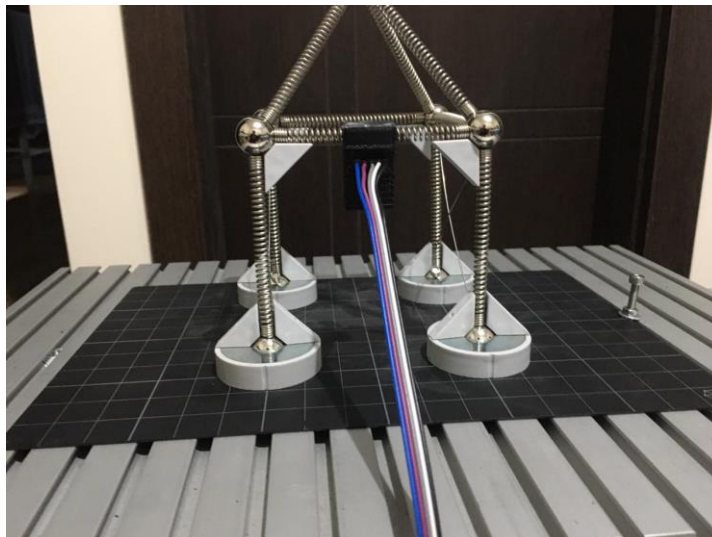
Análisis de datos entregados por acelerómetro

Como se mencionó anteriormente se detallan tres pruebas específicas para evidenciar la respuesta en aceleración de la estructura ante tres condiciones de amortiguamiento.

1 Prueba N 1: Estructura instalada directamente sin desacoplamiento de la estructura como se observa en la Figura 70.

Figura 70

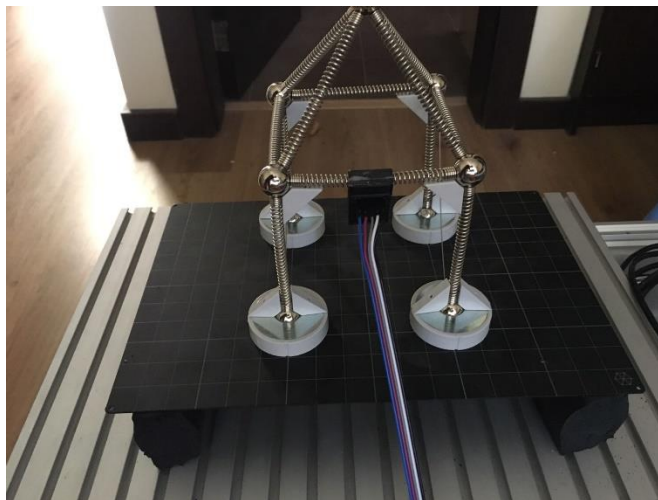
Estructura sin desacoplamiento de la superestructura



2 Prueba N 2: Estructura instalada con dos bloques de neopreno de dimensiones 5x2.5x20 cm como se observa en la Figura 71.

Figura 71

Estructura con barras de neopreno



3 Prueba N 3: Estructura instalada con cuatro elementos de neopreno de dimensiones

5x2.5x2 cm debajo de cimientos de estructura como se ve en le Figura 72.

Figura 72

Estructura con amortiguadores de neopreno en cimentación



Prueba N1

En la Figura 73 se puede observar la respuesta del acelerómetro en los ejes X e Y. En el eje vertical se tiene la aceleración en $[g]$ y en el eje horizontal el tiempo transcurrido en centésimas de minuto.

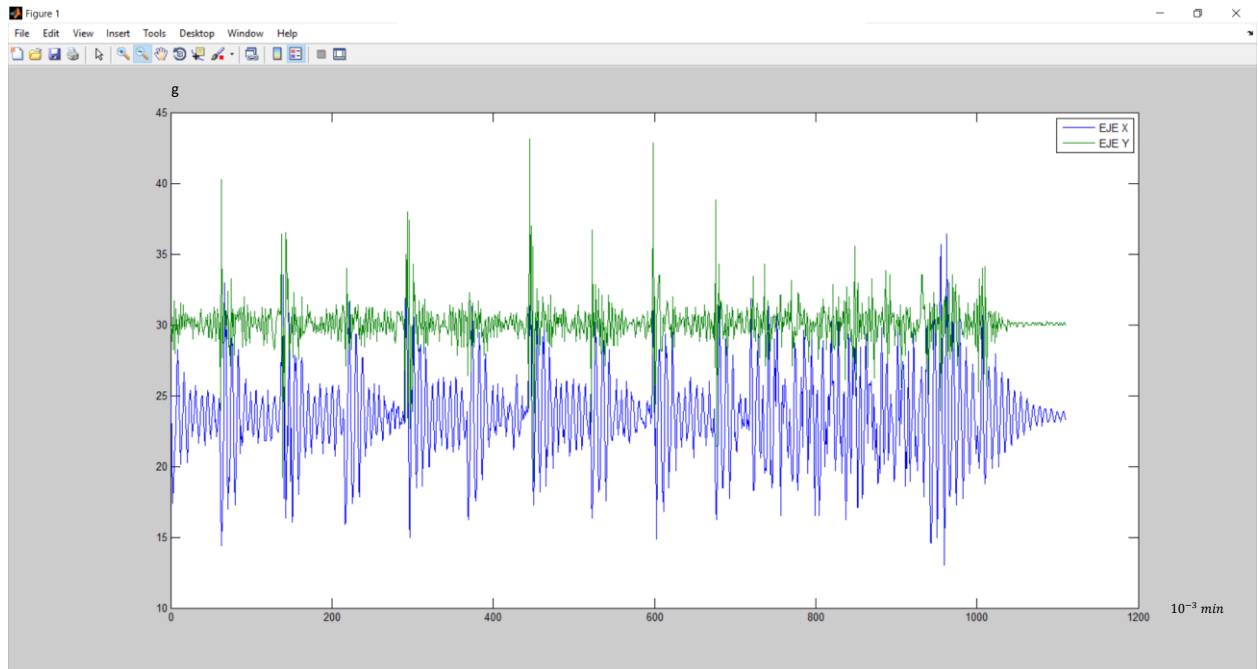
Como se evidencia en la figura en cada cambio de dirección del movimiento de la mesa, genera un movimiento sub-amortiguado.

En el eje X se describe justamente el grado de libertad en el que se enfoca el presente estudio, de la gráfica se puede obtener datos como la amplitud de aceleración que es de:

18.94 $[g]$.

Figura 73

Prueba 1



Prueba N2

En la Figura 74 tal se puede observar la respuesta del acelerómetro en los ejes X e Y. En el eje vertical se tiene la aceleración en $[g]$ y en el eje horizontal el tiempo transcurrido en centésimas de minuto.

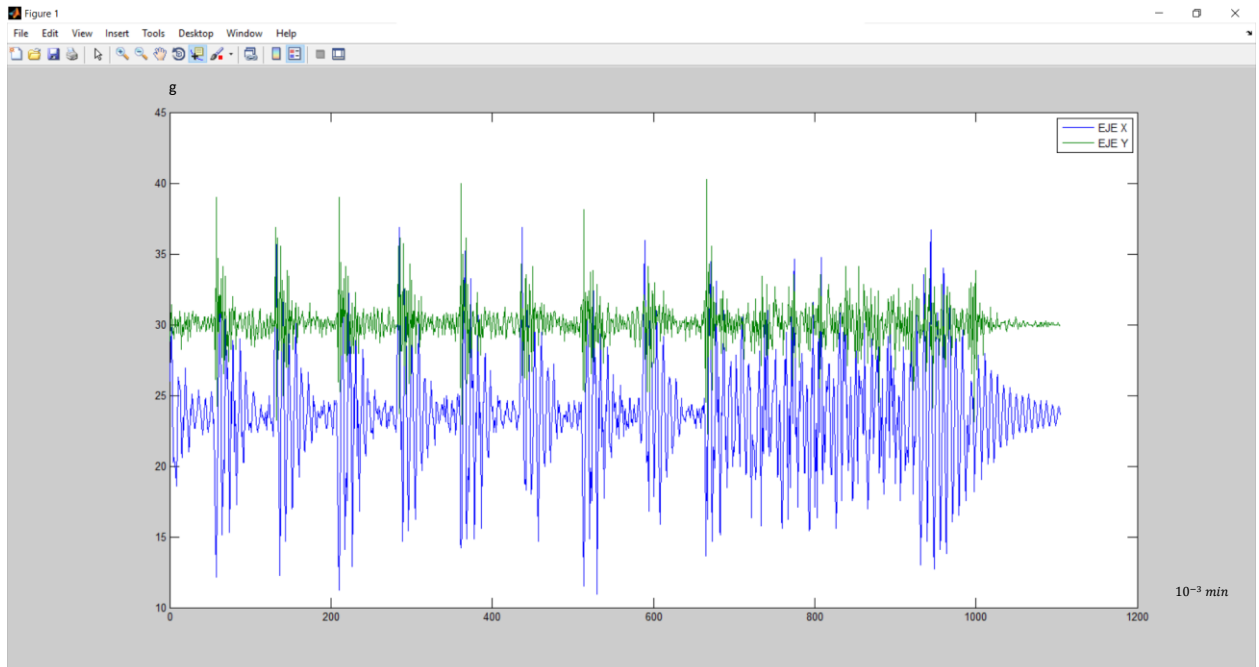
Como se evidencia en la figura en cada cambio de dirección del movimiento de la mesa, genera un movimiento sub-amortiguado.

En el eje X se describe justamente el grado de libertad en el que se enfoca el presente estudio, de la gráfica se puede obtener datos como la amplitud de aceleración que es de:

19.75 $[g]$.

Figura 74

Prueba 2



Prueba N 3

En la figura 75 se observa la gráfica de la respuesta del acelerómetro en los ejes X e Y. En el eje vertical se tiene la aceleración en $[g]$ y en el eje horizontal el tiempo transcurrido en centésimas de minuto.

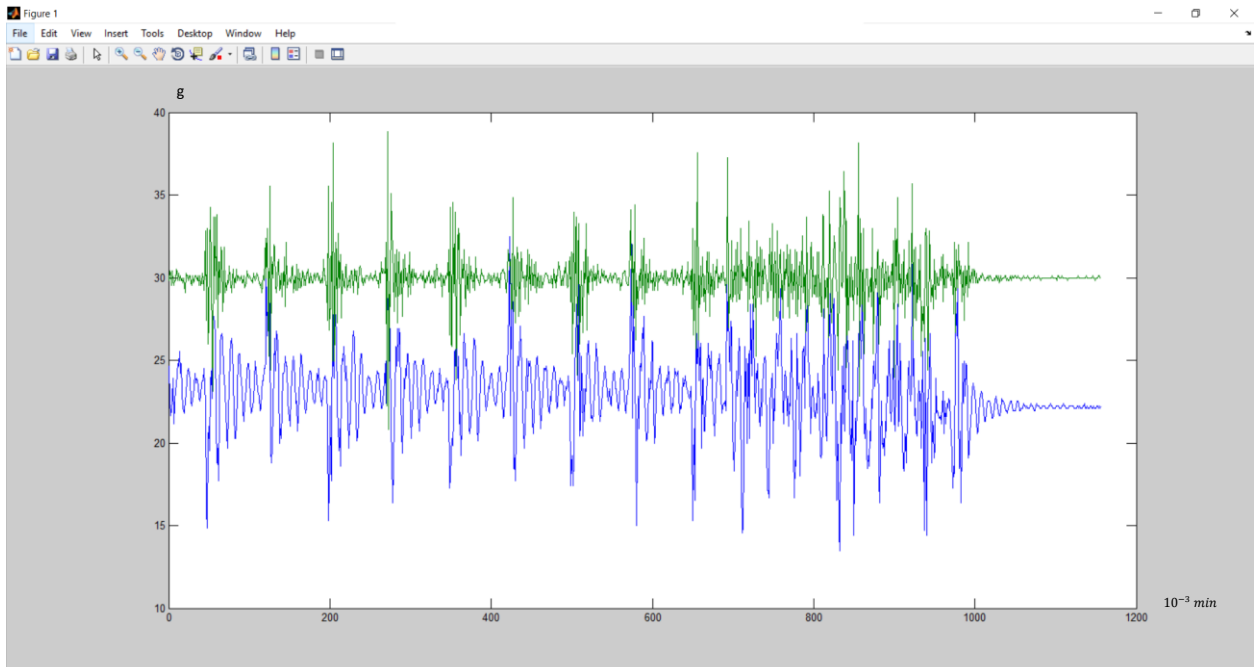
Como se evidencia en la Figura en cada cambio de dirección del movimiento de la mesa, genera un movimiento sub-amortiguado.

En el eje X se describe justamente el grado de libertad en el que se enfoca el presente estudio, de la gráfica se puede obtener datos como la amplitud de aceleración que es de:

12.82 $[g]$.

Figura 75

Prueba 3

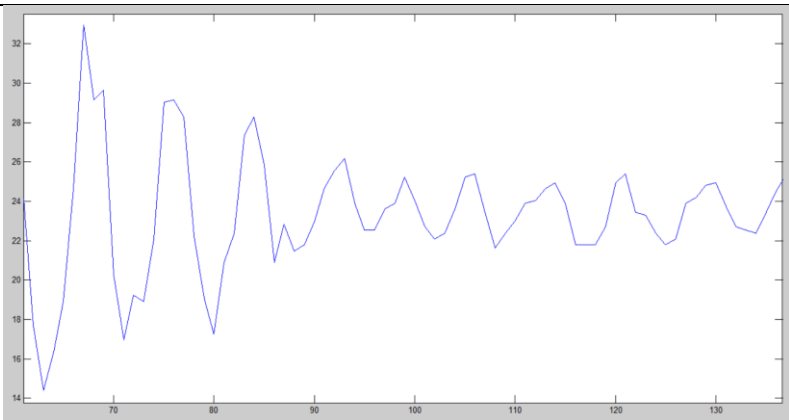
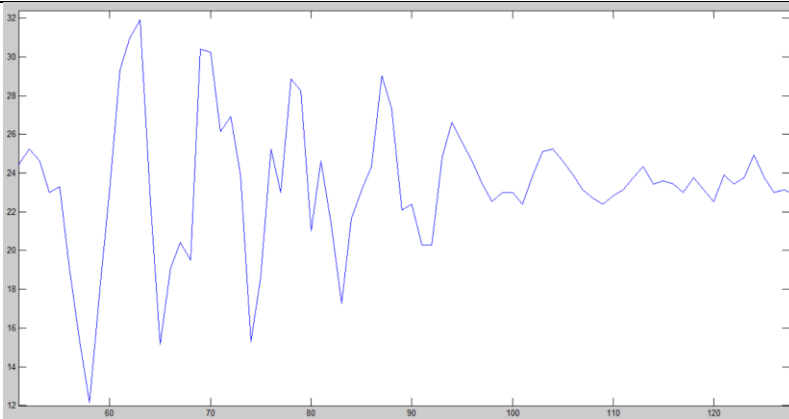


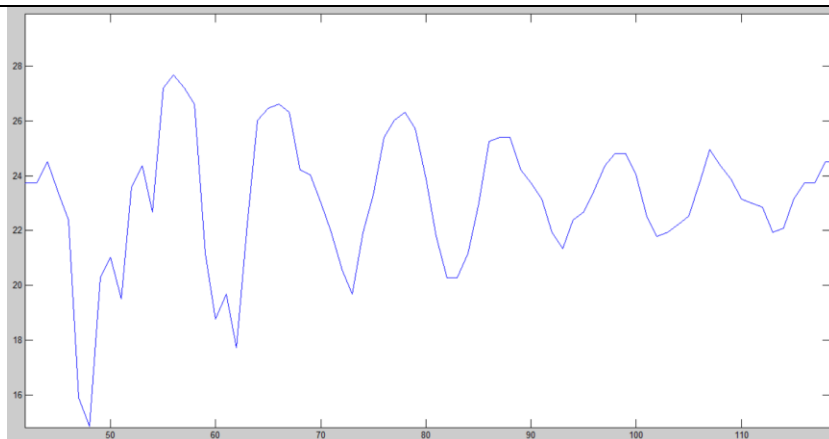
Comparativa de gráficas

En la Tabla 20 tal se presentan los gráficos a ser comparados en las diferentes pruebas realizadas para obtener una perspectiva más clara de cómo influencia la presencia de un amortiguador en una estructura civil ante un sismo.

Tabla 20

Gráficos obtenidos de las pruebas

Gráfica	Comentarios
	<p>Prueba N1 En la prueba presente se coloca la estructura directamente sobre la mesa sin ningún tipo de amortiguamiento de por medio se observa una amplitud muy marcada y oscilaciones hasta el final del lapso.</p>
	<p>Prueba N2 En la presente prueba se colocó dos bloques viscosos a los extremos de la placa soporte de los cimientos de la estructura, a comparación de la gráfica anterior se observa disminución de la amplitud al final del lapso en un tiempo más corto.</p>
<p>La presente gráfica es un muestreo de uno de los impactos producidos durante todo el análisis o prueba N2.</p>	

Gráfica**Comentarios****Prueba N3**

En la presente prueba se utilizó cuatro elementos viscosos para separar los cimientos de la placa soporte. Al final se observa en la gráfica una notable disminución de la amplitud de aceleración que en los casos anteriores pero un aumento en el tiempo.

La presente gráfica es un muestreo de uno de los impactos producidos durante todo el análisis o prueba N3.

Tomando en cuenta estos resultados se puede describir como exitosa la elaboración del prototipo para pruebas, ha logrado generar sismos o movimientos vibratorios para una gran gama de estudios dinámicos.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Se diseñó y construyó un prototipo para analizar el comportamiento dinámico de estructuras civiles a escala realizando pruebas de simulación de sismos.
- Se diseñó una mesa vibratoria de un grado de libertad totalmente funcional y optimizada para un trabajo de investigación de alta calidad en estructuras civiles.
- Se implementó el sistema de control para generar las aceleraciones y desplazamientos correspondientes en la mesa vibratoria con una adecuada exactitud y precisión.
- Se analizó el comportamiento dinámico de estructuras civiles a escala para obtener resultados de respuesta de la estructura ante sismos en tres circunstancias distintas utilizando materiales de vibraciones
- Con los resultados de las pruebas obtenidas se pudo evidenciar una considerable reducción de la aceleración, de 18.94 [g] en la prueba N1 a un 12.82 [g] en la prueba N3, significando un 30% de reducción de la aceleración, esto gracias al desacoplamiento de la súper estructura dando como resultado una acción beneficiosa para la integridad de estructuras civiles.

Recomendaciones

- Obtenido el prototipo para generación de vibraciones es factible realizar análisis con diversos tipos de estructuras civiles y componentes viscosos para un mejor análisis de eventos sísmicos.

- Dado que los equipos utilizados para el presente prototipo son flexibles, sobre todo en el caso del PLC es posible mejorar los análisis con introducción de sensores o acelerómetros industriales puesto que el equipo de control posee entradas de conteo rápido para una eficaz detección.
- Los componentes para ensamblaje de estructuras civiles son varios y dan la facilidad de hacer todo tipo de estructuras para análisis más exhaustivos y minuciosos de sismos.

Trabajos Futuros

- Es factible trabajar en un estudio de comportamiento dinámico de elementos y sistemas estructurales a escala.
- Se puede realizar demostraciones de resistencia estructural bajo cargas dinámicas.
- Generación y comprobación de modelos de análisis vibratorios.

Capítulo 7

Análisis económico

Dentro del análisis económico se puede llegar a una comparativa con lo presupuestado para el presente proyecto dentro de lo cual se ha realizado un consumo similar de recursos a lo calculado. La empresa Ecuainsetec Cia Ltda fue importante en el desarrollo del proyecto con el préstamo de instalaciones, herramientas y elementos de sus marcas para el ensamblaje a un costo preferencial.

A continuación se detallan los costos en la Tabla 21 del proyecto desglosado de una manera abierta y general:

Tabla 21

Tabla de costo

Ítem	Costo \$
<i>Estructura de soporte para mesa</i>	
- Perfil de aluminio anodizado perfilado	80
- Soportes triangulares para unión de perfiles	26
- Tornillería para estructura	5
- Lámina de alucobón	20
- Placa de aluminio	30
<i>Mecanismo de transmisión de movimiento</i>	
- Motor con reducción DC 24VDC	30
- Poleas de 20 dientes	11
- Correa de 1 cm	9
- Chumaceras	6
- Rodamientos lineales	40
- Tuercas y tornillería	12
<i>Componentes de armado de estructura civil</i>	
- Conjunto de elementos metálicos y magnéticos	260
<i>Mesa de soporte</i>	
- Placa de aluminio anodizado perfilado FESTO	150
- Varillas Guía	12

Ítem	Costo \$
- Soportes para varillas	18
- Accesorios de montaje y anclaje aluminio	13
<i>Elementos de control</i>	
- Driver para motor DC	6
- Controlador lógico programable	240
- Elementos para armado de tarjeta conversora NPN PNP	3
<i>Elementos para medición y adquisición de datos</i>	
- Encoder incremental	100
- Sensor acelerómetro	6
- Arduino	30
- Adaptador RS232 DB9 - USB	19
- Cable programación PLC	4
<i>Accesorios eléctricos</i>	
- Riel din	12
- Borneras	17
- Borneras de tierra	5
- Portafusibles	12
- Canaleta	14
- Cables	5
- Fuente 24VDC	20
- Fuente 5VDC	9
<i>Transportación</i>	
- Consumo combustible y transporte general	80
<i>Alimentación</i>	
- Alimentación dentro de período de trabajo	100
TOTAL	1404

El total de costo económico para el presente proyecto fue de \$1404 dólares americanos, del mismo que gracias al apoyo y patrocinio de Ecuainsetec cubrió el 50% de los gastos, tomando en cuenta la envergadura del proyecto, la tecnología utilizada y que se ha convertido en una herramienta de estudio de gran importancia para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se considera un valor razonable y óptimo para el desarrollo investigativo, cuidando el nivel socioeconómico del estudiante.

Bibliografía

AG, B. R. (02 de 2015). *Bosch Rexroth AG*. Obtenido de

<http://www.lineartec.com.ar/catalogos/7RodamientosLinealesBosch.pdf>

Aguila, A. (2008). Procedimiento de evaluación de riesgos ergonómicos y psicosociales . *UAL*, 43.

Alvarado, M. S. (2009). Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado: Control de velocidad por corriente de armadura. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 61-68.

Arosquipa, C. A. (2015). *Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco*. Obtenido de

<https://es.slideshare.net/carlosaparicioarosquipa/amortiguamiento-estructurasingsismicagrupob>

Bernal, M. (12 de 2015). *Scielo*. Obtenido de

<http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v33n2/v33n2a10.pdf>

Cabg, A. (2016). *ESTRUCTURAS CIVILES*. Tachira: Universidad Nacional Experimental del Tachira.

Caicedo, H. V. (2010). Construcción metálica: del pasado al futuro. *Construcción Metálica*, 3.

Castillo, J., Rojas, V., & Martínez, J. (2017). Determinación del Torque y Potencia de un Motor de

Combustión Interna a Gasolina Mediante el Uso de Bujía con Sensor de Presión

Adaptado y Aplicación de un Modelo Matemático. *Revista Politécnica*, Vol. 39.

Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras*. México: PEARSON EDUCACION.

- Clavijo, J. C., & Ramirez, L. (2011). *Diseño, modelamiento y simulación de una mesa sísmica unidireccional hidráulica*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Coral, H. (19 de 03 de 2010). *Researchgate*. Obtenido de Universidad de San Buenaventura:
https://www.researchgate.net/publication/258566042_Disenio_construccion_y_control_de_un_simulador_sismico_uniaxial_teleoperable_para_modelos_estructurales_a_pequena_escal
- Diy-makers*. (27 de 11 de 13). Obtenido de <http://diymakers.es/pwm/>
- E-STRUC. (28 de Febrero de 2017). *E-STRUC*. Obtenido de <https://e-struct.com/2017/02/28/ideas-basicas-comportamiento-dinamico-las-estructuras-i/>
- Giordani, C. (13 de 12 de 2009). *Unidad tecnológica nacional*. Obtenido de Unidad tecnológica nacional: <https://es.slideshare.net/carlosaparicioarosquipa/amortiguamiento-estructurasingsismicagrupob>
- Gómez, D. (2001). SISTEMAS DE CONTROL PARA LA PROTECCION DE ESTRUCTURAS CIVILES SOMETIDAS A CARGAS DINAMICAS. *SCIELO*, 80.
- Gonzalez, A. (2015). *Magicanaturaleza*. Obtenido de <https://magicanaturaleza.com/c-sismos/tipos-de-sismos/>
- Gtindustrias. (s.f.). Obtenido de <https://gtindustrias.com/productos/esponja-de-neopreno-y-epdm-de-celula-cerrada/>
- ITEA. (2015). *Instituto Técnico de la estructura en acero*. Obtenido de https://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia_documentacion/itea/TOMO1.pdf

- Mootio. (2017). Obtenido de <http://www.mootio-components.com/blog/es/regulacion-velocidad-motor-corriente-continua/>
- Olloquiegui, P. U. (Febrero de 2018). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de http://oa.upm.es/50344/1/TFG_%20PABLO_URRUTICOECHEA_OLLOQUIEGUI.pdf
- OMEGA. (2021). *OMEGA*. Obtenido de <https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>
- Ordoñez, B. A. (20 de 07 de 2016). *BIBDIGITAL EPN*. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16537>
- Porras, P. (15 de 05 de 2013). *Scielo*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v23n1/v23n1a06.pdf>
- Rives, D. (2018). *DISEÑO DE UNA MESA SISMICA A ESCALA*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO .
- Roydisa. (s.f.). *Roydisa*. Obtenido de <https://www.roydisa.es/archivos/5419>
- SKF. (2008). *SKF PowerTransmission belts*.
- Super robotica*. (04 de 04 de 2019). Obtenido de <http://www.superrobotica.com/conmotor.htm>
- Universidad de Alicante. (s.f.). *Sismología e ingeniería sísmica prácticas*. Alicante.
- Valdiviezo, F. (2019). *IMPLEMENTACIÓN DE UNA MESA VIBRATORIA BIDIRECCIONAL PARA SIMULACIÓN DE SISMOS*. Quito: Universidad Ute.
- Williams, A. (2011). *Steel structures desing ASD/LRFD*. New York: McGraw-Hill.