



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**“Elaboración de herramientas informáticas de análisis dinámico de
estructuras para ser incorporadas al VLEE de la UTPL”.**

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Ramón Pulla, Jhandry Alexis

DIRECTOR: Duque Yaguache, Edwin Patricio, Master

LOJA-ECUADOR

2016



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Septiembre, 2016

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Msc.

Edwin Patricio Duque Yaguache.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: Elaboración de herramientas informáticas de análisis dinámico de estructuras para ser incorporadas al VLEE de la UTPL realizado por Ramón Pulla Jhandry Alexis, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Octubre de 2016

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Ramón Pulla Jhandry Alexis, declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Elaboración de herramientas informáticas de análisis dinámico de estructuras para ser incorporadas al VLEE de la UTPL de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo Duque Yaguache Edwin Patricio director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad"

f.....

Autor: Ramón Pulla Jhandry Alexis.

Cedula: 1900415975

DEDICATORIA

A mis padres Rengel y Rosario que son la base fundamental de mi vida.

A mis hermanos Ronny, Naghely y Daily.

A mis abuelitos José y María.

En general a toda mi familia y amigos.

AGRADECIMIENTO

Primeramente quiero agradecer a Dios por tenerme con vida, guiarme y darme fortaleza para alcanzar uno de mis objetivos y poder concluir con una de las metas más importantes en mi vida.

A mis padres Rengel y Rosario, por brindarme su confianza y sacrificio y así ser mis bases fundamentales en todo el trayecto de mi vida, ya que sin ellos no habría sido posible este logro tan anhelado, de todo corazón gracias por darme tanto y nunca desampararme, son un ejemplo a seguir.

A mis hermanos Ronny, Naghely y Daily, por su amor infinito y por ver en mí un ejemplo.

A mi enamorada Isabel, por apoyarme día tras día y compartirme todas sus ganas de superación, te debo a ti gran parte de mi esfuerzo.

A mis abuelos, tíos (as) y más familiares quienes contribuyeron para mi formación y estar siempre pendientes de mí.

De manera especial a mis amigos que siempre han estado apoyándome en todo momento.

Agradecer de la manera más sincera a mi director de tesis el Msc, Edwin Patricio Duque Yaguache, una persona muy inteligente, colaboradora y generosa. Gracias por impartirme sus conocimientos ya que sin ellos no habría sido posible el término de nuestro trabajo.

Al Ingeniero Santiago Quiñones, por todo su esfuerzo y desempeño en nuestro trabajo.

A los docentes de la titulación de Ingeniería Civil, por la debida formación y conocimientos que nos han impartido para poder desarrollar cualquier actividad que esté al alcance de nuestra especialidad.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CECIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN.....	1
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivos	5
1.1.1. Objetivo general:.....	5
1.1.2. Objetivos específicos:	5
1.2. Organización y estructura del proyecto	5
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	7
2.1. Laboratorios virtuales.	8
2.1.1. Definición.....	8
2.1.2. Características generales de un laboratorio virtual.....	8
2.2. Laboratorio virtual de ingeniería sísmica “VLEE”.....	9
2.2.1. Definición.....	9
2.3. Programas informáticos con los que opera el laboratorio virtual de ingeniería sísmica.....	10
2.3.1. Microsoft Visual Studio.....	10
2.3.2. Matlab.....	10
2.3.3. OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation).....	10
2.4. Aplicación móvil.....	11
2.5. Dinámica de Estructuras.	12

2.5.1. Análisis dinámico estructural.....	12
2.5.2. Sistemas de un grado de libertad.....	12
2.5.3. Fuerzas de un sistema lineal.....	13
2.5.3.1. Fuerza elástica lineal (f_s)	13
2.5.3.2. Fuerza disipativa o de amortiguamiento (f_d).....	14
2.5.4. Tipos de vibraciones y variables cinemáticas de un sistema mecánico.....	15
2.5.4.1. Definición de vibración.	15
2.5.4.2. Vibración libre.....	16
2.5.4.3. Vibración libre no amortiguada.	16
2.5.4.4. Vibración libre amortiguada.	18
2.5.4.5. Vibración armónica.....	21
2.5.4.6. Vibración armónica no amortiguada.	21
2.5.4.7. Vibración armónica amortiguada.	22
2.5.5. Componentes de variación máxima de un sistema mecánico.	23
2.5.5.1. Amplitud del sistema (ρ)	23
2.5.5.2. Líneas envolventes.....	24
2.5.6. Notas:	24
2.5.7. Energías de un sistema mecánico en vibración libre.....	25
2.5.7.1. Energía cinética (E_k)	25
2.5.7.2. Energía potencial (E_s)	25
2.5.7.3. Energía total (E_t)	26
2.5.7.4. Energía de disipación (E_d)	26
2.5.8. Análisis modal aplicado en sistemas de varios grados de libertad.	27
2.5.8.1. Frecuencias naturales (ω_n).....	30
2.5.8.1. Modos de vibración (ϕ_n).....	30
2.5.9. Matriz modal, espectral e identidad.....	31
2.5.10. Espectro de diseño a partir de un registro de aceleraciones sísmicas desarrollando el método de aceleración lineal.	31
2.5.10.1. Aceleración sísmica.....	31
2.5.10.2. Método de aceleración lineal.	32
2.5.10.3. Espectros de respuesta.....	32

2.5.10.4. Espectro de diseño.....	34
2.5.11. Espectro de diseño mediante la norma “NEC-2015”.....	34
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	38
3.1. Tipo de investigación.....	39
3.2. Estado actual del Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica “VLEE”.....	39
3.3. Interfaz gráfica del laboratorio virtual.....	39
3.4. Laboratorios de la plataforma virtual de ingeniería sísmica.....	40
3.5. Funcionamiento del Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica “VLEE”.....	40
3.5.1. Descripción general de la solución.....	40
3.6. Elaboración de experimentos para el Laboratorio Virtual “VLEE”.....	41
3.6.1. Programa master para el experimento de “Análisis Modal”.....	41
3.6.1.1. Código Máster del laboratorio de “Análisis modal”.....	43
3.6.2. Función análisis modal en vibración libre no amortiguada (AMCI) Caso 1.....	45
3.6.1. Función análisis modal en vibración libre amortiguada (AMCIA)” Caso 2... ..	46
3.6.2. Función análisis modal en vibración armónica no amortiguada en estado estacionario (VASNAEE) Caso 3.....	46
3.6.3. Función análisis modal en vibración armónica amortiguada en estado estacionario (VASAEE)” Caso 4.....	47
3.6.4. Experimento “Espectro de diseño a partir de registros sísmicos”.....	48
3.6.4.1. Función LeerSismos.....	49
3.6.4.1. Función LeerDatoAmortiguamiento.....	50
3.6.4.1. Función SPECT y función SDOF.....	50
3.6.4.2. Código Master de Espectros de Diseño.....	50
3.7. Aplicación Móvil “Espectro de Diseño” versión 1.0.....	54
3.7.1. Descripción general de la solución.....	54
CAPÍTULO IV: ESTUDIOS DE CASOS RELEVANTES.....	60
4.1. Introducción.....	61
4.2. Análisis dinámico de la estructura “Plaza de la Cultura”.....	61
4.2.1. Descripción de la estructura y zona de estudio.....	61
4.3. Análisis dinámico de la estructura “Plaza de la cultura”.....	62
4.3.1. Análisis modal en vibración libre no amortiguado.....	63

4.3.1.1. Resultados numéricos y gráficos.	63
4.3.2. Análisis modal en vibración libre amortiguado.	65
4.3.2.1. Resultados numéricos y gráficos.	66
4.3.3. Análisis Modal en vibración armónica no amortiguada.	68
4.3.3.1. Cálculo de la carga por viento:	68
4.3.3.2. Cálculo de la presión del viento:	70
4.4. Espectros de respuesta y diseño del sismo de Pedernales – Ecuador.	72
4.4.1. Análisis de resultados.	73
CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXOS.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interfaz gráfica del "Laboratorio virtual de ingeniería sísmica".	9
Figura 2. Aplicación móvil "Earthquake".	11
Figura 3. Sistema de un grado de libertad	13
Figura 4. Representación de un sistema mecánico masa-resorte- amortiguador..	13
Figura 5. Fuerzas del sistema aplicadas a la masa del elemento.	15
Figura 6. Vibración libre de un sistema no amortiguado.....	18
Figura 7. Sistema en vibración libre: subamortiguado, críticamente-amortiguado y sobreamortiguado.....	19
Figura 8. Respuesta en el tiempo de un sistema de 1GDL amortiguado y no amortiguado.....	20
Figura 9. Amplitud de la fuerza armónica.....	22
Figura 10. Respuesta en el tiempo de un sistema amortiguado, perturbado por una fuerza armónica.....	23
Figura 11. Vibración libre de un sistema amortiguado.....	24
Figura 12. Resultados del desplazamiento de un sistema en vibración libre, sometido a diferentes amortiguamientos.....	25
Figura 13. Energías cinética potencial y total de un sistema libre no amortiguado.....	26
Figura 14. Energía cinética, potencial, de disipación y total de un sistema en vibración libre amortiguada.	27
Figura 15. Pórtico plano idealizado como un sistema de varios grados de libertad.....	27
Figura 16. Representación de un sistema mecánico masa-resorte-amortiguador de varios grados de libertad.....	28
Figura 17. Modos de vibración de un sistema estructural.	31
Figura 18. Acelerograma partir de un registro de aceleraciones sísmicas.....	32
Figura 19. Procedimiento para el cálculo de los espectros de respuesta..	33
Figura 20. Espectros de respuesta del sismo del 09 de noviembre de 1971, sometidos a diferentes amortiguamientos.....	33
Figura 21. Espectro de Desplazamiento	34
Figura 22. Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones.	35
Figura 23. Zonas sísmicas del Ecuador.	35
Figura 24. Interfaz gráfica actual del "VLEE".....	39
Figura 25. Descripción general del funcionamiento de la plataforma virtual.	41
Figura 26. Programa Master del laboratorio "Análisis Modal"	42
Figura 27. Archivo de texto que contiene los datos de entrada de la función "Análisis modal en vibración libre no amortiguada"	42

Figura 28. Diagrama de flujo de la herramienta análisis modal en vibración libre no amortiguado.....	45
Figura 29. Diagrama de flujo de la herramienta análisis modal en vibración libre amortiguado.....	46
Figura 30. Diagrama de flujo de la herramienta análisis modal en vibración armónica no amortiguada.....	47
Figura 31. Diagrama de flujo de la herramienta análisis modal en vibración armónica amortiguada.....	48
Figura 32. Diagrama de flujo de la herramienta espectro de diseño a partir de un registro de aceleraciones.....	49
Figura 33. Formato del registro de aceleraciones brindado por el "RENAC"..	49
Figura 34. Formato del registro de aceleraciones brindado por el "PEER".....	50
Figura 35. Aplicación móvil "Espectro de diseño versión 1.0"	54
Figura 36. Actividades de la aplicación móvil "Espectro de Diseño".....	55
Figura 37. Tipo de perfil del suelo.....	55
Figura 38. Tipo de uso e importancia de la estructura.....	56
Figura 39. Factor de reducción sísmica "R"	57
Figura 40. Determinación del periodo de vibración..	58
Figura 41. Configuración estructural en planta y elevación..	58
Figura 42. Resultados de salida para la generación del espectro de diseño.	59
Figura 43. Espectro de diseño generado por medio de la Aplicación Móvil "Espectro de Diseño versión 1.0".....	59
Figura 44. Estructura "Plaza de la cultura"	61
Figura 45. Ubicación de la Plaza de la cultura ubicada en la Universidad Nacional de Loja.....	62
Figura 46. Desplazamiento en vibración libre no amortiguado de la estructura "Plaza de la cultura"	64
Figura 47. Energías en vibración libre no amortiguada de la estructura "Plaza de la cultura".....	65
Figura 48. Desplazamiento total nodal de la estructura "Plaza de la cultura"	65
Figura 49. Desplazamiento en vibración libre amortiguado.....	67
Figura 50. Energías en vibración libre amortiguada de la estructura "Plaza de la cultura"..	67
Figura 51. Desplazamiento total nodal amortiguado de la estructura "Plaza de la Cultura"	68
Figura 52. Coeficiente de corrección.....	69

Figura 53. Determinación del coeficiente de forma.	70
Figura 54. Modo fundamental de vibración de la estructura.	71
Figura 55. Respuesta del sistema no amortiguado ante la acción de una carga armónica.....	72
Figura 56. Red nacional de estaciones acelerográficas del Ecuador.	73
Figura 59. Espectros de respuesta y diseño de Desplazamiento, Velocidad y Aceleración del Sismo ocurrido en Ecuador- Manabí-Pedernales.	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del factor Z .	36
Tabla 2. Coeficiente de ampliación del suelo en periodo corto F_a .	36
Tabla 3. Coeficiente de ampliación F_d .	36
Tabla 4. Coeficiente del comportamiento no lineal de los suelos F_s .	37
Tabla 5. Tipos de estructura para el periodo de vibración.	57
Tabla 6. Datos de entrada para el experimento "Análisis Modal en vibración Libre no Amortiguado".	63
Tabla 7. Resultados de la estructura "Plaza de la Cultura" utilizando el experimento "Análisis Modal en Vibración Libre no Amortiguado".	64
Tabla 8. Datos de entrada para el experimento "Análisis Modal en vibración Libre Amortiguado".	66
Tabla 9. Resultados de salida de la estructura "Plaza de la Cultura" utilizando el experimento "Análisis Modal en Vibración Libre Amortiguado".	66
Tabla 10. Características topográficas para el cálculo de la carga del viento.	69

RESUMEN

Se presenta la elaboración de experimentos virtuales como: “Análisis modal” y “Espectro de diseño”, los cuales operan en el Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica “LVIS”, igualmente se muestra la elaboración de la aplicación móvil “Espectro de Diseño versión 1.0”.

El LVIS posee herramientas de análisis y diseño estructural, sin embargo al pasar del tiempo el laboratorio virtual se encuentra inoperativo por varios factores, ante ello se propone como objetivo principal elaborar experimentos virtuales de análisis dinámico para ser incorporados al LVIS.

Para cumplir con el objetivo planteado primeramente se realizaron códigos fuentes, los mismos que fueron desarrollados en “MATLAB”, luego se procede a vincular la programación de MATLAB con la programación desarrollada en Visual Studio, para finalmente ponerlos a disposición en el sitio web del LVIS.

Al involucrar estas dos ramas de la ciencia como son la informática y la dinámica de estructuras, permite generar un laboratorio virtual acorde y propicio a las necesidades de las personas interesadas en el análisis y diseño estructural.

PALABRAS CLAVES: Laboratorio virtual de ingeniería sísmica, análisis dinámico, diseño estructural, herramientas informáticas.

ABSTRACT

This research study presents the development of virtual experiments such as: "modal analysis" and "design spectrum", which operate in the Virtual Laboratory Earthquake Engineering "VLEE", also it shows the development of the mobile application "spectrum of design version 1.0".

The VLEE possesses structural design and analysis tools, however it is inoperative due to several factors, for this reason the main objective in this study is to develop virtual experiments of dynamic analysis to be incorporated into VLEE.

To meet the objective first source codes were developed in "MATLAB", then MATLAB programming is linked with the programming developed in Visual Studio, finally they were available on the VLEE web site.

Involving these two branches of science: informatics and the dynamics of structures, allows people to generate a virtual laboratory consistent and supportive of the needs of people interested in the analysis of structural design.

KEYWORDS: Virtual Laboratory for Earthquake Engineering, Dynamic Analysis, Structural Design, Informatics Tools.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

A partir de los años sesenta, el estudio de la ingeniería sísmica ha tenido gran importancia en el análisis de estructuras, con la finalidad de evitar daños estructurales y pérdida de vidas humanas.

La ingeniería sismo resistente, es parte de la dinámica estructural, la cual estudia el comportamiento de las edificaciones ante la acción de un evento sísmico, igualmente estudia los métodos de cálculo estructural, los cuales garantizan el buen comportamiento y seguridad ante los sismos (Villarreal, 2013).

Actualmente la ingeniería sísmica integra muchas disciplinas, entre ellas: la sismología, la dinámica de estructuras y de suelos, el diseño estructural y entre otras la informática. Sin embargo el conocimiento total del tema que involucra la relación existente entre la informática y la ingeniería sísmica, muy posiblemente esta fuera del alcance de los profesionales involucrados en el tema, es por ello, que conjuntamente con un grupo disciplinario de estudiantes y docentes pertenecientes a la Universidad Técnica Particular de Loja, se ha ejecutado varios proyectos enmarcados en la investigación, hoy emprende en la promoción de nuevas formas de análisis y diseño estructural con criterios sísmicos mediante la utilización del “Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica” que opera con varias herramientas informáticas.

El Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica “VLEE”, fue creado en el año 2008 por miembros pertenecientes a la Universidad Técnica Particular de Loja, con el fin de implementar un espacio abierto, el cual sirva para difundir, compartir e intercambiar conocimientos y experiencias de personas interesadas en el análisis y diseño de estructuras, proponiendo a los usuarios herramientas de “Análisis Dinámico”, “Puentes”, “Edificios” y “Elementos de Concreto Reforzado”, las mismas que cuentan con varios experimentos, así mismo se hace conocer que por varios motivos en el transcurso de este tiempo el VLEE ha sido abandonado y a su vez desaprovechado por la falta de actualizaciones y desarrollo de nuevos experimentos de análisis y diseño que este posee. Por tal motivo nace la propuesta de realizar un proyecto para crear y actualizar herramientas como: “Cables-Structures” y “Sistemas de Protección Sísmica”, las cuales operaran en el Laboratorio Virtual.

En este trabajo de fin de titulación se desarrolló la actualización de la herramienta “Análisis Dinámico” con la generación de nuevos experimentos como “Modal Analysis”, el cual utiliza la metodología del análisis modal para analizar pórticos planos de máximo 30 grados de libertad. Además se elaboró el experimento “Spectrum”, que obtiene el espectro de diseño

mediante el registro de aceleraciones sísmicas, asimismo se generó una aplicación móvil, la cual tiene como función principal generar el espectro de diseño aplicando la norma ecuatoriana de la construcción NEC-2015 (Peligro sísmico diseño sismo resistente), de igual forma se elaboró documentos con ejercicios resueltos, en los cuales se indican la metodología de cada uno de los experimentos desarrollados. Finalmente se elaboró dos casos de estudios relevantes utilizando las herramientas de “Análisis Dinámico” y “Espectro”.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general:

- Elaborar códigos fuentes para ser incorporados al “LVIS” de la Universidad Técnica Particular de Loja.

1.1.2. Objetivos específicos:

- Generar el código máster para el experimento de “Modal Analysis”.
- Generar el código máster para el experimento de “Spectrum”.
- Realizar una propuesta de la interfaz gráfica para cada experimento desarrollado, con el fin de mejorar la experiencia del usuario.
- Poner a disposición de los usuarios la Aplicación Móvil de espectros de diseño siguiendo la metodología propuesta por la “NEC-2015”
- Elaborar guías prácticas, para fortalecer los mecanismos de aprendizaje de los estudiantes.
- Realizar estudios de casos relevantes de ingeniería utilizando los experimentos desarrollados.

1.2. Organización y estructura del proyecto

En el siguiente trabajo de fin de titulación se encuentra estructurado en IV capítulos, organizados de la siguiente manera:

En el primer capítulo se presenta la introducción, en la cual se indica brevemente acerca de historia de la ingeniería sísmica, además se puntualiza el desarrollo de este trabajo de fin de titulación, finalmente se plantea los objetivos generales y específicos.

En el segundo capítulo se muestra el estado del arte, el cual presenta la información necesaria para la investigación realizada.

En el tercer capítulo se indica la metodología de la operatividad del laboratorio virtual, además se describe el uso de todos los experimentos desarrollados.

El cuarto capítulo abarca el estudio de dos casos relevantes, con el fin de validar las herramientas y experimentos generados. El primer caso comprende el análisis dinámico de la estructura denominada “Plaza de la Cultura”, ubicada en la Universidad Nacional de Loja. El segundo caso genera el espectro de diseño a partir de los registros de aceleraciones del evento ocurrido el 16 de abril en Pedernales-Ecuador.

Finalmente se muestran las conclusiones y recomendaciones que se obtienen de la investigación realizada, así mismo la bibliografía y anexos utilizados para la presente investigación.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1. Laboratorios virtuales.

2.1.1. Definición.

Un laboratorio virtual es un espacio abierto, computarizado y sintetizado para el procesamiento y ejecución de resultados, el cual simula un ambiente general que puede poseer un laboratorio físico. Sin embargo, no se considera que un laboratorio virtual vaya a suplantarse a los verdaderos laboratorios o competir con ellos, ya que los laboratorios virtuales generalizan a los verdaderos laboratorios y abren nuevas perspectivas que no se podían explorar completamente dentro de un verdadero laboratorio a un costo asequible (Vary, 2000).

2.1.2. Características generales de un laboratorio virtual.

Los laboratorios virtuales son una alternativa para no desarrollar laboratorios físicos, ya que su característica relevante es su bajo costo y corto mantenimiento, por ende tienen la gran importancia de estar al alcance y al servicio de los usuarios ubicados en cualquier parte del mundo, brindando un ambiente propicio y adecuado por medio de su interfaz gráfica, la misma que está compuesta por elementos gráficos que ayudan a la vinculación del usuario a través de la pantalla de un ordenador (Luna, 2004).

Según, Monge & Méndez (2007); Muhamad, Zaman & Ahmad (2012), los laboratorios virtuales representan una opción creativa, moderna y económica para instituciones universitarias, tanto a distancia como presenciales, las mismas que requieren de estos espacios dentro de su proceso de formación. Así mismo, según Vary (2000) considera tres características principales para el funcionamiento y elaboración de un laboratorio virtual, las cuales son: (a) un proyecto determinado que pueda requerir de la ayuda de un laboratorio virtual, (b) la comunicación existente entre el usuario y el laboratorio virtual, (c) las aportaciones de ideas y material necesario para el estudio de los usuarios. Sin embargo, el uso de los laboratorios virtuales presentan ventajas y desventajas como:

Ventajas:

- Optimización de tiempo, en la realización de cálculos.
- Previene de accidentes, que pueden ocurrir con equipos tangibles.
- Su economía es de bajo costo, comparado con un laboratorio físico.
- Acceso al laboratorio desde cualquier parte del mundo.

Desventajas:

- El usuario desconoce el procedimiento que existe detrás del laboratorio para la obtención de datos de salida.
- No atiende inquietudes de los usuarios.
- No propicia un trabajo entretenido para la enseñanza adecuada de los alumnos

En la Figura 1 se aprecia la interfaz gráfica que presenta el laboratorio virtual de ingeniería sísmica, el cual está compuesto por elementos gráficos que sirven para el desarrollo de las diferentes operaciones.



Figura 1. Interfaz gráfica del “Laboratorio virtual de ingeniería sísmica”
Fuente y Elaboración: El autor.

2.2. Laboratorio virtual de ingeniería sísmica “VLEE”.

2.2.1. Definición.

El laboratorio virtual de ingeniería sísmica ha sido desarrollado como una herramienta para el análisis y diseño de estructuras, en el cual se facilitan los procesos de enseñanza y aprendizaje por medio del acceso libre en la web, ya que esta es una solución ágil, amigable y pedagógica que permite realizar experimentos de diseño y simulación estructural. El laboratorio virtual de ingeniería sísmica pertenece a la Universidad Técnica Particular de Loja a la escuela de Ingeniería Civil, así mismo el laboratorio fue creado en el año 2008, por docentes investigadores como son: PhD. Vinicio Suarez, Ing. Armando

Cabrera, Ing. Luis Santiago Quiñones y Pedro Irene. Sus siglas en inglés “VLEE” se derivan de “VIRTUAL LABORATORY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING”.

El laboratorio virtual “VLEE” posee un conjunto de herramientas como son: Análisis Dinámico, Puentes, Edificios y Elementos de concreto reforzado, en donde cada herramienta presenta una serie de experimentos virtuales para el respectivo análisis y diseño de estructuras. Actualmente existe un proyecto semilla, que consiste en elaborar herramientas de diseño como son: Cables-Structures y Sistemas de Protección Sísmica. Finalmente este trabajo de fin de titulación consiste en actualizar e incrementar experimentos para la herramienta “Análisis Dinámico” y “Espectro”.

2.3. Programas informáticos con los que opera el laboratorio virtual de ingeniería sísmica.

2.3.1. Microsoft Visual Studio.

Proporciona el diseño de una interfaz gráfica mediante una aplicación de manera visual, sin más que trasladar con el mouse los controles necesarios hacia la ventana de destino. Visual Studio es un grupo completo de herramientas de desarrollo para construir aplicaciones Web, servicios web, aplicaciones Windows o de escritorio y aplicaciones para dispositivos móviles. El entorno de herramientas y la biblioteca .NET Framework que incluye clases, interfaces y tipos que aceleran y optimizan el proceso de desarrollo son ofrecidos por esta plataforma que es compartida en su totalidad por Visual Basic, Visual C# y Visual C++, que permite solventar que interfieran varios lenguajes de codificación en las que el diseño se desarrolla independientemente respecto a la programación que realiza el usuario (Ceballos, 2014).

2.3.2. Matlab.

MATLAB es un potente software que trabaja matricialmente y posee una variedad de herramientas incorporadas para ejecutar problemas y desarrollar gráficas. El método de uso más simple para MATLAB es introducir una expresión por el usuario y responder rápidamente con un resultado. También es posible escribir Scripts, los cuales son grupos de comandos que se ejecutan esencialmente (Attaway, 2013).

2.3.3. OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation).

OpenSees es un software elaborado para la simulación ante la respuesta de un sismo que afecta a sistemas estructurales y geotécnicos, el cual sirve para la modelación y análisis,

en donde ha sido desarrollado informáticamente en el Centro de Investigación Ingeniería de terremotos del Pacífico.

2.4. Aplicación móvil.

El uso de equipos móviles es parte de las personas hoy en día, ya que estos probablemente contengan diferentes programas o aplicaciones para realizar una serie de actividades como: juegos, referencias de localización mediante GPS, acceder a diferentes noticias sociales, deportivas humanísticas entre otras, así mismo predecir el estado del clima y demás. Dado esto, una aplicación móvil es una herramienta informática, programada y diseñada para teléfonos inteligentes móviles, las cuales realizan una tarea determinada dependiendo su uso.

Existen aplicaciones desarrolladas por diferentes sistemas operativos, los cuales son: Android, iOS, BlackBerry, Windows Phone, así mismo algunas aplicaciones móviles se encuentran gratuitas y otras pagadas, las mismas que cumplen una diversidad de tareas, ya sea profesionales o de ocio, educativas o informativas.

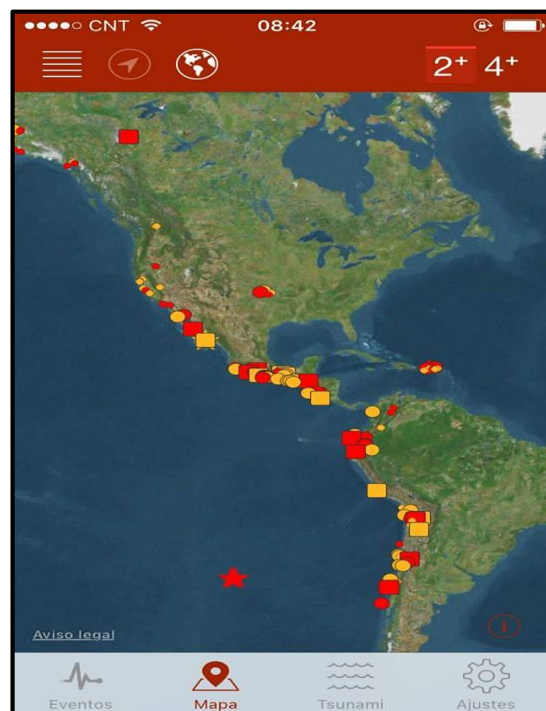


Figura 2. Aplicación móvil "Earthquake"
Fuente y Elaboración: El autor

2.5. Dinámica de Estructuras.

2.5.1. Análisis dinámico estructural.

Se denomina análisis estructural al cálculo de los diferentes fenómenos que puedan ocurrir en una estructura, como por ejemplo deformaciones, desplazamientos, energías, etc. (McCormac, 2010).

La dinámica de estructuras es uno de los temas más extensos y porque no uno de los más importantes en el caso de estudio de estructuras. Este tema se ha desarrollado con el pasar de los años, ya que por la ocurrencia de varios fenómenos naturales, las estructuras se han visto amenazadas y afectadas por estos fenómenos, es por ello que la dinámica de estructuras abarca criterios importantes para el análisis y diseño tomado medidas extremas para escenarios desfavorables.

Por tal motivo, el análisis estructural pretende establecer una predicción del comportamiento del sistema físico basado en modelos matemáticos que represente las propiedades del sistema, sin embargo los resultados son aproximados debido a las diferentes propiedades del elemento, es por ello que se realizan idealizaciones, las cuales pretenden obtener resultados aceptables y confiables que no afecten a la seguridad económica del sistema físico (Botero, 2011).

El estudio de la dinámica estructural primeramente trata de comprender el comportamiento dinámico o vibratorio de estructuras simples, las mismas que pueden ser perturbadas por una fuerza lateral dinámica externa, movimientos que se generan en el suelo por la ocurrencia de sismos entre otras. Estas estructuras simples pueden ser idealizadas como un sistema de un grado de libertad, por lo que facilita su cálculo dinámico.

2.5.2. Sistemas de un grado de libertad.

Se empieza por definir que los grados de libertad (GDL) corresponden al número mínimo de coordenadas independientes necesarias sobre las cuales se van a medir las variables cinemáticas en cualquier instante de tiempo, con el fin de obtener la información necesaria para el respectivo análisis (Botero, 2011).

Se consideran sistemas de un grado de libertad (SDOF) Fig. 3 cuando una estructura está compuesta por una masa (m) concentrada en la parte superior del elemento, columnas sin masa que proporciona rigidez al elemento. La rigidez total es igual a la suma de rigideces de las columnas que se ubican debajo de la masa y un amortiguador quien es el

encargado de la disipación de energía. Los elementos como vigas y columnas son considerados axialmente indeformables.

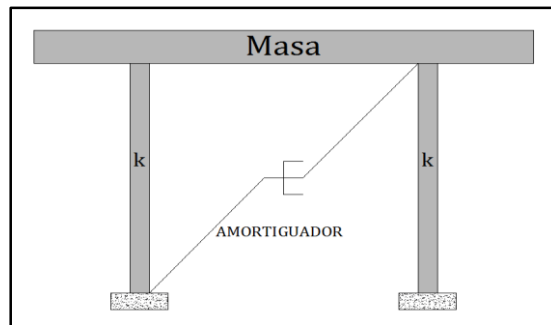


Figura 3. Sistema de un grado de libertad
Fuente y Elaboración: El autor

Así mismo, el sistema que se muestra esquemáticamente en la Fig. 4 representa un sistema mecánico masa-resorte-amortiguador de 1GDL, representado por las siguientes componentes: masa (m) rigidez (k) y amortiguamiento (c), igualmente se considera una excitación dinámica como es la fuerza externa $p(t)$, la cual es aplicada en la masa de elemento y que genera el desplazamiento relativo (u) en la dirección del eje x .

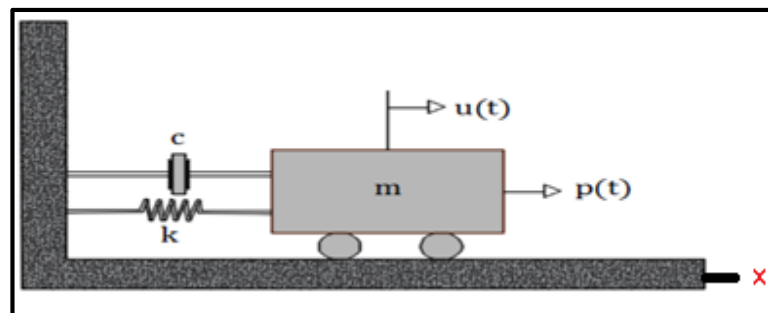


Figura 4. Representación de un sistema mecánico masa-resorte-amortiguador.
Fuente y elaboración: El autor.

2.5.3. Fuerzas de un sistema lineal.

2.5.3.1. Fuerza elástica lineal (f_s).

Es la relación existente entre la rigidez lateral que presenta el sistema y su deformación, es decir,

Ecuación (1)
$$f_s = ku$$

Donde k representa a la rigidez del sistema y es la relación existente entre fuerza y desplazamiento (u). También es la capacidad que tiene un elemento para no deformarse

fácilmente por la acción de fuerzas. Las unidades de rigidez son fuerza/longitud $\left[\frac{F}{L} \right]$.

Según Botero (2011), “la rigidez es la encargada de almacenar o liberar la energía potencial del sistema”, además se la calcula por las diferentes dimensiones que posee el sistema o el elemento estructural. Mediante la ecuación 2 se realiza el cálculo de la rigidez para pórticos:

$$\text{Ecuación (2)} \quad k = \frac{12EI}{L^3}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del concreto.

I = Inercia del elemento.

L = Longitud del elemento.

2.5.3.2. Fuerza disipativa o de amortiguamiento (f_D).

Es la relación existente entre el amortiguamiento y la velocidad del sistema, cabe recalcar que esta fuerza se presenta solo en los sistemas que poseen amortiguamiento y es representada mediante la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación (3)} \quad f_D = c\dot{u}$$

Donde c es el coeficiente de amortiguamiento viscoso que a diferencia de la rigidez el coeficiente de amortiguamiento no se puede calcular a partir de las dimensiones de la estructura si no que es una constante que se la mide a partir de la energía disipada en un ciclo de vibración, igualmente \dot{u} representa a la velocidad que se genera en el sistema. Seguidamente, para encontrar la ecuación de movimiento que controla el desplazamiento se lo realiza mediante la segunda ley de Newton en donde la fuerza elástica lineal f_s , la fuerza disipativa f_D y la fuerza externa $p(t)$, actúan sobre la masa Fig. 5 Se considera que la fuerza externa es positiva en dirección al eje x, en donde aplicando la segunda ley del movimiento de Newton se tiene:

$$\text{Ecuación (4)} \quad p - f_s - f_D = m\ddot{u} \quad \text{o} \quad m\ddot{u} + f_D + f_s = p(t)$$

Que al reemplazar las ecuaciones 1 y 3 en la ecuación 4, esta ecuación se convierte en:

Ecuación (5)
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t)$$

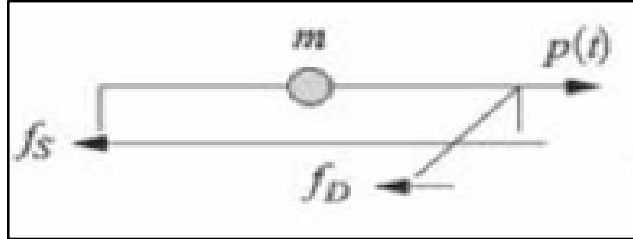


Figura 5. Fuerzas del sistema aplicadas a la masa de elemento.

Fuente y elaboración: Anil Chopra (2012).

Donde u, \dot{u}, \ddot{u} son respectivamente el desplazamiento, velocidad y aceleración.

m = Representa a la masa del sistema y es la cantidad de materia que posee un elemento y viene dada mediante la siguiente expresión:

Ecuación (6)
$$m = \delta V$$

Donde:

δ = Densidad del material expresada en unidades de masa/longitud $\left[\frac{M}{L^3} \right]$.

V = Volumen del elemento expresado en unidades de longitud $[L^3]$.

c = Coeficiente de amortiguamiento, se hará un enfoque más detallado de esta componente posteriormente.

k = Representa a la rigidez del sistema Ecuación 2.

$p(t)$ = Fuerza externa de tipo armónica igual 0 para este estudio.

2.5.4. Tipos de vibraciones y variables cinemáticas de un sistema mecánico.

2.5.4.1. Definición de vibración.

Es la oscilación de un cuerpo o sistema mecánico respecto a su posición de equilibrio, según Viñan (2009), el estudio de las vibraciones se refiere a los movimientos que se generan en los cuerpos que poseen masa y elasticidad, así mismo comenta que la mayoría de las máquinas y estructuras experimentan vibraciones hasta cierto grado por el aumento de sus esfuerzos y para su diseño se requiere considerar el efecto dinámico.

2.5.4.2. Vibración libre.

Según Chopra (2012), las estructuras experimentan vibración libre cuando es perturbada de su posición de equilibrio estático a consecuencia de un impulso inicial, es decir, el sistema vibra sin ninguna excitación dinámica externa que se rige mediante la ecuación 5.

2.5.4.3. Vibración libre no amortiguada.

El sistema es perturbado de su posición de equilibrio aplicando a la masa condiciones iniciales como desplazamiento $u(0)$ y velocidad $\dot{u}(0)$ en un tiempo igual a 0 que se rige por medio de la ecuación 5, donde la fuerza externa es igual a $p(t) = 0$, además el sistema no posee amortiguamiento por lo que $c = 0$. A continuación se muestra ecuación para un sistema en vibración libre no amortiguado:

Ecuación (7)
$$m\ddot{u} + ku = 0$$

Donde m, k representan a la masa y rigidez del sistema indicados previamente.

u = Representa al desplazamiento del sistema. Según Botero (2011), mide la distancia del movimiento que se genera en un cuerpo, cuando es cambiado de su posición normal. Se encuentra representado por la siguiente ecuación diferencial, la misma que sujeta a las condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad:

Ecuación (8)
$$u(t) = u_0 \cos(\omega_n t) + \left(\frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \right) \sin(\omega_n t)$$

Por lo tanto, con la primera derivada del desplazamiento con respecto al tiempo se encuentra la velocidad, la cual según Botero (2011), es la relación entre la distancia recorrida por un cuerpo en un determinado tiempo, la misma que se la especifica mediante la siguiente ecuación diferencial:

Ecuación (9)
$$\dot{u}(t) = -u_0 \omega_n \sin(\omega_n t) + \dot{u}_0 \cos(\omega_n t)$$

\ddot{u} = Representa a la aceleración del sistema. Según Botero (2011), es el cambio de velocidad de un cuerpo que se traslada de un lugar a otro y se expresa como la primera derivada de la velocidad o la segunda derivada del desplazamiento respecto al tiempo, la cual se establece por la siguiente ecuación diferencial:

Ecuación (10)
$$\ddot{u}(t) = -u_0 \omega_n^2 \cos(\omega_n t) - \dot{u}_0 \omega_n \sin(\omega_n t)$$

En la figura 6, se observa la respuesta en el tiempo del desplazamiento de un sistema de un grado de libertad en vibración libre no amortiguada, donde se encuentra sometido a condiciones iniciales de desplazamiento $u(0)$ y velocidad $\dot{u}(0)$, igualmente se aprecia que el periodo natural de vibración del sistema se repite cada $2\pi / \omega_n$ segundos, así mismo, la amplitud del sistema permanece constante a lo largo del tiempo, ya que el sistema no posee un dispositivo de amortiguamiento, cabe recalcar que las propiedades de vibración T_n, ω_n, f_n , solo y únicamente dependen de las propiedades mecánicas que presenta el sistema, es decir de su masa y rigidez.

Según Tejada (2011), cualquier clase de movimiento que se repita en intervalos de tiempo iguales se denomina periódicos, es decir el periodo es el tiempo necesario para realizar una vibración completa cuyas unidades son segundos, por otro lado la frecuencia es el número de vibraciones completas por unidad de tiempo, por lo que la frecuencia es la inversa del periodo. Donde las ecuaciones de periodo (T_n) y frecuencia (ω_n) natural de un sistema en vibración libre no amortiguado son las siguientes:

$$\text{Ecuación (11)} \quad T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Además un sistema ejecuta $1/T_n$ ciclos en 1 segundo por lo que se define como la frecuencia cíclica cuya unidad son los Hertz, esta frecuencia cíclica depende del periodo natural de vibración, igualmente se puede encontrar el número de ondas generadas con respecto al tiempo que dura el movimiento y viene dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación (12)} \quad f_n = \frac{1}{T_n} \quad N_{ondas} = f_n \times t$$

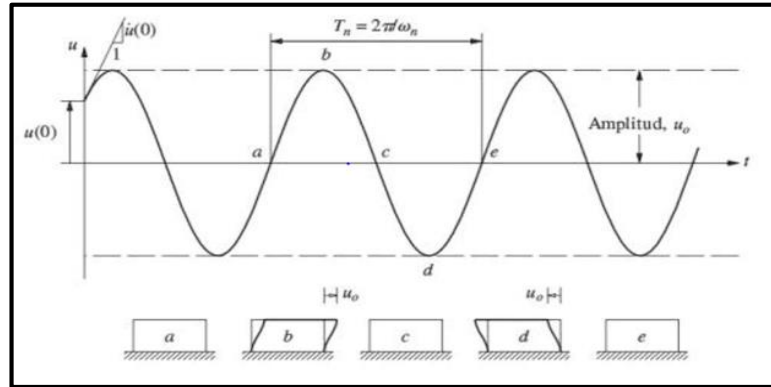


Figura 6. Vibración libre de un sistema no amortiguado.
Fuente y Elaboración: Chopra (2012)

2.5.4.4. Vibración libre amortiguada.

Se establece que $p(t) = 0$ y $c \neq 0$ en la ecuación diferencial del movimiento en los sistemas de 1GDL se obtiene que la ecuación diferencial en los sistemas de un grado de libertad con amortiguamiento es la siguiente:

Ecuación (13)
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0$$

Dónde: m, k representan a la masa y rigidez constantes definidas previamente.

c = Representa a la constante de amortiguamiento medida de la energía disipada durante un ciclo de vibración libre o un ciclo de vibración forzada armónica, además la constante c representa la capacidad intrínseca que poseen los materiales que conforman un sistema físico para disipar la energía potencial o elástica, por medio de calor o ruido, lo cual ayuda a que el sistema mecánico disminuya sus amplitudes de movimiento a lo largo de un tiempo determinado, para el caso estructural, el amortiguamiento de tipo viscoso es el más utilizado en el comportamiento dinámico, ya que si el sistema se encuentra en movimiento, el amortiguador trata de estabilizarlo hasta que pueda mantenerlo estático (Botero, 2011).

La fracción de amortiguamiento ζ es igual a la relación de la constante de amortiguamiento c y el amortiguamiento crítico c_{cr} , si dicha relación es igual a 1 la amplitud del sistema tiende a 0 en un corto tiempo. Las ecuaciones de amortiguamiento son las siguientes:

Ecuación (14)
$$c = 2\zeta m\omega_n \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}}$$

Donde:

ζ = Fracción de amortiguamiento crítico.

ω_n = Frecuencia natural de vibración y se la determina mediante la ecuación 11.

Sin embargo, mediante la Fig. 7 se observa que existen 3 tipos de movimiento debido al desplazamiento inicial, los mismos que se generan a partir de tres condiciones de amortiguamiento, las cuales son: (a) $c < c_{cr}$ o $\zeta < 1$, el sistema oscila alrededor de su propio eje con una amplitud que decrece a lo largo del tiempo, (b) $c = c_{cr}$ o $\zeta = 1$, el sistema regresa desde su desplazamiento inicial a su posición normal o de equilibrio, (c) $c > c_{cr}$ o $\zeta > 1$, el sistema regresa desde su desplazamiento inicial a su posición normal pero esta vez en un tiempo más largo.

Generalmente, la mayoría de las estructuras civiles se encuentran dentro de los sistemas subamortiguados es decir $c < c_{cr}$ o $\zeta < 1$ ya que su fracción de amortiguamiento es menor al 0.10 y el amortiguamiento propio de los materiales de construcción como el concreto y acero son de 0.05 y 0.02 respectivamente. Por otro lado según () no existen elementos o dispositivos que puedan disipar el movimiento en un 100% en un corto tiempo.

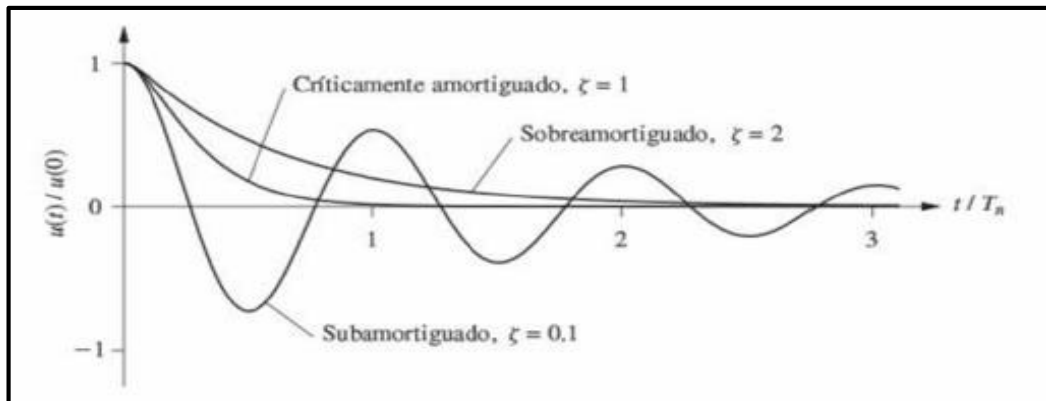


Figura 7. Sistema en vibración libre: subamortiguado, críticamente-amortiguado y sobreamortiguado.

Fuente y Elaboración: Anil Chopra (2012)

El desplazamiento que se genera en los sistemas de 1GDL en vibración libre no amortiguada, el cual sujeta a las condiciones iniciales como desplazamiento y velocidad se calcula con la ecuación 15.

Ecuación (15)

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[u_0 \cos(\omega_D t) + \frac{\dot{u}_0 + u_0 \omega_n \zeta}{\omega_D} \sin(\omega_D t) \right]$$

La velocidad, definida previamente como la primera derivada del desplazamiento respecto al tiempo se la calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación (16)
$$\dot{u}(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[u_0 \omega_D \sin(\omega_D t) + \dot{u}_0 \cos(\omega_D t) + u_0 \omega_n \xi \cos(\omega_D t) \right]$$

La aceleración de un sistema amortiguado se la define por la ecuación 17:

Ecuación (17)
$$\ddot{u}(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[-u_0 \omega_D^2 \cos(\omega_D t) - \frac{\dot{u}_0 + u_0 \omega_n \xi}{\omega_D} \sin(\omega_D t) \omega_D \right]$$

Mediante la Figura 8, se observa las respuestas en el tiempo de un sistema de 1GDL en vibración libre amortiguada y no amortiguada. La vibración libre que ejercen ambos sistemas tienen el mismo desplazamiento y velocidad inicial en un tiempo igual a 0, por lo que se puede comparar que la gráfica de la estructura amortiguada obtenida por medio de la ecuación 15 decrece en el tiempo, así mismo, el periodo (T_d) y frecuencia natural de vibración amortiguada (ω_D) carecen del mismo concepto definido previamente. La diferencia de estas propiedades es que son utilizadas en sistemas de vibración libre amortiguado y son relacionados con el periodo y frecuencia sin amortiguamiento los cuales vienen dados por las siguientes expresiones:

Ecuación (18)
$$T_d = \frac{T_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad \omega_D = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$$

Donde ζ equivale a una fracción del amortiguamiento crítico y T_n, ω_n representan al periodo y frecuencia natural sin amortiguamiento.

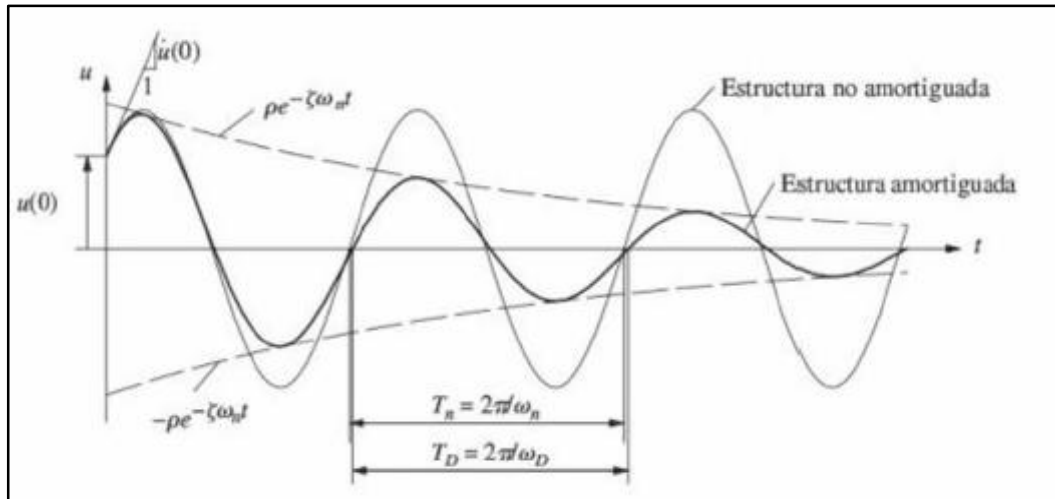


Figura 8. Respuesta en el tiempo de un sistema de 1GDL amortiguado y no amortiguado. Fuente y Elaboración: Anil Chopra (2012)

2.5.4.5. Vibración armónica.

Según Chopra (2012), las estructuras experimentan vibración armónica o forzada cuando son perturbadas de su posición de equilibrio estático mediante una carga de tipo armónica y vibran periódicamente a lo largo del tiempo, por otra parte, resulta que el estudio de la vibración armónica cuenta con diversas aplicaciones en la ingeniería sísmica como: estudiar el comportamiento de las estructuras perturbadas por cargas laterales producidas por factores climáticos como el viento, granizo entre otras, así mismo estudiar el movimiento de las estructuras debido a las cargas que ejercen los vehículos, trenes, maquinaria pesada y más.

2.5.4.6. Vibración armónica no amortiguada.

Si la carga aplicada es de la forma $p(t) = p_0 \sin \omega t$ y el amortiguamiento del sistema es $c = 0$, la ecuación diferencial de la vibración forzada armónica de los sistemas de 1GDL sin amortiguamiento es:

Ecuación (19)
$$m\ddot{u} + ku = p_0 \sin \omega t$$

Donde u, \ddot{u} representan a al desplazamiento y aceleración.

p_0 = Es la amplitud o valor máximo de la fuerza ver Fig. 9.

ω = Es la frecuencia de excitación.

La ecuación 20 presenta la solución particular para la ecuación 19, la misma que calcula el desplazamiento de los sistemas de 1GDL sin amortiguamiento en vibración armónica en estado estacionario. Esta ecuación diferencial está en función de la fuerza, rigidez y de la relación de la frecuencia de excitación con la frecuencia natural.

Ecuación (20)
$$u(t) = \frac{p_0}{k} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \sin \omega t \quad \omega \neq \omega_n$$

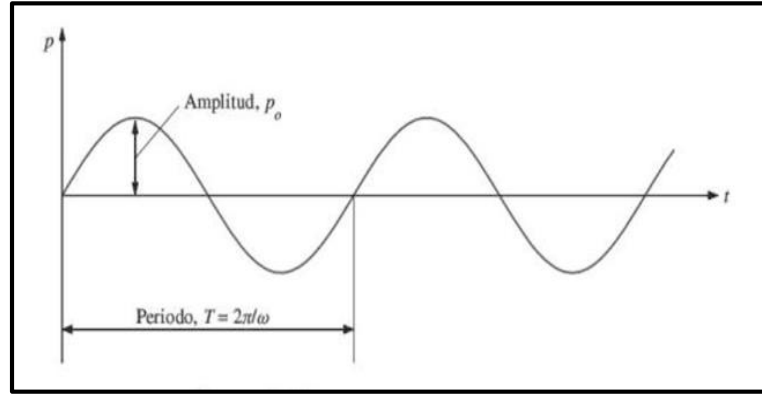


Figura 9. Amplitud de la fuerza armónica.

Fuente: Chopra (2014).

2.5.4.7. Vibración armónica amortiguada.

Se establece que $p(t) = p_0 \sin \omega t$ y que el sistema posee amortiguamiento por lo que $c \neq 0$. Por lo tanto la ecuación diferencial que controla la respuesta de los sistemas de 1GDL con amortiguamiento es:

Ecuación (21)
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \sin \omega t$$

Por otra parte, la ecuación particular que rige el desplazamiento de un sistema en vibración armónica amortiguado en estado estacionario es:

Ecuación (22)
$$u(t) = C_n \sin(\omega t) + D_n \cos(\omega t)$$

La misma que para su desarrollo presenta las siguientes soluciones particulares:

Ecuación (23)
$$C_n = \frac{p_0}{k} \left\{ \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) \right]^2} \right\}$$

Ecuación (24)
$$D_n = \frac{p_0}{k} \left\{ \frac{-2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) \right]^2} \right\}$$

Mediante la figura 10 se observa el resultado de dos respuestas en el tiempo como son: la respuesta total y la respuesta estacionaria, las mismas que se generan a partir del

movimiento de un elemento cuando es perturbado por una carga o fuerza armónica. La respuesta total o respuesta transitoria que es representada por la línea continua únicamente depende de las condiciones iniciales del sistema. Para este caso se ha desarrollado la respuesta en estado estacionario, la cual no depende de condiciones iniciales como se aprecia en las ecuaciones 20 y 22. Por otra parte, la diferencia entre el estado estacionario y el estado transitorio es la respuesta del desplazamiento en el tiempo, ya que la respuesta del desplazamiento en estado estacionario permanece a lo largo del tiempo y se da lo contrario en el sistema transitorio, es decir, su respuesta tiende a desaparecer a lo largo del tiempo.

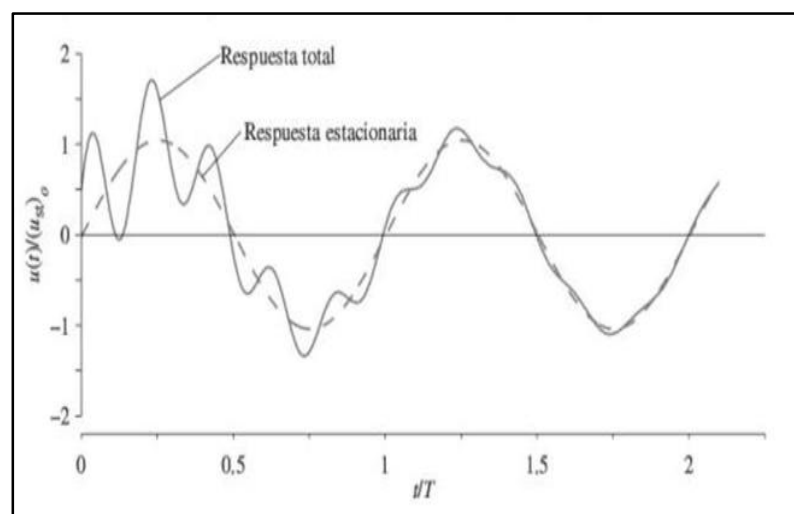


Figura 10. Respuesta en el tiempo de un sistema amortiguado, perturbado por una fuerza armónica.
Fuente: Chopra (2014).

2.5.5. Componentes de variación máxima de un sistema mecánico.

2.5.5.1. Amplitud del sistema (ρ) .

La amplitud es la variación máxima que tiene el desplazamiento y varía periódicamente con el tiempo. Como se mencionó en apartados previos, en los sistemas de 1GDL no amortiguados la amplitud es invariante en el tiempo (Ver Fig. 6), se da lo contrario cuando el sistema es amortiguado, es decir, la amplitud decrece en cada ciclo de vibración que se genera en el sistema (Ver Fig. 9). Las ecuaciones de amplitud para un sistema en vibración libre no amortiguado y amortiguado respectivamente son las siguientes:

Ecuación (19)

$$\rho = \sqrt{u_0^2 + \left(\frac{\dot{u}_0}{\omega_n}\right)^2}$$

Por medio de la ecuación 20, se calcula la amplitud inicial en los sistemas de 1GDL con amortiguamiento

Ecuación (20)

$$\rho = \sqrt{u_0^2 + \left(\frac{\dot{u}_0 + u_0 \omega_n \xi}{\omega_D} \right)^2}$$

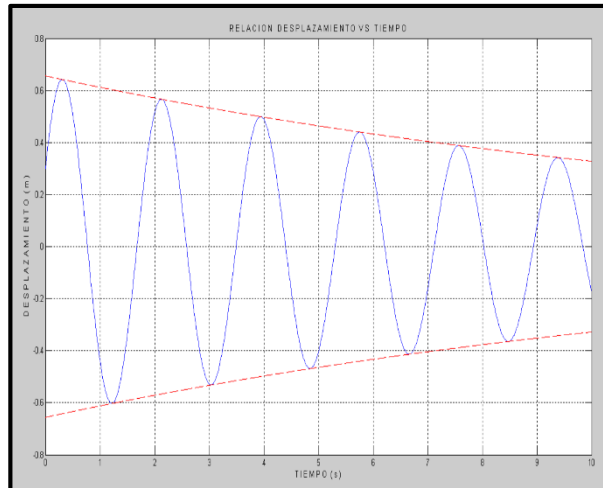


Figura 11. Vibración libre de un sistema amortiguado.
Fuente y Elaboración: El autor.

2.5.5.2. Líneas envolventes.

Las líneas envolventes o líneas tangentes (Líneas discontinuas Fig. 9) en general son las que transitan por los valores picos del desplazamiento. Para sistemas de 1GDL en vibración libre amortiguada se las define mediante la siguiente expresión

Ecuación (21)

$$envolvente = \pm \rho e^{-\xi \omega_n t}$$

2.5.6. Notas:

- El amortiguamiento tiene el efecto de reducir la frecuencia natural de ω_n a ω_D y alargar el periodo natural de T_n a T_d .
- Cuando la amplitud disminuye progresivamente, se denomina sistema sub-amortiguado entonces $\xi < 1$.
- Cuando el sistema regresa a su posición de equilibrio sin oscilar, se denomina sistema críticamente amortiguado entonces $\xi = 1$.
- Cuando el sistema no oscila y regresa a su posición normal de equilibrio, se denomina sistema sobreamortiguado entonces $\xi > 1$.

- En la figura 10 se muestra la importancia que brinda un sistema con amortiguamiento viscoso, ya que si este es mayor presenta una rapidez eficaz, la cual produce un decaimiento mayor.

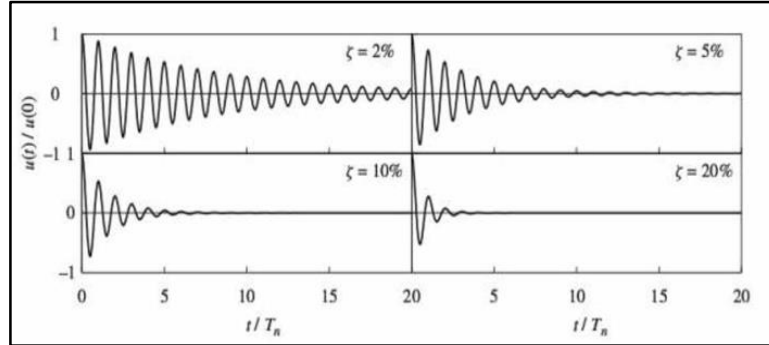


Figura 12. Resultados del desplazamiento de un sistema en vibración libre, sometido a diferentes amortiguamientos.
Fuente: Chopra (2014).

2.5.7. Energías de un sistema mecánico en vibración libre.

2.5.7.1. Energía cinética (E_k).

La energía cinética depende del movimiento y de la masa estructural que se concentra en varios puntos del elemento, también se la conoce como energía de movimiento. Las ecuaciones de la energía cinética que gobiernan en un sistema en vibración libre no amortiguado y amortiguado según Chopra (2012), respectivamente son las siguientes:

Ecuación (22)
$$E_k(t) = \frac{1}{2} m \omega_n^2 \left(-u_0 \sin(\omega_n t) + \frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \cos(\omega_n t) \right)^2$$

Ecuación (23)
$$E_k(t) = \frac{1}{2} m [\dot{u}(t)]^2$$

2.5.7.2. Energía potencial (E_s).

La energía potencial es la energía que presenta un elemento cuando sufre una deformación, esta energía depende de la rigidez y de la deformación del cuerpo. Las ecuaciones de la energía potencial que gobiernan en un sistema en vibración libre no amortiguado y amortiguado según Chopra (2012), respectivamente son las siguientes:

Ecuación (24)
$$E_s(t) = \frac{1}{2} k \left(u_0 \cos(\omega_n t) + \frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \right)^2$$

Ecuación (25)

$$E_s(t) = \frac{1}{2} k [u(t)]^2$$

2.5.7.3. Energía total (E_t).

La energía de entrada o energía total de un sistema de 1GDL al impartirle condiciones iniciales como desplazamiento y velocidad es:

Ecuación (26)

$$E_t = \frac{1}{2} k u_0^2 + \frac{1}{2} m \dot{u}_0^2$$

Del mismo modo, la energía total está compuesta por la suma de la energía cinética que depende de la masa del elemento y de la energía potencial que está sujeta a la rigidez del sistema. La energía total es independiente del tiempo, por ello implica la conservación de las dos energías durante la vibración libre de un sistema no amortiguado. Observar Fig. 13.

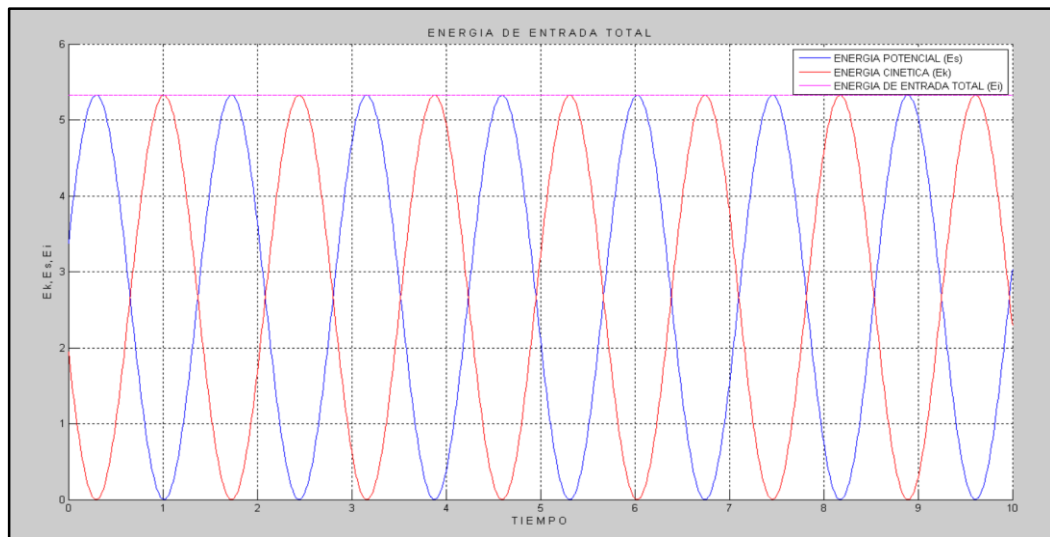


Figura 13. Energías cinética potencial y total de un sistema libre no amortiguado.
Fuente y Elaboración: El autor

2.5.7.4. Energía de disipación (E_d).

En los sistemas que presentan amortiguamiento, las energías: cinética y potencial se las calcula mediante las ecuaciones 23 y 25 Fig. 12, en donde $\dot{u}(t)$ es representada por la ecuación 16 y $u(t)$ equivale a la ecuación 15. Por otra parte, estas energías decrecen a lo largo del tiempo mientras que la energía disipada (Ecu. 27) por el amortiguamiento aumenta en cada intervalo de tiempo Fig. 14.

Ecuación (27)

$$E_D = \int_{t_0}^{t_f} c \dot{u}^2$$

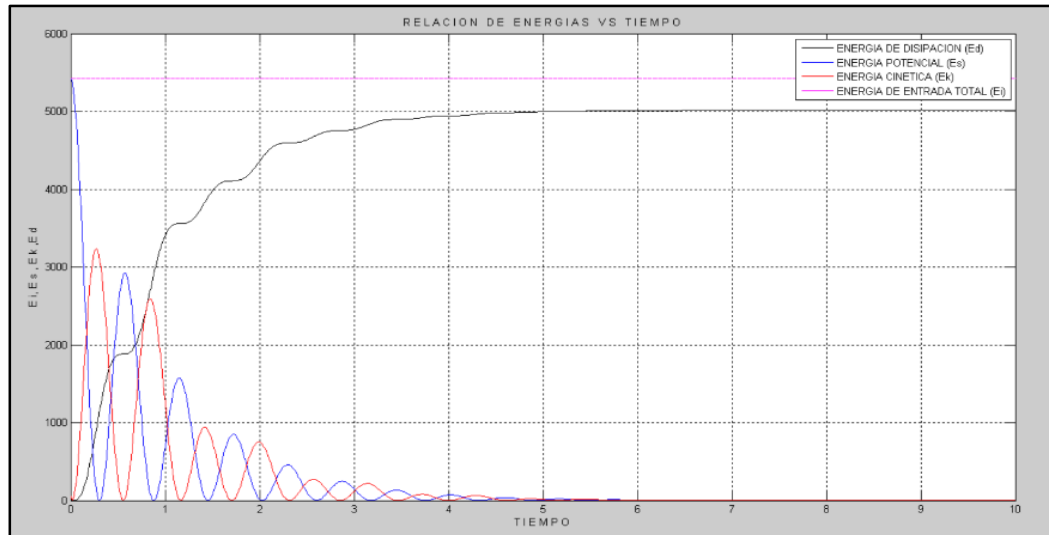


Figura 14. Energía cinética, potencial, de disipación y total de un sistema en vibración libre amortiguada.

Fuente y Elaboración: El autor

2.5.8. Análisis modal aplicado en sistemas de varios grados de libertad.

Se consideran sistemas de varios grados de libertad (SVGDL) ver Fig. 15 cuando una estructura se compone por una serie de masas concentradas unidas por una serie de columnas que proporcionan rigidez al elemento, así mismo el sistema posee un amortiguador que ayuda a la disipación de energía.

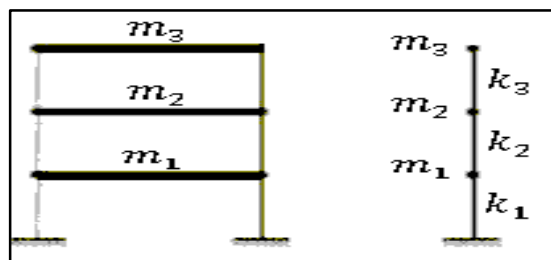


Figura 15. Pórtico plano idealizado como un sistema de varios grados de libertad

Fuente y Elaboración: El autor.

En Fig. 16 se representa un sistema mecánico masa-resorte-amortiguador de varios grados de libertad (VGDL), en el cual las fuerzas externas son aplicadas en las diferentes masas que posee el sistema. Las fuerzas externas provocan que la estructura sufra un desplazamiento relativo desde la base hasta la parte superior de la estructura.

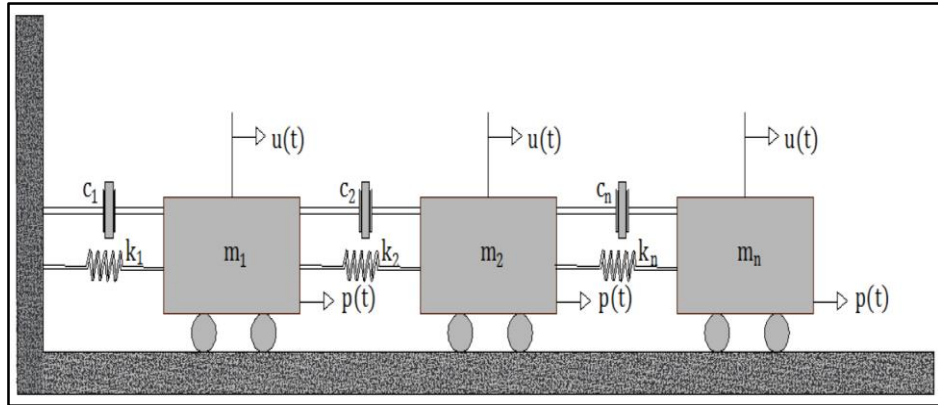


Figura 16. Representación de un sistema mecánico masa-resorte-amortiguador de varios grados de libertad.

Fuente y elaboración: El autor

Para el cálculo de las deformaciones o desplazamientos de los sistemas de varios grados de libertad resulta ventajoso utilizar el análisis modal que es un método que determina los diferentes modos de vibración Fig. 17, así mismo permite encontrar los desplazamientos máximos que se efectúan en un sistema estructural y estima las propiedades de vibración como la frecuencia y por ende el periodo natural.

La ecuación $m\ddot{u} + c\dot{u} + k = p(t)$, es utilizada para los sistemas de un grado de libertad como para los sistemas de varios grados de libertad, la diferencia entre estos dos sistemas es el concepto de términos m, c, k , ya que estos parámetros se utilizan en sistemas de un solo grado de libertad que se refieren a la masa, amortiguamiento y rigidez del sistema respectivamente. Sin embargo cuando se trabaja con sistemas de varios grados de libertad Fig. 15 los parámetros son matrices, lo cual se representa mediante la siguiente ecuación:

Ecuación (28) $M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p(t)$, donde:

M = Matriz de masas.

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_n \end{pmatrix}$$

C = Matriz de amortiguamientos.

$$C = \begin{pmatrix} c_1 + c_n & -c_n \\ -c_n & c_n \end{pmatrix} \quad \xi = \frac{c}{2m\omega_n}$$

K = Matriz de rigidez.

$$K = \begin{pmatrix} k_1 + k_n & -k_n \\ -k_n & k_n \end{pmatrix}$$

Como se puede observar, estas matrices de masa M , rigidez K y amortiguamiento C son simétricas y cuadradas conocidas, donde su tamaño $n \times n$ depende de los grados de libertad que posee el sistema, en cambio u, \dot{u}, \ddot{u} son vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración en coordenadas nodales y su tamaño es de $n \times 1$. Seguidamente para una solución eficiente en los sistemas de varios grados de libertad aplicando el análisis modal, resulta transformar u, \dot{u}, \ddot{u} de la ecuación 28 en coordenadas modales mediante las siguientes expresiones: $u = \phi q$, $\dot{u} = \phi \dot{q}$, $\ddot{u} = \phi \ddot{q}$, por lo cual se obtiene la siguiente ecuación diferencial, la misma que se transforma en un conjunto de ecuaciones desacopladas:

Ecuación (29) $M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = P(t)$ es decir:

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_n \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_n \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_n \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_n \end{pmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_n \end{bmatrix}$$

Donde:

M = Matriz diagonal de masas modales generalizadas M_n .

Ecuación (30) $M_n = \phi^T m \phi$

C = Matriz no diagonal con los coeficientes de amortiguamiento C_{nr} .

Ecuación (31) $C_n = \phi^T c \phi$

K = Matriz no diagonal de las rigideces modales generalizadas K_n .

Ecuación (32) $K_n = \phi^T k \phi$

Donde:

ϕ = Matriz de los modos de vibración observar Ecuación (35)

$P(t)$ = Vector columna de las fuerzas modales generalizadas $P_n(t)$

q, \dot{q}, \ddot{q} = Son las condiciones iniciales del sistema en coordenadas modales, que representan a los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente. Las siguientes ecuaciones diferenciales permiten transformar las condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad de coordenadas nodales a modales

$$\text{Ecuación (33)} \quad q_{n(0)} = \frac{\phi_n^T m u_0}{\phi_n^T m \phi_n} \quad \dot{q}_{n(0)} = \frac{\phi_n^T m \dot{u}_0}{\phi_n^T m \phi_n}$$

Donde:

ϕ_n = Vector de modos de vibración.

m = Masas nodales.

2.5.8.1. Frecuencias naturales (ω_n).

Se definió previamente el concepto de frecuencia natural, en donde la ecuación para el cálculo de las respectivas frecuencias para un sistema de varios grados de libertad viene dada por la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación (34)} \quad \det[k - m\omega_n^2] = 0$$

det = Determinante de las matrices.

2.5.8.1. Modos de vibración (ϕ_n).

Los modos de vibración representan las diferentes formas de vibrar de un sistema estructural (Obsérvese figura 1), que se encuentra perturbado de su posición normal por una fuerza externa o condiciones iniciales. Donde la ecuación general para los modos de vibración es la siguiente:

$$\text{Ecuación (35)} \quad [k - m\omega_n^2] \phi_n = 0$$

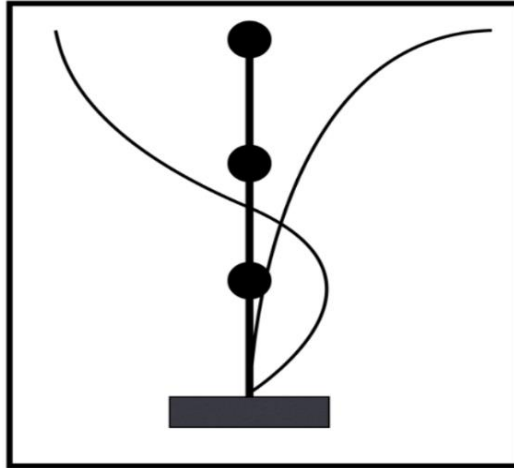


Figura 17. Modos de vibración de un sistema estructural.

Fuente y Elaboración: El autor

2.5.9. Matriz modal, espectral e identidad.

La matriz modal ϕ , es simétrica, en ella se encuentran los valores de los desplazamientos máximos de cada grado de libertad, además cada columna de esta matriz representa los modos de vibración de la estructura, en cambio la matriz espectral Ω y matriz identidad I , cada una de ellas ensambla los valores de las frecuencias ω_n^2 , y valores unitarios en su diagonal principal respectivamente. Seguidamente se muestra las expresiones de las matrices modal, espectral e identidad:

$$\text{Ecuación (36)} \quad \phi = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{pmatrix} \quad \Omega = \begin{pmatrix} \omega_1^2 & 0 \\ 0 & \omega_n^2 \end{pmatrix} \quad I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2.5.10. Espectro de diseño a partir de un registro de aceleraciones sísmicas desarrollando el método de aceleración lineal.

Primeramente se define los conceptos básicos utilizados para obtener el espectro de diseño a partir de un historial de aceleraciones sísmicas desarrollado por el método de aceleración lineal para un SDOF:

2.5.10.1. Aceleración sísmica.

Es la aceleración que se da en el suelo durante un tiempo determinado por la presencia de una fuerza, en este caso el sismo.

2.5.10.2. Método de aceleración lineal.

El método de aceleración lineal, considera que en la respuesta del sistema la aceleración entre dos instantes de tiempo varía linealmente, además busca las respuestas en el tiempo del desplazamiento, velocidad y aceleración, a continuación se presenta la ecuación que gobierna en un sistema de un grado de libertad ante la acción sísmica definida por su acelerograma (Aguiar, 2006).

Ecuación (37)
$$m\ddot{q} + c\dot{q} + kq = -m\ddot{U}_g$$

Donde m, c, k respectivamente representan la masa, amortiguamiento y rigidez de un SDOF, así mismo \ddot{q}, \dot{q}, q , sustituyen a la aceleración, velocidad y desplazamiento que son las respuestas en el tiempo y \ddot{U}_g que es la aceleración del suelo.

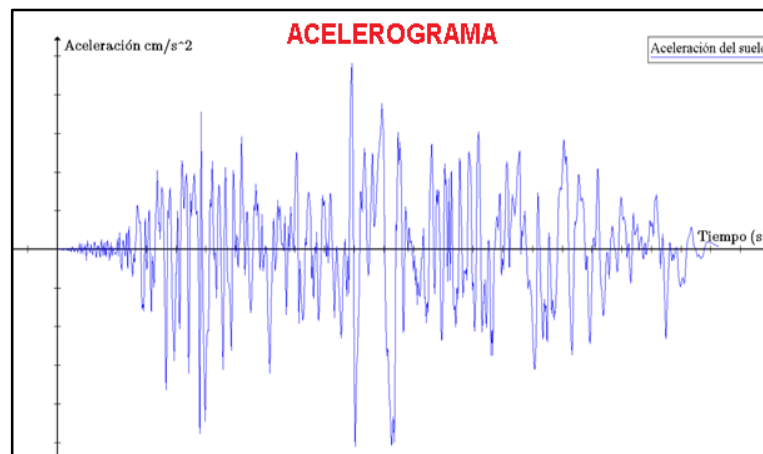


Figura 18. Acelerograma partir de un registro de aceleraciones sísmicas.
Fuente: El autor.

2.5.10.3. Espectros de respuesta.

Es la representación gráfica de la respuesta máxima de la estructura, medida en valor absoluto, modelada como un sistema de un grado de libertad, en función del período natural de vibración el sistema, es decir, el espectro de respuesta permite obtener la información apropiada de la respuesta máxima que se da en una familia de sistemas de un grado de libertad, que se encuentran sometidos a un solo sismo (Rochel Awad, 2012).

Así mismo según Aguiar (2006), puntualiza que el espectro de respuesta es la respuesta máxima de un conjunto de osciladores de un grado de libertad que tienen igual

amortiguamiento y todos estos son sometidos a un registro de aceleraciones proporcionadas.

En la figura 19 se indica el procedimiento previo para obtener un espectro de respuesta: Primeramente se considera que cada oscilador posee diferentes periodos de vibración pero un mismo amortiguamiento. Los osciladores se encuentran sometidos a la acción dinámica de un sismo, por la cual cada uno de estos presenta una respuesta diferente con un valor máximo absoluto, dicho valor es relacionado con el periodo de vibración mediante una gráfica la misma que presenta el espectro de respuesta.

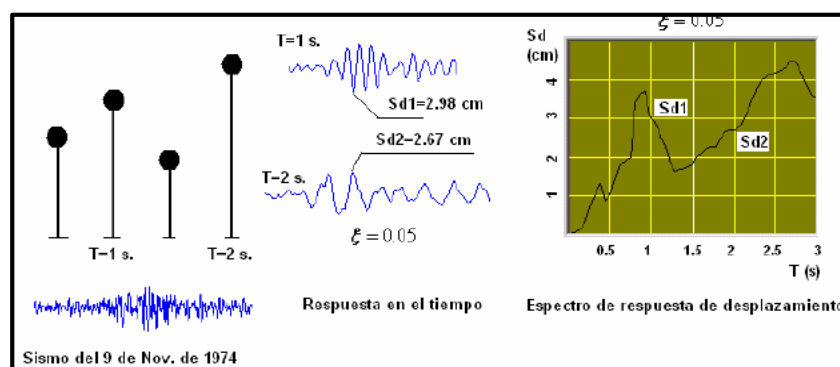


Figura 19. Procedimiento para el cálculo de los espectros de respuesta.
Fuente y Elaboración: Aguiar (2006).

En la figura 20 se aprecia los espectros de respuesta elásticos tanto de desplazamientos, velocidad y aceleración, los cuales se encontraron tomando las respuestas máximas en valor absoluto de \ddot{q}, \dot{q}, q las mismas que respectivamente se las denomina con la siguiente simbología Psa, Psv, Sd .

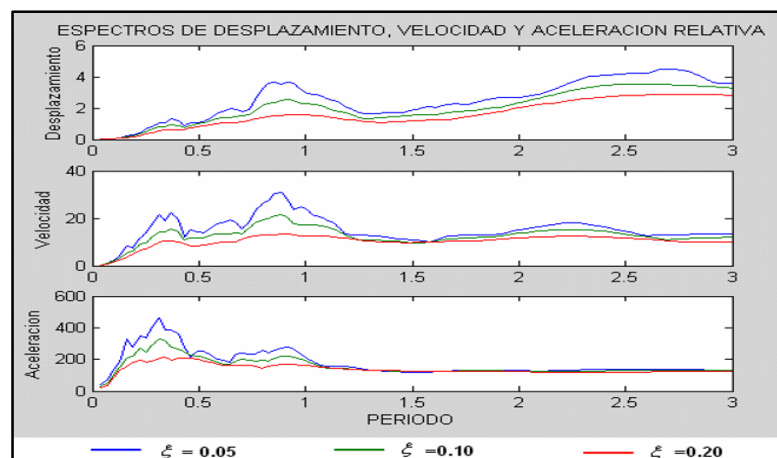


Figura 20. Espectros de respuesta del sismo del 09 de noviembre de 1971, sometidos a diferentes amortiguamientos.
Fuente: Aguiar (2004).

2.5.10.4. Espectro de diseño.

Según, Rochel (2012), son herramientas las cuales permiten diseñar construcciones civiles, las mismas que tienen en cuenta varios factores y condiciones sismo-tectónicas tanto regionales como locales, dependiendo del subsuelo de fundación, así mismo, según Chopra (2012), un espectro de diseño debe satisfacer varios requisitos, ya que se lo ha construido pensando en el diseño, seguridad y evaluación de estructuras, con el motivo de resistir a sismos futuros. Para la elaboración del espectro de diseño (línea continua “roja”) según el método de aceleración lineal, toma en cuenta el promedio de los puntos de los espectros de respuesta como se observa en Figura 21.

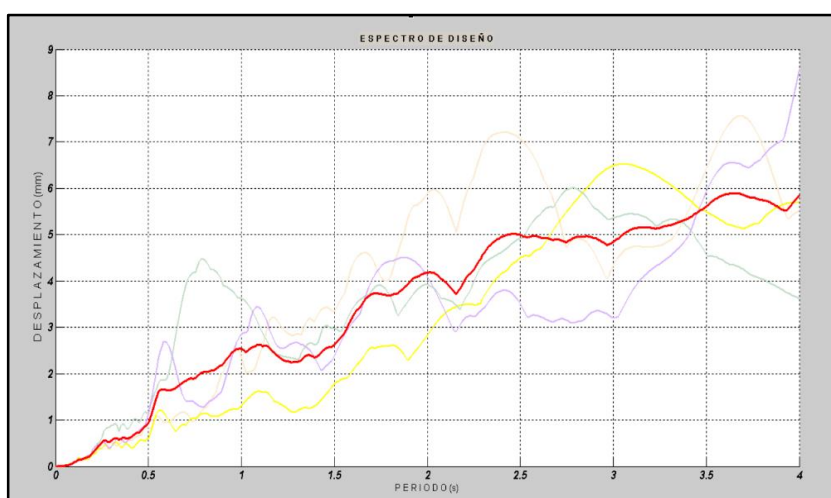


Figura 21. Espectro de Desplazamiento
Fuente y Elaboración: El autor

2.5.11. Espectro de diseño mediante la norma “NEC-2015”.

Según la NEC (2015), considera un espectro de diseño de tipo elástico para un fragmento de amortiguamiento respecto al crítico del 5%, que se basa en coeficientes de suelo dependiendo el perfil del tipo de subsuelo, igualmente el espectro de diseño necesita basarse en una zona sísmica, ya que el Ecuador se encuentra dividido en zonas de intermedia a muy alta peligrosidad sísmica. En la Figura 22 se ilustra el espectro elástico de aceleraciones brindado por la NEC (2015), el cual posee las siguientes ecuaciones para su respectiva realización.

Ecuación (38)

$$S_a = zF_a \left(1 + (\eta - 1) \frac{T}{T_0} \right)$$

Ecuación (39)

$$S_a = \eta z F_a$$

Ecuación (40)

$$S_a = \eta z F_a \left(\frac{T_c}{T} \right)^r$$

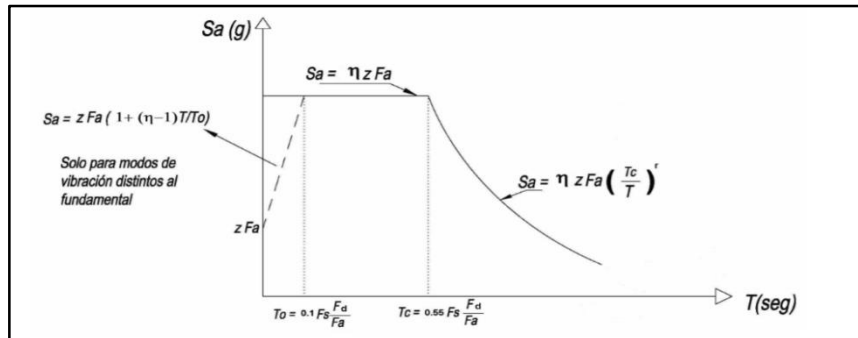


Figura 22. Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones.
Fuente: Norma ecuatoriana de la construcción “NEC” (2015)

Donde:

Z = Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g . En la figura 23 se muestra la división sísmica del Ecuador y por medio de la tabla 1 los valores correspondientes para Z que dependen de la zona de sismicidad.

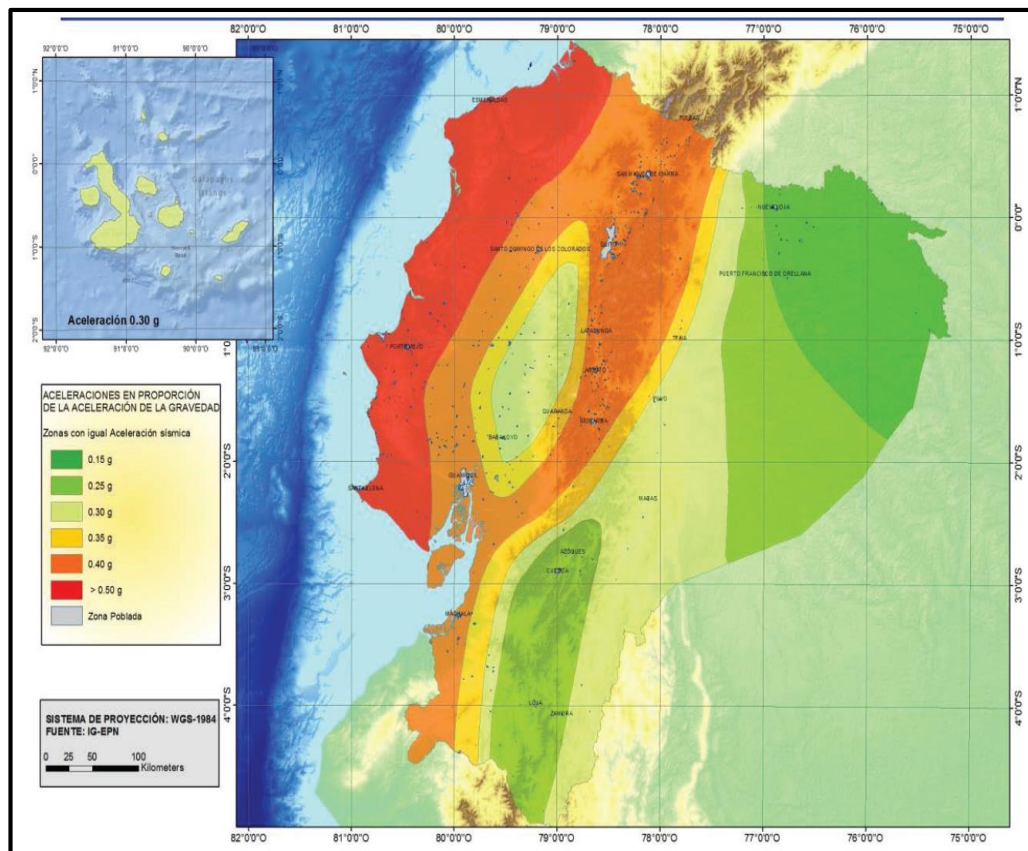


Figura 23. Zonas sísmicas del Ecuador.
Fuente y Elaboración: NEC (2015).

Tabla 1. Valores del factor Z.

Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Peligro Sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente y Elaboración: NEC (2015)

η = Razón entre la aceleración espectral $S_a(T = 0.1s)$ y el PGA (Aceleración máxima del suelo) para el periodo de retorno seleccionado.

F_a = Coeficiente de ampliación de suelo en la zona de periodo corto. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de sitio. Depende del tipo de suelo y del coeficiente Z y sus valores se los especifica por medio de la tabla 2.

Tabla 2. Coeficiente de ampliación del suelo en periodo corto F_a

PERFIL DE SUELO	FACTOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85

Fuente: NEC (2015)

F_d = Coeficiente de ampliación de suelo. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio. Depende de las características del suelo y de la zona de sismicidad ver tabla 3.

Tabla 3. Coeficiente de ampliación F_d

PERFIL DE SUELO	FACTOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5

Fuente: NEC (2015)

F_s = Coeficiente de ampliación de suelo. Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencias de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos.

Tabla 4. Coeficiente del comportamiento no lineal de los suelos F_s

PERFIL DE SUELO	FACTOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2

Fuente: NEC (2015)

S_a = Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (expresado como fracción de la aceleración de la gravedad g). Depende del periodo o modo de vibración de la estructura.

T = Periodo fundamental de vibración de la estructura.

T_0 = Periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representan el sismo de diseño.

Ecuación (41)
$$T_0 = 0.1 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

T_c = Periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representan el sismo de diseño.

Ecuación (42)
$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

r = Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto $r = 1$ para todos los suelos, excepto del suelo tipo E, $r = 1.5$ para tipo de suelo E

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

En el presente trabajo se realizó una investigación teórica y práctica en las ramas de ingeniería estructural e informática. Esta investigación contribuye a la solución de problemas en el análisis dinámico de estructuras, ya que para su cálculo, previamente se realiza un procedimiento extenso, por tal motivo nace la idea de automatizar el procedimiento de la dinámica estructural para finalmente plasmar los resultados en la pantalla de un ordenador.

3.2. Estado actual del Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica “VLEE”

El “VLEE” se encuentra inoperativo desde hace varios años por distintos factores, es por ello que se emprende conjuntamente con un grupo de docentes investigadores y estudiantes pertenecientes a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja, elaborar nuevos experimentos para ser incorporados al laboratorio virtual, así mismo proponer un nuevo rediseño de la interfaz gráfica de la plataforma.

3.3. Interfaz gráfica del laboratorio virtual

Al observar las diferentes dificultades de vinculación entre el usuario y el laboratorio virtual, se propone el rediseño de una nueva interfaz gráfica, ya que se pretende que la misma brinde un menú adecuado para la apropiada utilización del laboratorio. Igualmente generar un ambiente propicio, amigable y de fácil manejo, con el fin de que el usuario que acceda al “VLEE” no se le presente inconvenientes en el desarrollo de su trabajo.



Figura 24. Interfaz gráfica actual del "VLEE".
Fuente y Elaboración: El autor.

3.4. Laboratorios de la plataforma virtual de ingeniería sísmica

Actualmente la plataforma virtual está conformada por los siguientes laboratorios: “Análisis Dinámico”, “Puentes”, “Edificios” y “Elementos de Concreto Reforzado”, así mismo dentro de estos laboratorios existen varios experimentos que permiten el análisis y diseño de estructuras.

Dentro del laboratorio de “Análisis Dinámico” se realizó los siguientes experimentos: Análisis Modal (Modal Analysis), que utiliza la metodología del análisis modal para analizar el comportamiento de un pórtico plano de “n” grados de libertad sometida a condiciones iniciales y a una carga armónica. Espectro (Spectrum), que considera la elaboración del espectro de diseño tomando como criterio el promedio de los “n” espectros de respuesta que se generan a partir de un historial de aceleraciones del suelo. Actualmente se encuentran implementados los siguientes experimentos como: “SDOF” (Sistemas de un grado de libertad), que permite analizar estructuras como la que se aprecia en la figura 3, “2DOF-Dynamics” (Sistemas de dos grados de libertad), y “2S-Porch”.

3.5. Funcionamiento del Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica “VLEE”.

El laboratorio virtual opera con varios software, uno de ellos es MATLAB R, quien trabaja conjuntamente con Visual Studio para respectivamente ejecutar y visualizar los resultados.

3.5.1. Descripción general de la solución.

Como se aprecia en la figura 25, todas las herramientas o laboratorios trabajan en tres fases mediante las cuales se obtienen los resultados esperados. La primera fase comprende que el usuario ingrese los datos de entrada del experimento requerido, una vez ingresados todos los datos de entrada y ejecutando el experimento, Visual Studio genera un archivo de texto .txt con todos los datos de entrada. Seguidamente en la segunda fase los códigos realizados en MATLAB son capaces de leer el archivo de texto con los datos de entrada para luego procesarlos y generar un archivo de texto con los resultados de salida. Finalmente en la tercera fase Visual Studio lee el archivo de texto de salida y proyecta los resultados en la pantalla del ordenador.

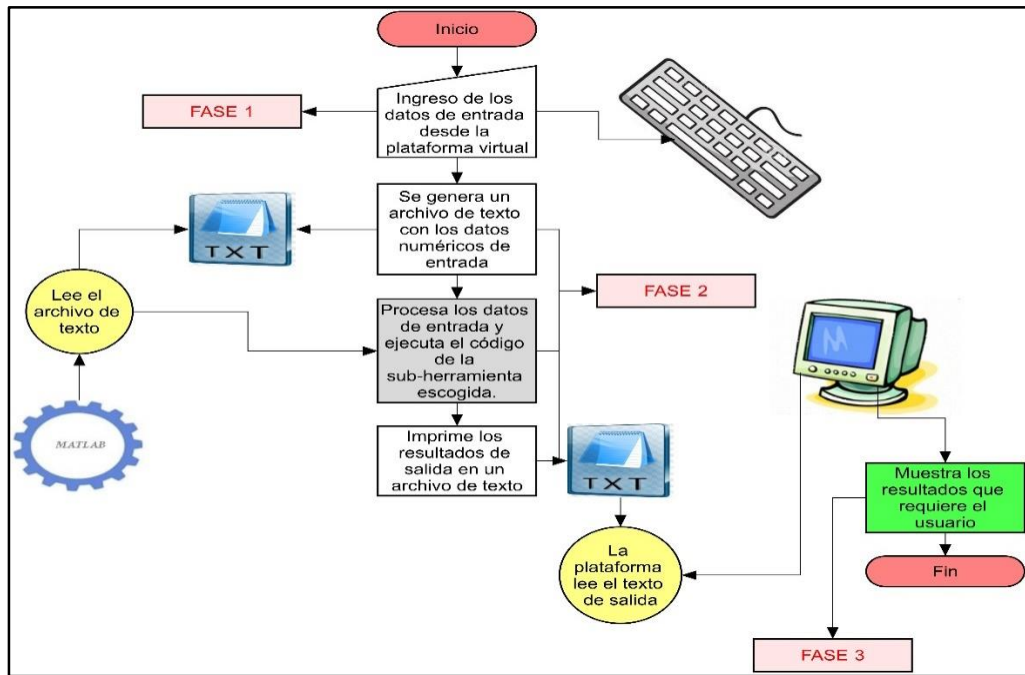


Figura 25. Descripción general del funcionamiento de la plataforma virtual.
Fuente y Elaboración: El autor

3.6. Elaboración de experimentos para el Laboratorio Virtual “VLEE”.

3.6.1. Programa master para el experimento de “Análisis Modal”.

El programa master del experimento “Análisis modal” posee cuatro funciones que son: Análisis modal en vibración libre no amortiguada y amortiguada, Análisis modal en vibración armónica no amortiguada y amortiguada como se aprecia en la Figura 21. Estas funciones analizan la respuesta en el tiempo de una estructura de “n” grados de libertad sometida a diferentes cargas y condiciones iniciales. El programa master se elaboró en MATLAB con el propósito de ser designado como el núcleo para la incorporación de futuras funciones, las cuales serán desarrolladas por personas interesadas en el análisis dinámico estructural, así mismo este programa principal es el encargado de ejecutar la función escogida por el usuario, en donde cada función es representada por un numero de Caso (Obsérvese figura 26), es decir si el usuario escogiera la función “Análisis modal en vibración libre no amortiguada” sería igual al Caso 1. Este número (1) se encontrara en la posición (1,1) del archivo de texto que también poseerá los datos de entrada del caso escogido, véase la figura 27.

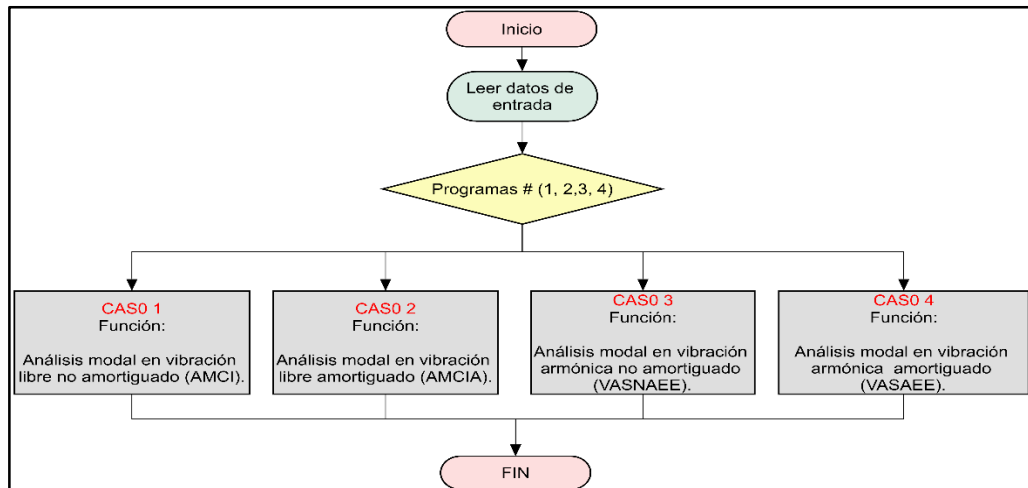


Figura 26. Programa Master del laboratorio "Análisis Modal"
Fuente y elaboración: El autor.

En la figura 27 se observa el modelo general del archivo de texto, el cual se genera mediante Visual Studio. Este archivo de texto contiene los datos de entrada, y generalmente en las posiciones (1,1), (2,1), (2,2), (2,3) y (2,4) se encuentra: el número de función que escoge el usuario, el número de grados de libertad, el tiempo inicial, tiempo final y el incremento de tiempo en el que se desee analizar la estructura respectivamente. Para el Caso 1 en las filas 3, 4, 5, y 6 se encontraran los vectores de masa, rigidez, desplazamientos iniciales en coordenadas nodales y velocidades iniciales en coordenadas nodales. Para el Caso 2 en las filas 3, 4, 5, 6 y 7 se encontraran los vectores de masa, rigidez, amortiguamiento, desplazamientos iniciales en coordenadas nodales y velocidades iniciales en coordenadas nodales. Para el Caso 3 en las filas 3, 4, 5, y 6 se encontraran los vectores de masa, rigidez, carga armónica y la frecuencia de movimiento. Para el Caso 4 en las filas 3, 4, 5, 6 y 7 se encontraran los vectores de masa, rigidez, amortiguamiento, carga armónica y la frecuencia de movimiento.

1	1				
2	2	0	10	0.01	
3	10	200			
4	200	100			
5	5	-3			
6	0	0			

Figura 27. Archivo de texto que contiene los datos de entrada de la función "Análisis modal en vibración libre no amortiguada"
Fuente y Elaboración: El autor

3.6.1.1. Código Máster del laboratorio de “Análisis modal”.

Seguidamente se presenta el código master del experimento Análisis modal, el mismo que posee las 4 funciones previamente descritas, así mismo el código master se lo elaboró en MATLAB.

```
% CÓDIGO MÁSTER PARA REALIZAR LOS DIFERENTES CASOS DEL ANALISIS MODAL.

ruta='C:\Users\USUARIO\Desktop\CARPETA TRABAJOS TESIS\codigo
matlab\TESIS\';

nombreArchivo='DATOS DE ENTRADA.txt';

fid =fopen([ruta nombreArchivo ], 'r');

formato='%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f';

ma = textscan(fid,formato); ma= Matriz de datos dependiendo el caso.

c1=ma{1};

% Diferentes casos del análisis modal.

switch c1(1);

case 1

c4=ma{4};

dimension=c1(2)

for i=1:dimension

    aux=ma{i};

    for j=1:7

        auxx=aux(j);

        txt2(j,i)=auxx(1);

    end

end

[K]=AMCI(txt2(4,:),txt2(3,:),c2(2),c4(2),c3(2),txt2(5,:),txt2(6,:),txt2
(7,:),c1(2)); %AMCI(k_,m_,t0,pa,tf,uo,upu,Hp,n);

case 2

c4=ma{4};

dimension=c1(2)

for i=1:dimension

    aux=ma{i};
```

```

        for j=1:8
            auxx=aux(j);
            txt2(j,i)=auxx(1);
        end
    end

    [K]=
    AMCIA(txt2(4,:),txt2(3,:),txt2(5,:),c2(2),c4(2),c3(2),txt2(6,:),txt2(7,
    :),txt2(8,:),c1(2)); %AMCIA(k_,m_,c_,t0,pa,tf,u0,up,Hp,n);

    case 3

    c4=ma{4};

    dimension=c1(2)

    for i=1:dimension
        aux=ma{i};

        for j=1:7
            auxx=aux(j);
            txt2(j,i)=auxx(1);
        end
    end

    [K]=
    VASNAEE2(txt2(4,:),txt2(3,:),c2(2),c4(2),c3(2),txt2(5,:),txt2(6,:),txt2(
    7,:),c1(2)); %VASNAEE2(k_,m_,t0,pa,tf,Po,W,Hp,n);

    case 4

    c4=ma{4};

    dimension=c1(2)

    for i=1:dimension
        aux=ma{i};

        for j=1:8
            auxx=aux(j);
            txt2(j,i)=auxx(1);
        end
    end

    [K]=
    VASAE2(txt2(4,:),txt2(3,:),txt2(5,:),c2(2),c4(2),c3(2),txt2(6,:),txt2(
    7,:),txt2(8,:),c1(2)); %VASAE2(k_,m_,c_,t0,pa,tf,Po,W,Hp,n)

```

end

3.6.2. Función análisis modal en vibración libre no amortiguada (AMCI) Caso 1.

Esta función permite encontrar las diferentes respuestas en el tiempo de una estructura sometida a condiciones iniciales. Las respuestas en el tiempo son: desplazamiento, velocidad y aceleración, las cuales permanecen constantes a lo largo del tiempo, debido a que el sistema no cuenta con un dispositivo de amortiguamiento para la disipación de las mismas, además el sistema posee propiedades mecánicas como: masa y rigidez, en donde el tiempo y el incremento de evaluación de la estructura es un dato proporcionado por el usuario, así mismo esta función utiliza la metodología del análisis modal para analizar estructuras de “n” grados de libertad, finalmente esta función principal cuenta con funciones secundarias que son: Armatrizk (Arma la matriz de rigidez k), Armatrizm (Arma la matriz de masa m), VLNA (Desarrolla la Vibración libre no amortiguada de sistemas de un grado de libertad). En la Figura 28 se observa el procedimiento que realiza la función en donde los códigos elaborados de cada función se los expone en los anexos: A, L, J y B.

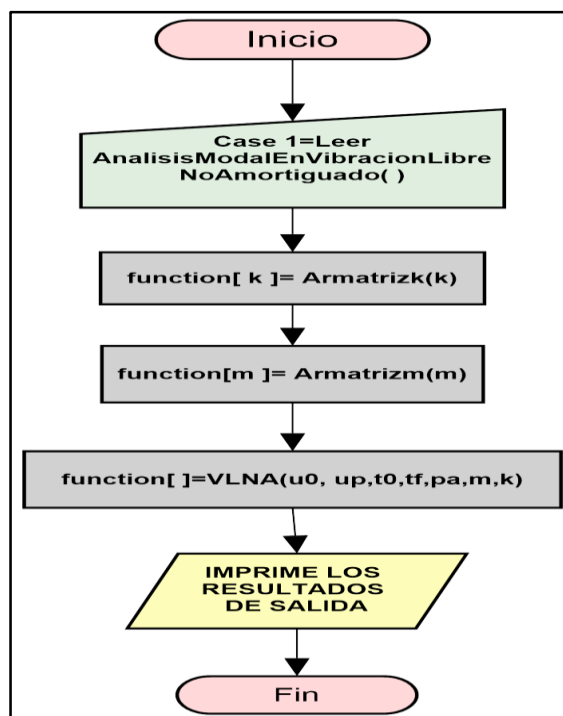


Figura 28. Diagrama de flujo de la herramienta análisis modal en vibración libre no amortiguado. Fuente y Elaboración: El autor.

3.6.1. Función análisis modal en vibración libre amortiguada (AMCIA)” Caso 2.

Al igual que la función AMCI descrita previamente, esta función permite encontrar las respuestas en el tiempo del desplazamiento, velocidad y aceleración a partir de condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad. La diferencia de esta función es que en las propiedades mecánicas del sistema se componen de masa, rigidez más la constante de amortiguamiento, quien es la encargada de la disipación de energía, por lo tanto las respuestas en el tiempo del desplazamiento, velocidad y aceleración no son constantes, es decir, tienden a cero. Igualmente esta función utiliza la metodología del análisis modal para analizar estructuras de “n” grados de libertad. Finalmente esta función principal cuenta con funciones secundarias como son: Armatrizk (Arma la matriz de rigidez k), Armatrizm (Arma la matriz de masa m), Armatrizc (Arma la matriz de amortiguamiento c), VLA (Desarrolla la Vibración libre amortiguada de sistemas de un grado de libertad). En la Figura 29 se observa el procedimiento que realiza la función, en donde los códigos elaborados de cada función se los expone en los anexos: C, L, J, K, D y E.

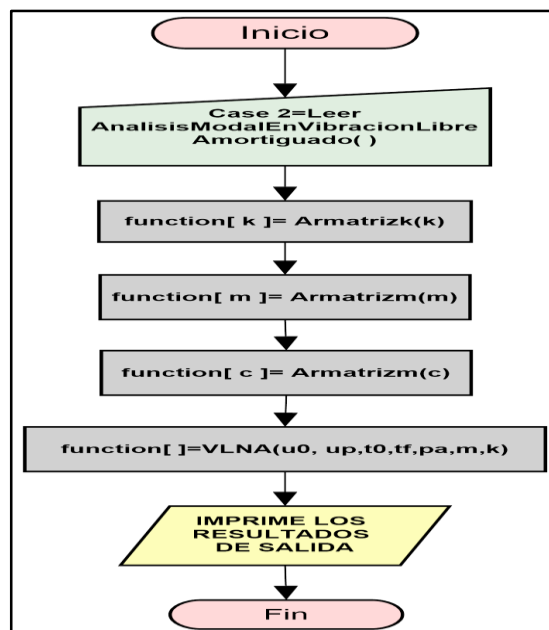


Figura 29. Diagrama de flujo de la herramienta análisis modal en vibración libre amortiguado.
Fuente y Elaboración: El autor.

3.6.2. Función análisis modal en vibración armónica no amortiguada en estado estacionario (VASNAEE) Caso 3.

La función VASNAEE, permite encontrar por medio de la metodología del análisis modal los desplazamientos que se generan en una estructura de “n” grados de libertad, si dicha estructura se encuentra perturbada por una carga armónica, así mismo el sistema posee

propiedades mecánicas como: masa y rigidez, en donde el tiempo y el incremento de evaluación de la estructura dependen del usuario. Finalmente la función VASNAEE cuenta con funciones secundarias como son: Armatrizk (Arma la matriz de rigidez k), Armatrizm (Arma la matriz de masa m), Desplazamiento1VASNAEE (Desarrolla el desplazamiento de un sistema en vibración armónica no amortiguado en estado estacionario). En la Figura 30 se indica el procedimiento que realiza la función VASNAEE. Los códigos elaborados de las funciones secundarias se los expone en los siguientes anexos: F, L, J y G.

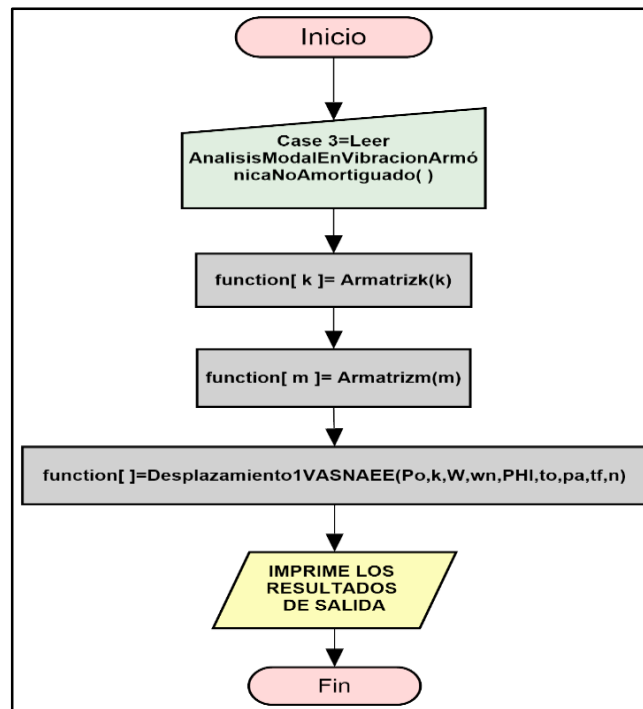


Figura 30. Diagrama de flujo de la herramienta análisis modal en vibración armónica no amortiguada.
Fuente Y Elaboración: El autor.

3.6.3. Función análisis modal en vibración armónica amortiguada en estado estacionario (VASAEE)” Caso 4.

Esta función permite encontrar la respuesta en el tiempo del desplazamiento de una estructura sometida a una carga armónica, además el sistema posee propiedades mecánicas como masa amortiguamiento y rigidez, en donde el tiempo y el incremento de evaluación de la estructura dependen del usuario, asimismo esta función utiliza la metodología del análisis modal para analizar pórticos de “n” grados de libertad, seguidamente esta función principal cuenta con funciones secundarias como son: Armatrizk (Arma la matriz de rigidez k), Armatrizm (Arma la matriz de masa m), Armatrizc (Arma la matriz de amortiguamiento c), Desplazamiento1VASAEE (Desarrolla el

desplazamiento de un sistema en vibración armónica amortiguado en estado estacionario). En la Figura 31 se indica el procedimiento que realiza la función VASAE. Los códigos elaborados de las funciones secundarias se los expone en los anexos: H, L, J, K y I.

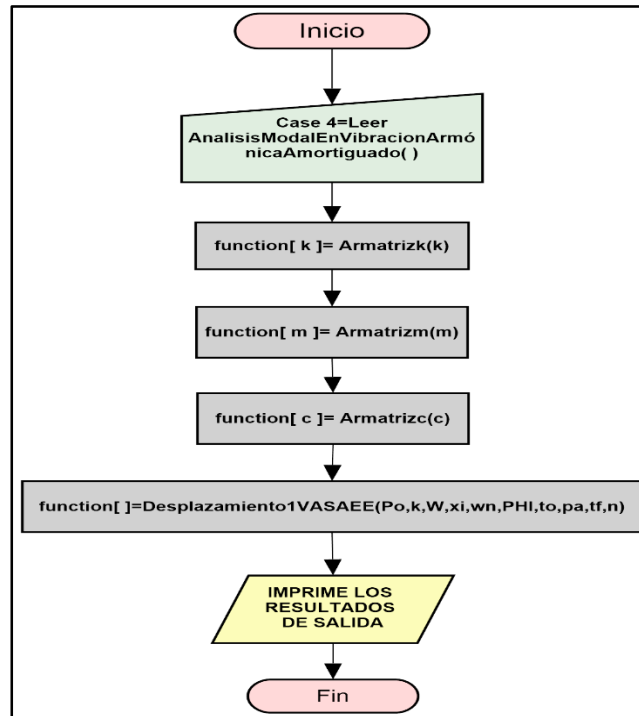


Figura 31. Diagrama de flujo de la herramienta análisis modal en vibración armónica amortiguada.
Fuente y Elaboración: El autor.

3.6.4. Experimento “Espectro de diseño a partir de registros sísmicos”.

El actual experimento permite encontrar los espectros de diseño de desplazamiento, velocidad y aceleración a partir de una serie de espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración, estos espectros de respuesta se generan a partir de un historial de aceleraciones sísmicas, los historiales o registros sísmicos son archivos de texto que brinda el RENAC (Archivos de aceleración de la red nacional de acelerógrafos - Ecuador) y PEER (Base de datos de registros sísmicos - Estados Unidos – California). Para la elaboración de los diferentes espectros de respuesta el usuario ingresa un valor de amortiguamiento que depende del criterio que este pretenda utilizar, así mismo en la generación de espectros de diseño el autor de este proyecto toma como criterio el promedio de los “n” espectros de respuesta (Ver Fig. 21). Sin embargo para el desarrollo de este experimento se elaboró un “Código Master De Espectros de Diseño”, el cual posee varias funciones desarrolladas en MATLAB, las mismas que se definirán a continuación; del

mismo modo mediante la Figura 32 se muestra el procedimiento del código Master de Espectros De Diseño.

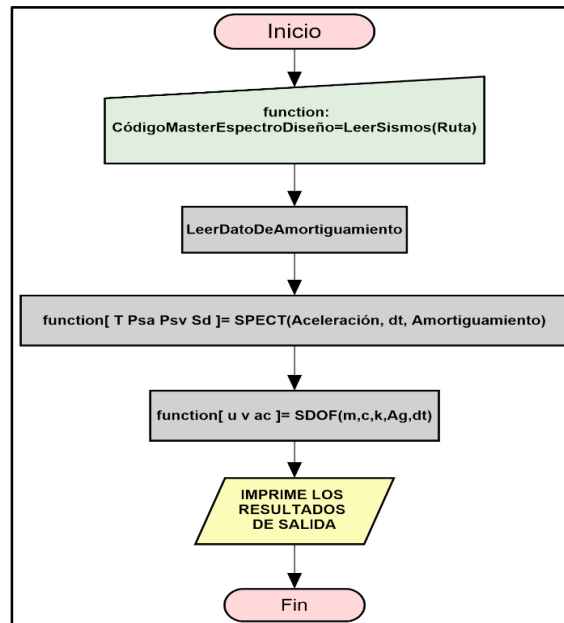


Figura 32. Diagrama de flujo de la herramienta espectro de diseño a partir de un registro de aceleraciones.
Fuente y Elaboración: El autor.

3.6.4.1. Función LeerSismos.

Esta función permite leer los registros de aceleraciones dependiendo el formato que estos contengan, cabe recalcar que los formatos son RENAC y PEER mostrados en las figuras 33 y 34 respectivamente.

```

Archivo de aceleración parte de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) Ecuador
Evento: 201604162358
Fecha del evento UTM (aammdd): 2016 4 16
Hora del registro UTM (hhmmss): 23 59 16.00
Estación: AAM2NUT
Componente: E
Frecuencia de muestreo (Hz): 1.000000e+02
Unidades: cm/s^2

0.2981 0.3283 0.3375 0.0169 -0.0240 -0.2478
-0.4116 -0.2261 -0.2271 -0.0678 0.1520 0.2354
0.2852 0.3050 0.3249 0.2496 0.1637 0.0569
-0.0445 -0.0319 0.0535 0.0613 -0.0826 -0.1613
-0.2620 -0.1408 0.0320 0.0053 0.0780 0.0944
0.2061 0.1932 0.2285 0.2581 0.1561 0.0270
-0.1141 -0.1764 -0.1704 -0.0782 0.0188 -0.0467
-0.0867 0.0166 -0.0826 -0.0741 -0.0454 -0.0004
-0.0070 -0.0215 -0.0555 -0.0760 0.1139 0.2291
  
```

Figura 33. Formato del registro de aceleraciones brindado por el "RENAC".
Fuente y Elaboración: El autor.

PEER NGA STRONG MOTION DATABASE RECORD					
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, AEROPUERTO MEXICALI, 315 (UNAM/UCSD STATION 6616)					
ACCELERATION TIME HISTORY IN UNITS OF G					
1115	0.0100	NPTS, DT			
-0.244514E-03	-0.243473E-03	-0.214996E-03	-0.184163E-03	-0.251644E-03	
-0.238147E-03	-0.297431E-03	-0.443999E-03	-0.212085E-03	-0.145844E-03	
-0.601402E-03	-0.652581E-03	-0.222156E-03	-0.169216E-03	-0.695925E-04	
0.191682E-03	-0.216453E-03	-0.492653E-03	-0.115703E-02	-0.171717E-02	
0.673298E-03	0.130108E-02	-0.264860E-02	-0.321520E-02	0.982366E-03	
0.327611E-02	0.226504E-02	0.670078E-03	-0.168656E-02	-0.285968E-02	
0.395466E-03	0.182701E-02	0.423133E-03	-0.207473E-03	-0.328149E-02	
-0.419104E-02	0.173024E-02	0.830583E-02	0.365835E-02	-0.583947E-02	

Figura 34. Formato del registro de aceleraciones brindado por el "PEER".
Fuente y Elaboración: El

3.6.4.1. Función LeerDataAmortiguamiento.

La presente función permite leer el dato de amortiguamiento que es ingresado por el usuario.

3.6.4.1. Función SPECT y función SDOF.

Estas funciones SPECT y SDOF permiten desarrollar los espectros de respuesta a partir de un registro de aceleraciones por lo que: T, Psa, Psv y Sd son los datos numéricos del Periodo, Espectros de respuesta de Pseudo aceleración, Pseudo velocidad y desplazamiento respectivamente. Los espectros de diseño propios de cada espectro de respuesta están codificados dentro del código "Master de Espectros de Diseño".

3.6.4.2. Código Master de Espectros de Diseño.

Seguidamente se presenta el código master de espectros de diseño, el mismo que se lo elaboro en MATLAB, cabe mencionar que las funciones LeerSismos, SPEC y SDOF de mostraran en los anexos: M, N y Ñ.

```
% Código Master de "Espectro de Diseño"

[matrizDeSismos, arrTiempo, arrCantidadElementos, nameFiles] =
leerSismos('C:\Users\USUARIO\Desktop\CARPETA TRABAJOS TESIS\codigo
matlab\TESIS\SISMOS (CARPETA)\ESPECTROS ACELERACIONES');

numSismos=length(matrizDeSismos);

SumSd=0;

SumPsv=0;
```



```

SumPsa=0;

ruta='C:\Users\USUARIO\Desktop\CARPETA TRABAJOS TESIS\codigo
matlab\TESIS\';

nombreArchivo='Dato de entrada amortiguamiento.txt';

fid =fopen([ruta nombreArchivo ],'r');

formato='%f%f';

ma = textscan(fid,formato);

c1=ma{1};

for sismo = 1:numSismos

    sismo1=matrizDeSismos{1,sismo};

    [filas,columnas]=size(sismo1);

    cont=1;

    for fila = 1:filas

        col=1;

        for columna = 1:columnas

            matrizOrdenada(cont)= sismo1(fila,columna);

            cont=cont+1;

        end

    end

    matrizOrdenada =
matrizOrdenada(:,(1:arrCantidadElementos(sismo)));

    sum=0;

    for i=1:arrCantidadElementos(sismo)

        tiempo(i)=sum;

        sum=sum+arrTiempo(sismo);

    end

    matrizIng=[tiempo' matrizOrdenada'];

% Función espectro (DUQUE, EDWIN)

[T,Psa,Psv,Sd]=SPECT(matrizIng(:,2),arrTiempo(sismo),c1(1));

Periodo=[T]';

registroDesplazamiento(:,sismo)=[Sd]';

registroVelocidad(:,sismo)=[Psv]';

```

```

registroAceleracion(:,sismo)=[Psa]';
registroPeriodo(:,sismo)=[T]';

clear tiempo
end
promedioSd=mean(registroDesplazamiento,2);
promedioPsv=mean(registroVelocidad,2);
promedioPsa=mean(registroAceleracion,2);
registroDesplazamiento(:,numSismos+1)=promedioSd;
registroVelocidad(:,numSismos+1)=promedioPsv;
registroAceleracion(:,numSismos+1)=promedioPsa;

% Matriz de espectros de respuesta Sd, Psv, Psa y Espectro de diseño
tomando como criterio el promedio de los espectros de respuesta.

registroDesplazamiento(:,numSismos+2)=Periodo;
registroVelocidad(:,numSismos+2)=Periodo;
registroAceleracion(:,numSismos+2)=Periodo;

% GRAFICAS:
figure
grid on
for i=1:numSismos+1
hold on
plot(T,registroDesplazamiento(:,i));
title('E S P E C T R O   D E   D I S E Ñ O'); ylabel('D E S P L A Z A M I
E N T O'); xlabel('P E R I O D O');
end
figure
for i=1:numSismos+1
plot(T,registroVelocidad(:,i));
title('E S P E C T R O   D E   D I S E Ñ O'); ylabel('V E L O C I D A
D'); xlabel('P E R I O D O');
hold on
end
figure

```

```

for i=1:numSismos+1

    plot(T,registroAceleracion(:,i));

    title('E S P E C T R O   D E   D I S E Ñ O'); ylabel('A C E L E R A C I Ó N'); xlabel('P E R I O D O');

    hold on
end

% Impresión de las matrices de espectros de respuesta Sda, Sdv, Sda +
espectro de diseño.

HORAFECHA=datestr(now);

txtEncabezado = sprintf('-----
-----\n
"UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA"\n
TITULACIÓN DE INGENIRÍA CIVIL\n
LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA SÍSMICA (VLEE)\n\nLABORATORIO:
Dinámica de estructuras\nEXPERMIENTO: Espectro de
diseño\nCARACTERÍSTICA DEL EXPERIMENTO:\nObtiene el espectro de diseño
basado en el criterio del promedio de "n" espectros de respuesta\nHORA-
FECHA:\n');

fid=fopen('Matriz(Sd).txt','wt');

fprintf(fid,'%s\n%s\n%s\n%s\n',[txtEncabezado, HORAFECHA],'-----
-----

','DATOS DE SALIDA:','ESPECTRO DE PseudoDesplazamiento');

dlmwrite('Matriz(Sd).txt', registroDesplazamiento, '-
append','delimiter', ' ', 'precision', '%.4f');

fid=fopen('Matriz(Psv).txt','wt');

fprintf(fid,'%s\n%s\n%s\n%s\n',[txtEncabezado, HORAFECHA],'-----
-----

','DATOS DE SALIDA:','
ESPECTRO DE PseudoVelocidad');

dlmwrite('Matriz(Psv).txt', registroVelocidad, '-append','delimiter', '
','precision', '%.4f');

fid=fopen('Matriz(Psa).txt','wt');

fprintf(fid,'%s\n%s\n%s\n%s\n',[txtEncabezado, HORAFECHA],'-----
-----

','DATOS DE
SALIDA:','ESPECTRO DE PseudoAceleración');

dlmwrite('Matriz(Psa).txt', registroAceleracion, '-append','delimiter',
' ', 'precision', '%.4f');

```

3.7. Aplicación Móvil “Espectro de Diseño” versión 1.0

La aplicación móvil “Espectro de diseño versión 1.0” (Ver Fig. 35), es desarrollada para encontrar el espectro de diseño utilizando la metodología que propone la normativa ecuatoriana de la construcción NEC-2015. Es una aplicación funcional para dispositivos móviles inteligentes, los mismos que son del uso diario por la mayoría de las personas, es por ello que mediante la tecnología se ha generado el espectro de diseño para cualquier zona del Ecuador.

El sistema operativo de la aplicación “Espectro de diseño versión 1.0” es Android, el mismo que fue creado para mecanismos o dispositivos móviles, como tablets o teléfonos celulares inteligentes. Android Studio, es un entorno que facilita al programador herramientas de programación para aplicaciones o desarrollo de software.

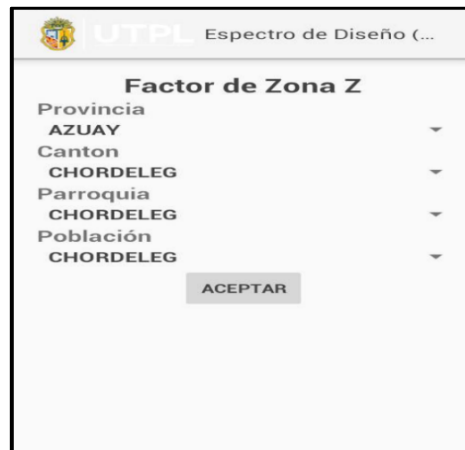


Figura 35. Aplicación móvil "Espectro de diseño versión 1.0"

Fuente y Elaboración: El autor.

3.7.1. Descripción general de la solución.

Para el desarrollo de la aplicación se elaboró una base de datos, la misma que está estructurada por diferentes tablas, las cuales contienen la siguiente información: Factor de zona Z , Tipo de perfil de suelo, Coeficientes de perfil del suelo F_a , F_s , F_d , Coeficiente de importancia I , Regularidad en planta y elevación, Tipo de estructura y Factor de reducción de resistencia sísmica R , así mismo la información que presenta la base de datos es la que facilita la norma ecuatoriana de la construcción NEC-2015 para la generación de espectros de diseño.

Como se aprecia en la figura 34, la aplicación móvil posee 6 actividades, las mismas que trabajan con la información correspondiente de la base de datos, es decir, la Actividad 1

presenta el valor de zona sísmica “Z” (Observar Fig. 36), el cual se lo obtiene dependiendo de la zona en la que se va a edificar, esta zona se clasifica en provincia – cantón - parroquia y población.

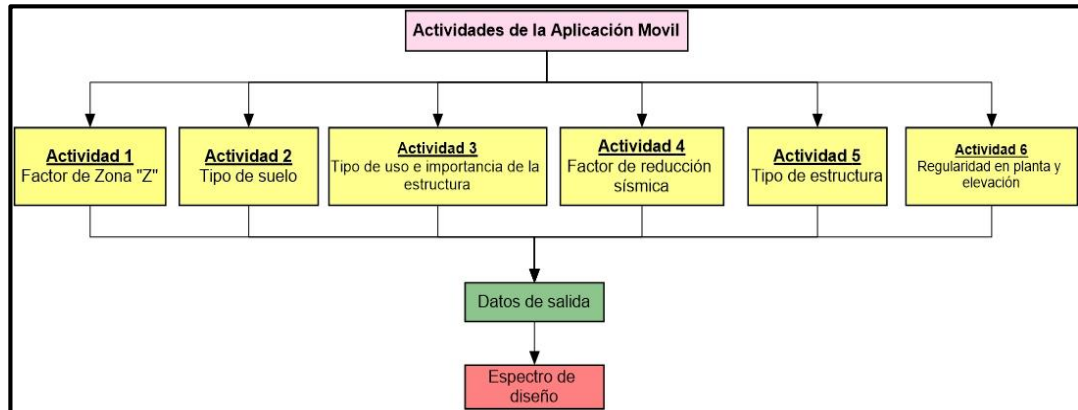


Figura 36. Actividades de la aplicación móvil "Espectro de Diseño"
Fuente y Elaboración: EL autor

En figura 37 se muestra la actividad 2, la misma que presenta 6 tipos de perfil de suelo clasificados desde el A hasta el F, cada perfil de suelo posee su propia descripción y definición. La clasificación de los perfiles de suelos A, B, C, D, y E, la norma específica que se toma en cuenta 30m de perforación del suelo para obtener una descripción detallada de los estratos existentes bajo la superficie. En el caso del perfil de suelo clasificado como F, la norma ecuatoriana de la construcción NEC 2015, propone una investigación geotécnica detallada del suelo, la cual deba incluir ensayos de laboratorio de suelos que permitan obtener características propias del suelo para modelar el comportamiento dinámico del mismo.

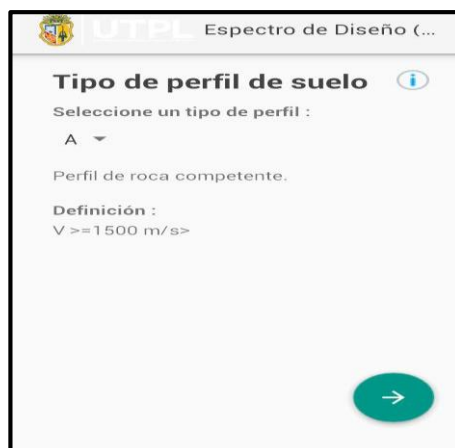


Figura 37. Tipo de perfil del suelo.
Fuente y Elaboración: El autor.

En la actividad 3 se indica la clasificación de las estructuras (Ver Fig. 38), las mismas que dependen del tipo de uso y de la importancia de la edificación. El objetivo principal de la clasificación de las estructuras es la importancia de la funcionalidad que posee cada una de ellas, es decir, las edificaciones esenciales como hospitales, bomberos, fuerzas armadas, etc. deben operar y sufrir menores daños en la ocurrencia de un sismo, es por ello que el coeficiente de importancia “I” incrementa la demanda sísmica para el diseño de estructuras, es decir, edificaciones esenciales, estructuras de ocupación especial y otras estructuras el coeficiente de importancia es igual a 1.5, 1.3 y 1.0 respectivamente.

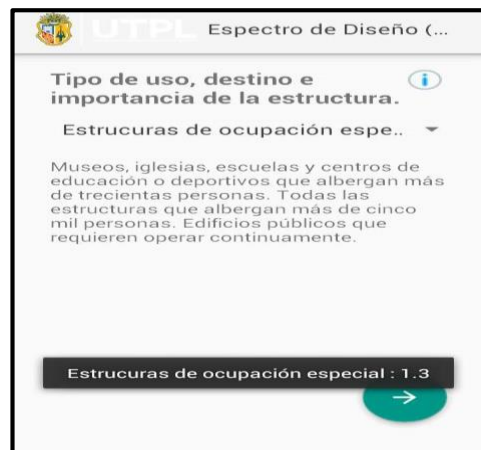


Figura 38. Tipo de uso e importancia de la estructura.

Fuente y Elaboración: El autor.

En la actividad 4 se presenta el factor de reducción sísmica “R” (Ver Fig. 39) que depende de variables como: el tipo de estructura, tipo de suelo. Los sistemas estructurales están clasificados en: estructurales dúctiles y estructurales de ductilidad limitada, para una información más detallada se recomienda leer el apartado 6.3.4 “Ductilidad y factor de reducción de resistencia sísmica R” de la norma ecuatoriana de la construcción NEC-2015 “Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente”.

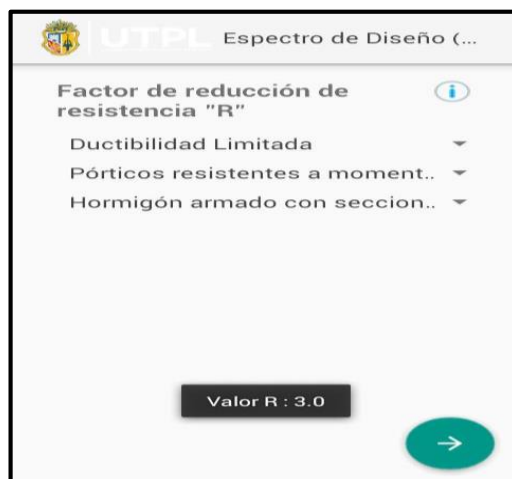


Figura 39. Factor de reducción sísmica “R”
Fuente y Elaboración: EL autor.

En Fig. 40 Se muestra la actividad 5 que realiza la aplicación “Espectro de diseño versión 1.0”, que determina el periodo fundamental de vibración T por medio de la ecuación 43, el cual está en función del tipo de estructura C_t y de la altura máxima de la edificación h_n , medida desde la base de la estructura. Por medio de la tabla 5 se observa la clasificación del tipo de estructura.

Ecuación (43)
$$T = C_t h_n^\alpha$$

Tabla 5. Tipos de estructura para el periodo de vibración.

Tipo de estructura	C_t	α
Estructuras de acero		
Sin arriostramiento	0.072	0.80
Con arriostramiento	0.073	0.75
Pórticos de hormigón armado		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0.055	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras.	0.055	0.75

Fuente: NEC (2015)

Figura 40. Determinación del periodo de vibración.
Fuente y Elaboración: El autor.

Para lograr un mejor desempeño sísmico se procura que las estructuras a construirse sean regulares en planta como elevación. En la actividad 6 (Ver Fig. 41) se muestra las diferentes configuraciones estructurales recomendadas y no recomendadas para la construcción. Una información más detallada se recomienda revisar el apartado 5.2 de la normativa ecuatoriana de construcción NEC-2015 “Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente”.



Figura 41. Configuración estructural en planta y elevación.
Fuente y Elaboración: El autor.

Seguidamente, desarrolladas las actividades previamente mencionadas en una ventana de la aplicación representada por la Figura 42, se muestran los resultados de salida como son los coeficientes de perfil de suelo F_a , F_s , F_d que dependen de la zona de construcción y del tipo de suelo, así mismo se presentan los valores de T_0, T_c , que representan a los periodos límites de vibración (Ver Fig. 22).



Figura 42. Resultados de salida para la generación del espectro de diseño.
Fuente y Elaboración: El autor.

Finalmente, con los resultados de salida se procede a generar el espectro de diseño que se lo aprecia en la figura 43. El espectro de diseño se lo realizó con un periodo máximo de 4s.

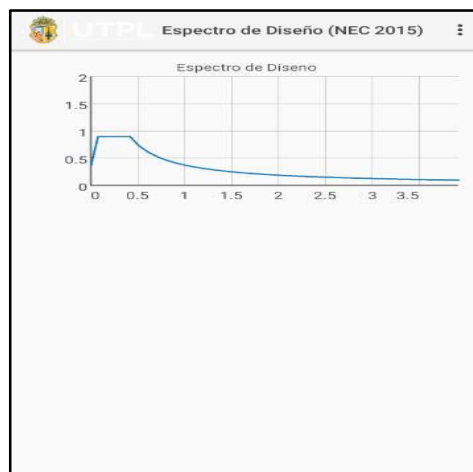


Figura 43. Espectro de diseño generado por medio de la Aplicación Móvil "Espectro de Diseño versión 1.0"
Fuente y Elaboración: El autor.

CAPÍTULO IV: ESTUDIOS DE CASOS RELEVANTES

4.1. Introducción

En el presente capítulo se formulan dos casos de estudios relevantes como son: a) Análisis dinámico de la estructura “Plaza de la cultura” y b) Espectro de diseño del sismo de Pedernales – Ecuador. Para los resultados de los casos analizados se utilizó los experimentos: “Análisis Modal en Vibración Libre no Amortiguado”, “Análisis Modal en Vibración Libre Amortiguado”, “Análisis Modal en Vibración Armónica no Amortiguada”, “Análisis Modal en Vibración Armónica Amortiguada” y “Espectro de Diseño” que permiten realizar el análisis dinámico y obtener el espectro de respuesta y diseño, desarrollando la metodología descrita en el capítulo anterior.

4.2. Análisis dinámico de la estructura “Plaza de la Cultura”.

En primer caso de estudio se realiza el análisis dinámico de la estructura que se aprecia en la Figura 44, en donde se utilizaran las funciones del experimento “Análisis Modal” para observar por medio de las gráficas las respuestas en el tiempo de desplazamiento y de las energías cinética, potencial y de disipación, considerando que la estructura se encuentra sometida a cargas armónicas y condiciones iniciales.



Figura 44. Estructura “Plaza de la cultura”
Fuente y Elaboración: El autor

4.2.1. Descripción de la estructura y zona de estudio

La edificación “Plaza de la cultura” se encuentra ubicada en la provincia de Loja, cantón Loja, barrio la Argelia en la Universidad Nacional de Loja en las coordenadas 699567,78216 E y 9554015,12960 S. La estructura tiene una altura de 37.0m, posee tres

columnas con una longitud de 24.0m con un diámetro exterior de 2.00m e interior de 1.70m respectivamente, el espesor de la losa es de 0.40m y su diámetro es de 13.0m.

En la figura 45 se aprecia la ubicación de la estructura en análisis.

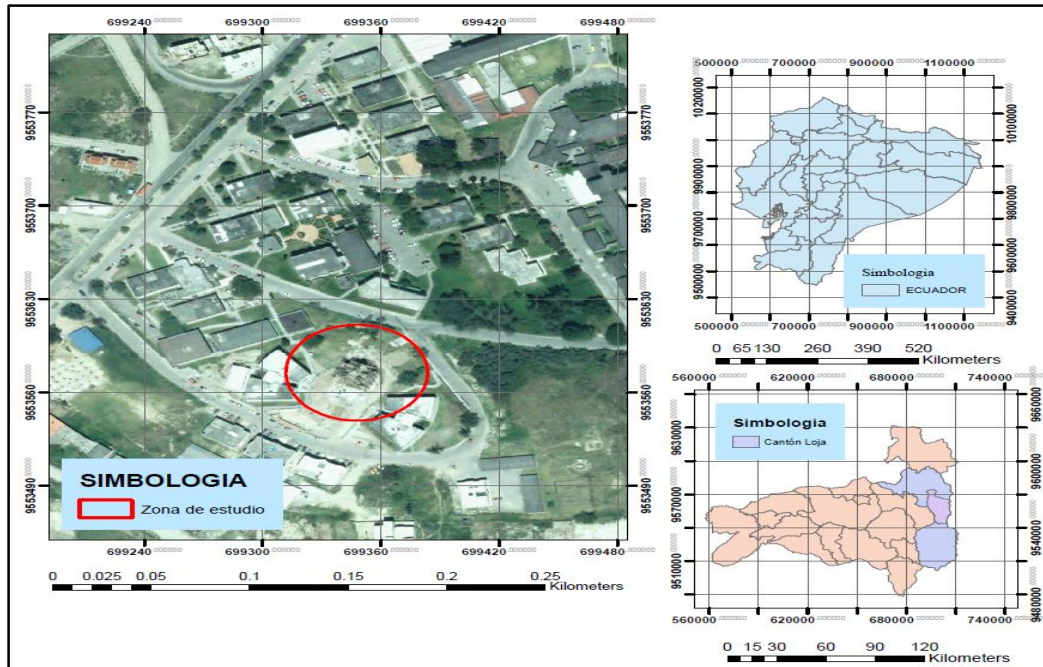


Figura 45. Ubicación de la Plaza de la cultura ubicada en la Universidad Nacional de Loja
Fuente y Elaboración: El autor.

4.3. Análisis dinámico de la estructura “Plaza de la cultura”

La estructura en análisis será idealizada como un sistema de un grado de libertad, o una estructura simple, la cual posee una masa agrupada en la parte superior soportada por columnas ligeras, estas columnas serán analizadas considerando que su sección es circular hueca. A continuación se procederá con el cálculo respectivo de masa y rigidez de la estructura mediante las ecuaciones 6 y 2 respectivamente.

Masa:

$$m = \delta V$$

$$V = \pi r^2 h$$

$$V = \pi \times 6.5^2 \times 0.40 = 53.09 m^3$$

$$m = 2400 \frac{kg}{m^3} \times 53.09 m^3 = 127416 kg = 127.416 ton$$

Rigidez:

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

$$E = 210000 \frac{kg}{cm^2} = 2.1 \times 10^9 \frac{kg}{m^2}$$

$$I = \frac{\pi}{4} (R_2^4 - R_1^4)$$

$$I = \frac{\pi}{4} (0.478) = 0.3754 m^4$$

$$k = 3 \left[12 \frac{2.1 \times 10^9 \times 0.3754}{24^3} \right] = 2052.96 \frac{ton}{m}$$

4.3.1. Análisis modal en vibración libre no amortiguado.

Para el análisis de la estructura que se observa en la Figura 44, se toma en cuenta los siguientes datos de entrada como son: desplazamiento inicial (u_0) y velocidad inicial (\dot{u}_0), los cuales permiten que la estructura ejerza un movimiento y vibre libremente. El tiempo total en que será analizada la estructura es de 20s con un incremento de 0.01s, así mismo la edificación presenta propiedades mecánicas como masa y rigidez previamente calculadas. Seguidamente en la Tabla 6 se muestran los valores numéricos de entrada.

Tabla 6. Datos de entrada para el experimento "Análisis Modal en vibración Libre no Amortiguado".

DATOS DE ENTRADA						
$u_0(m)$	$\dot{u}_0\left(\frac{m}{s}\right)$	$t_0(s)$	Δ_t	$t_f(s)$	$m(tonf)$	$k\left(\frac{tonf}{m}\right)$
0.10	2.5	0	0.01	20	127.42	2052.96

Fuente y Elaboración: El autor.

4.3.1.1. Resultados numéricos y gráficos.

Mediante la Tabla 7 se presentan los resultados de salida de la estructura "Plaza de la Cultura", por lo que se observa que la frecuencia (ω_n) es mayor al periodo fundamental de vibración (T_n), esta relación indica que dicha estructura es muy rígida, por lo cual no presenta desplazamientos o deformaciones muy grandes, así mismo la amplitud (ρ) y el desplazamiento máximo del sistema (u_{max}), se mantienen constantes en el transcurso del

tiempo debido a que el sistema vibra libremente y no posee un dispositivo mecánico que ayude a la disipación del movimiento.

Tabla 7. Resultados de la estructura "Plaza de la Cultura" utilizando el experimento "Análisis Modal en Vibración Libre no Amortiguado".

RESULTADOS DE SALIDA						
$\omega_n \left(\frac{1}{s} \right)$	$T_n (s)$	$\rho (m)$	$f_n \left(\frac{1}{s} \right)$	$u \max (m)$	$\dot{u} \max (m)$	$u_{\text{modal}} \max (m)$
4.01	1.56	7.12	0.64	7.12	28.5813	0.6308

Fuente y Elaboración: El autor.

En las Figuras 46 y 47 se observa respectivamente que el desplazamiento y las energías cinética, potencial son constantes a lo largo del tiempo, es decir las respuestas dinámicas no tienden a ser 0, debido a que el sistema no presenta un mecanismo de amortiguamiento, así mismo se aprecia en la figura 46 que el periodo fundamental de vibración de la estructura es cada 1.57s.

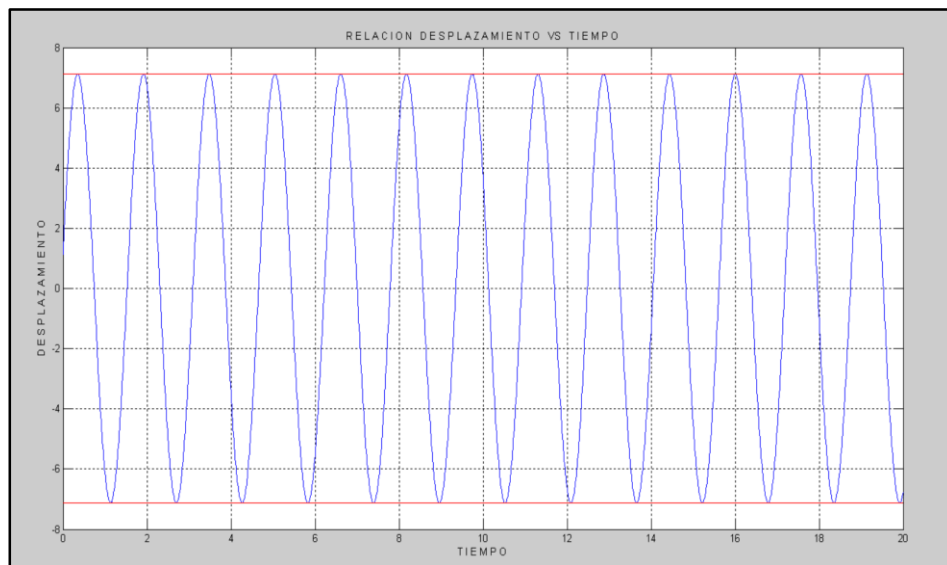


Figura 46. Desplazamiento en vibración libre no amortiguado de la estructura "Plaza de la cultura"

Fuente y Elaboración: El autor

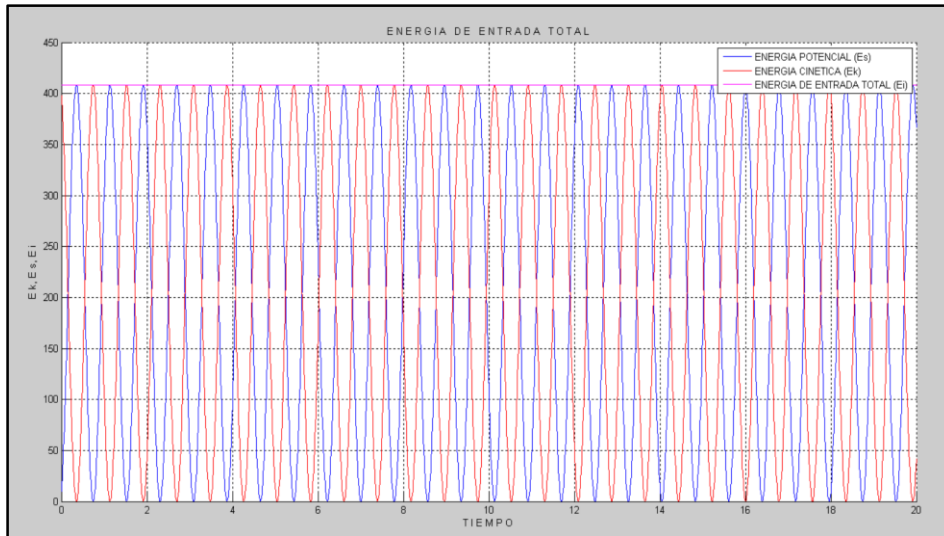


Figura 47. Energías en vibración libre no amortiguada de la estructura “Plaza de la cultura”.

Fuente y Elaboración: El autor.

En la figura 48 se observa el desplazamiento que se obtiene por medio de las coordenadas nodales donde el desplazamiento máximo es 0.6308m, al igual que el desplazamiento de la figura 46 se mantendrá constante a lo largo del tiempo, ya que el sistema no posee un dispositivo de amortiguamiento.

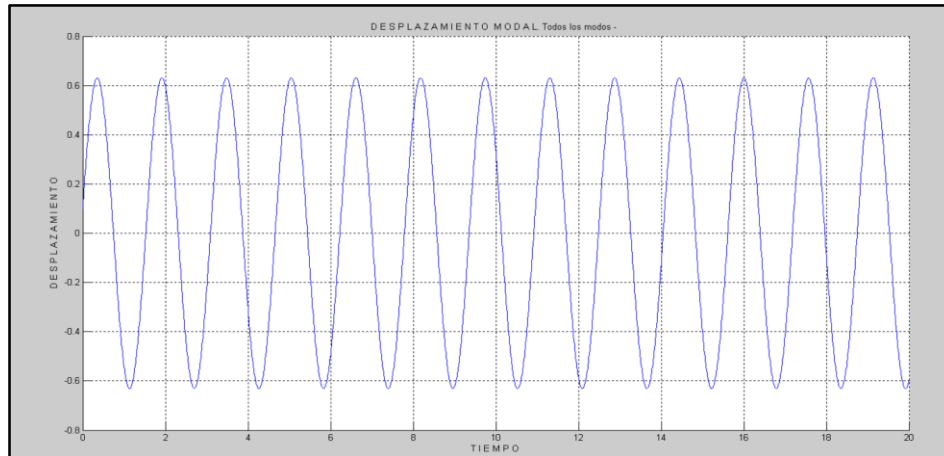


Figura 48. Desplazamiento total nodal de la estructura "Plaza de la cultura"

Fuente y Elaboración El autor

4.3.2. Análisis modal en vibración libre amortiguado.

Para que la estructura ejerza un movimiento libre mediante un impulso se toma en cuenta las siguientes condiciones iniciales: desplazamiento inicial (u_0) y velocidad inicial (\dot{u}_0). La estructura se encuentra conformada por propiedades mecánicas como: masa,

amortiguamiento, rigidez y es evaluada en un tiempo igual a 20s con incrementos de 0.01s. Seguidamente en la Tabla 8 se muestran los valores numéricos de entrada.

Tabla 8. Datos de entrada para el experimento "Análisis Modal en vibración Libre Amortiguado".

DATOS DE ENTRADA							
$u_0(m)$	$\dot{u}_0\left(\frac{m}{s}\right)$	$t_0(s)$	Δ_t	$t_f(s)$	$m(\text{tonf})$	$c(\text{amortiguamiento})$	$k\left(\frac{\text{tonf}}{m}\right)$
0.10	2.5	0	0.01	20	127.42	10	2052.96

Fuente y Elaboración: El autor

4.3.2.1. Resultados numéricos y gráficos.

Mediante la tabla 9 se observa los resultados de salida de la estructura "Plaza de la Cultura" en donde la frecuencia natural amortiguada (ω_d) y periodo natural de vibración (T_d), se obtuvieron mediante la función "Análisis Modal en Vibración Libre Amortiguado". Estos resultados son iguales a los resultados de la función "Análisis Modal no Amortiguado" ya que son relacionados con el periodo y frecuencia sin amortiguamiento. Finalmente su amplitud (ρ) y desplazamiento máximo (u_{\max}) únicamente son iguales en el instante de tiempo 0 como se observa en la Figura 49, ya que en el transcurso del tiempo el desplazamiento tiende a ser 0 debido a que el sistema carece de un dispositivo de amortiguamiento quien es el encargado de la disipación del movimiento.

Tabla 9. Resultados de salida de la estructura "Plaza de la Cultura" utilizando el experimento "Análisis Modal en Vibración Libre Amortiguado".

RESULTADOS DE SALIDA						
$\omega_d\left(\frac{1}{s}\right)$	$T_d(s)$	$\rho(m)$	$f_n\left(\frac{1}{s}\right)$	$u_{\max}(m)$	$\dot{u}_{\max}(m)$	$u_{\text{modal max}}(m)$
4.01	1.56	7.13	0.64	7.13	28.2644	0.6232

Fuente y Elaboración: El autor.

En la figura 49 se observa la respuesta del desplazamiento en el tiempo, el mismo que tiende a 0, igualmente la amplitud del sistema decrece en cada oscilación, además las energía potencial como cinética que se presentan en la figura 50 varían a lo largo del

tiempo, debido a que el sistema carece de un dispositivo de amortiguamiento, el cual hace que la energía de disipación aumente en cada intervalo de tiempo.

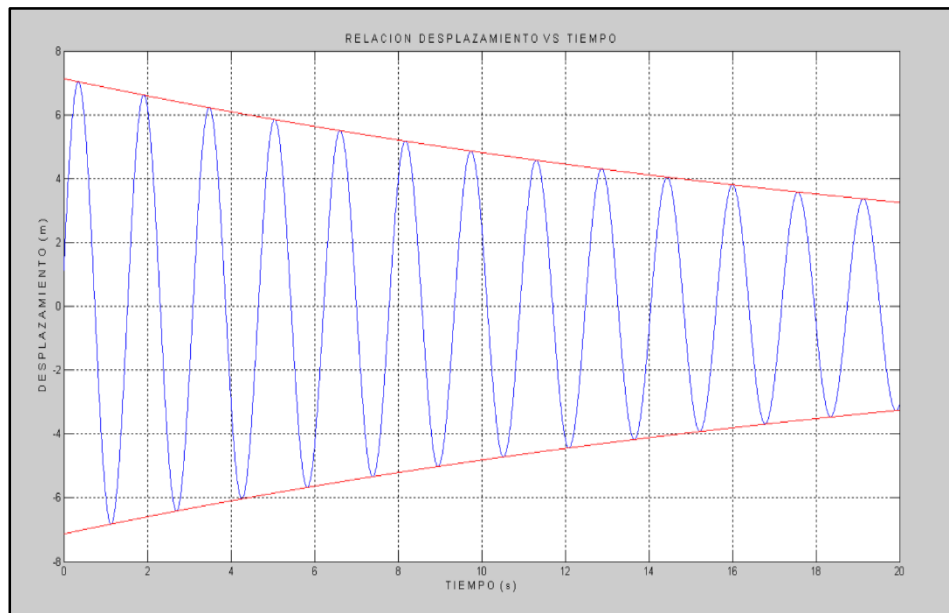


Figura 49. Desplazamiento en vibración libre amortiguado.
Fuente y Elaboración: El autor.

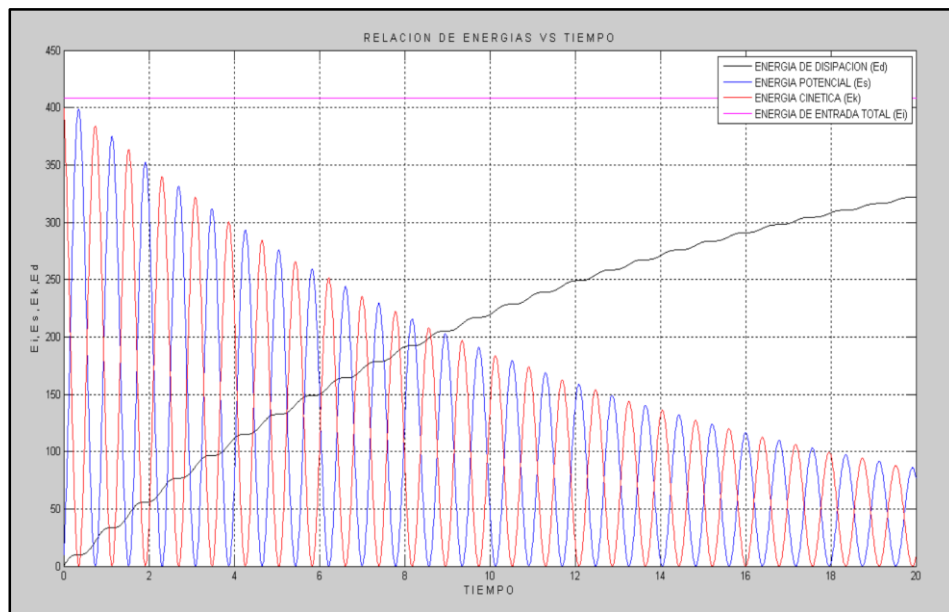


Figura 50. Energías en vibración libre amortiguada de la estructura "Plaza de la cultura".
Fuente y Elaboración: El autor.

En la figura 51 se observa el desplazamiento que se obtiene por medio de las coordenadas nodales donde el desplazamiento máximo inicial es 0.6232m, al igual que el

desplazamiento de la figura 49 es variante a lo largo del tiempo, debido a que el sistema posee un dispositivo de amortiguamiento.

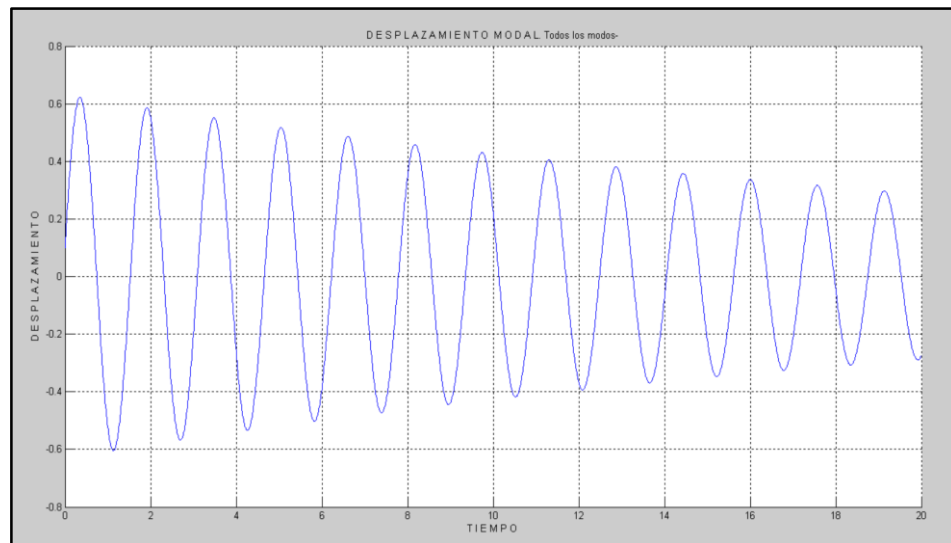


Figura 51. Desplazamiento total nodal amortiguado de la estructura "Plaza de la Cultura"

Fuente y Elaboración: EL autor.

4.3.3. Análisis Modal en vibración armónica no amortiguada.

La estructura será afectada por una carga armónica, la misma que es representada por una carga de viento, en donde la velocidad del viento que afecta a la estructura es una modelación con la velocidad del viento que se genera en el "Villonaco – Loja". La carga de viento se la calculara rigiéndose en la Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015) "Cargas no Sísmicas". La frecuencia de forzamiento del sistema es igual a la frecuencia natural de vibración calculada previamente en el apartado 4.3.1.1, es decir

$\omega = \omega_n = 4.01 \frac{1}{s}$ respectivamente. Dado esto se observa el modo fundamental de vibración

que se genera en la estructura, el cual indica el desplazamiento máximo lateral de la estructura.

4.3.3.1. Cálculo de la carga por viento:

Velocidad corregida del viento:

Ecuación (44)
$$V_h = V \sigma$$

Donde:

V_h = Velocidad corregida del viento en m/s

V = Velocidad instantánea máxima del viento en m/s, registrada a 10m de altura sobre el terreno.

σ = Coeficiente de corrección obsérvese Figura 52.

Tabla 10. Características topográficas para el cálculo de la carga del viento.

CATEGORIA	DEFINICIÓN	DESCRIPCIÓN
A	Sin obstrucción	Edificios frente al mar, zonas rurales o espacios abiertos sin obstáculos topográficos.
B	Obstrucción baja	Edificios en zonas suburbanas con edificaciones de baja altura, promedio hasta 10m.
C	Zona edificada	Zonas urbanas con edificios de altura

Fuente y Elaboración: NEC – 2015

Altura (m)	Sin obstrucción (Categoría A)	Obstrucción baja (Categoría B)	Zona edificada (Categoría C)
5	0.91	0.86	0.80
10	1.00	0.90	0.80
20	1.06	0.97	0.88
40	1.14	1.03	0.96
80	1.21	1.14	1.06
150	1.28	1.22	1.15

Figura 52. Coeficiente de corrección.
Fuente: Cargas no sísmicas (NEC – 2015)

Para el cálculo de la velocidad corregida se adoptó una velocidad instantánea máxima promedio de 12.4 m/s, este dato es el promedio de la variabilidad de la velocidad del viento anual en la central eólica “Villonaco” dato que es proporcionado por la Ing. Enith Carrión Jefe de Central Eólica Villonaco. Para el coeficiente de corrección, la estructura se

encuentra en un espacio sin obstrucciones y tiene una altura total de 37m por lo que el coeficiente de reducción (σ) asumido es igual a 1.14 (Ver Fig. 52) Por lo tanto:

$$V_h = 12.4 \times 1.14 = 14.136 \frac{m}{s}$$

4.3.3.2. Cálculo de la presión del viento:

Ecuación (45)
$$P = \frac{1}{2} \rho V_h^2 c_e c_f$$

Donde:

P = Presión el viento expresado en Pascales

ρ = Densidad del aire expresada en $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$, se puede adoptar $1.25 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

c_e = Coeficiente de altura.

c_f = Coeficiente de forma.

En el cálculo de la presión del viento se adoptó la densidad del aire que propone la Norma ecuatoriana de la construcción, el coeficiente de altura será igual al coeficiente de corrección 1.14 y el coeficiente de forma es igual a 0.8 (Ver Fig. 53), ya que la estructura se encuentra en un espacio abierto que está rodeada de edificaciones aledañas.

Construcción	Coeficiente C_f
Elementos situados en patios interiores, cuyo ancho es inferior a la altura del edificio y sin conexión con el espacio exterior por su parte inferior, así como ventanas interiores (en el caso de que se dispongan dobles ventanas)	0.3
Elementos en fachadas protegidas en edificios alineados en calles rectas, a una distancia de la esquina, mayor que la altura de la edificación, en bloques exentos en la parte central de una fachada, de longitud mayor que el doble de la altura o en patios abiertos a fachadas o patios de manzana	0.8
Elementos en fachadas expuestas en edificaciones aisladas o fachadas de longitud menor que el doble de la altura	1.3
Elementos en fachadas muy expuestas, situados al borde de la orilla de lagos o del mar, próximos a escarpaduras, laderas de fuerte inclinación, desfiladeros, y otros	1.5

Figura 53. Determinación del coeficiente de forma.
Fuente: NEC (2015)

Por lo tanto el viento ejercerá una presión de:

$$P = \frac{1}{2} 1.25 \times 14.136^2 \times 1.14 \times 0.8 = 113.90 \frac{N}{m^2} = 113.90 Pa$$

Sin embargo, la presión del viento únicamente afecta a las superficies laterales de la estructura, las mismas que presentan una configuración cilíndrica en donde el área lateral de un cilindro se calcula por medio de la siguiente expresión:

Ecuación (46)

$$A_{lateral} = 2\pi rh$$

$$A_{lateral} = 2\pi \times 1 \times 24 = 150.80 m^2$$

$$A_{total} = 3A_{lateral}$$

$$A_{total} = 3 \times 150.80 = 452.4 m^2$$

Por lo que la carga o fuerza del viento es igual a:

$$P_0 = 113.90 \frac{N}{m^2} \times 452.4 m^2 = 51528.36 N = 5.254 tonf$$

Primeramente con los resultados previamente calculados se encuentra el modo fundamental de la estructura “Plaza de la Cultura”, que se lo determino por medio de la metodología del análisis modal que posee la carga previamente calculada, este modo de vibración que se observa en la figura 54 muestra la forma característica de vibración que tendrá la estructura, es decir la posible deformación que puede tener la edificación, igualmente el primer modo de vibración se lo identifica por ser positivo.

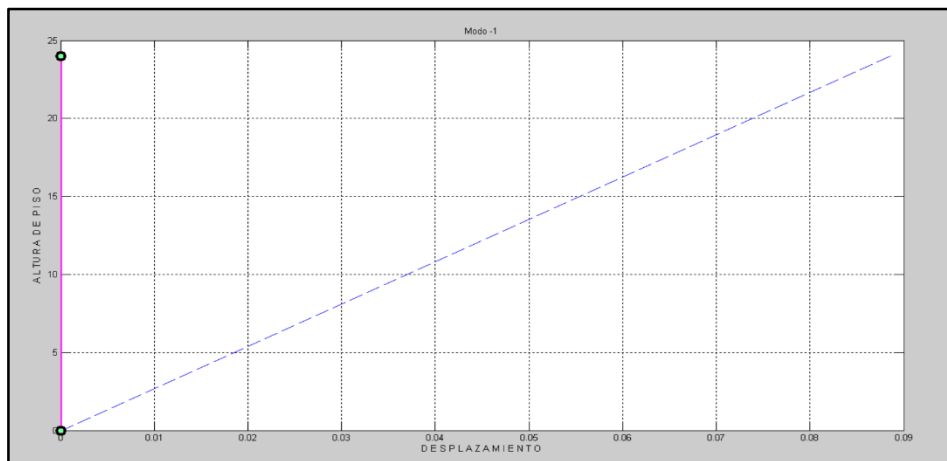


Figura 54. Modo fundamental de vibración de la estructura.
Fuente y Elaboración: El autor.

En la figura 55 se observa la respuesta en el tiempo del desplazamiento en coordenadas nodales, obteniendo como resultado un desplazamiento máximo de 1.2942m y su periodo de forzamiento es igual 1.56s. Las oscilaciones del sistema se mantendrán constantes a lo

largo del tiempo, debido a que el sistema no posee un mecanismo para la disipación del movimiento.

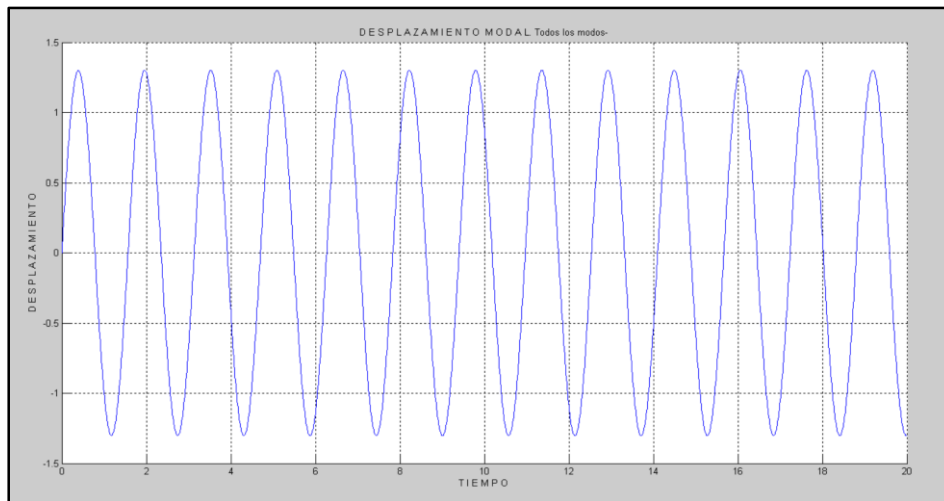


Figura 55. Respuesta del sistema no amortiguado ante la acción de una carga armónica.

Fuente y Elaboración: El autor.

4.4. Espectros de respuesta y diseño del sismo de Pedernales – Ecuador.

En el segundo caso de estudio se realiza los espectros de diseño de desplazamiento, Pseudo velocidad y Pseudo aceleración del sismo ocurrido el 16 de abril en Ecuador- Manabí-Pedernales, estos espectros de diseño toman como criterio el promedio de los “n” espectros de respuestas, los cuales se obtienen a partir de registros de aceleraciones del suelo, los mismos que son brindados por el Instituto Nacional de Acelerógrafos del Ecuador (RENAC), además los espectros de respuesta son calculados con un factor de amortiguamiento igual al 5%.

El Instituto Nacional de Acelerógrafos del Ecuador (RENAC), tiene como objetivo principal el monitoreo de aceleraciones del suelo. El RENAC está constituido por 41 estaciones acelerográficas ubicadas en todo el territorio ecuatoriano, las mismas que se observan en la Figura 56.

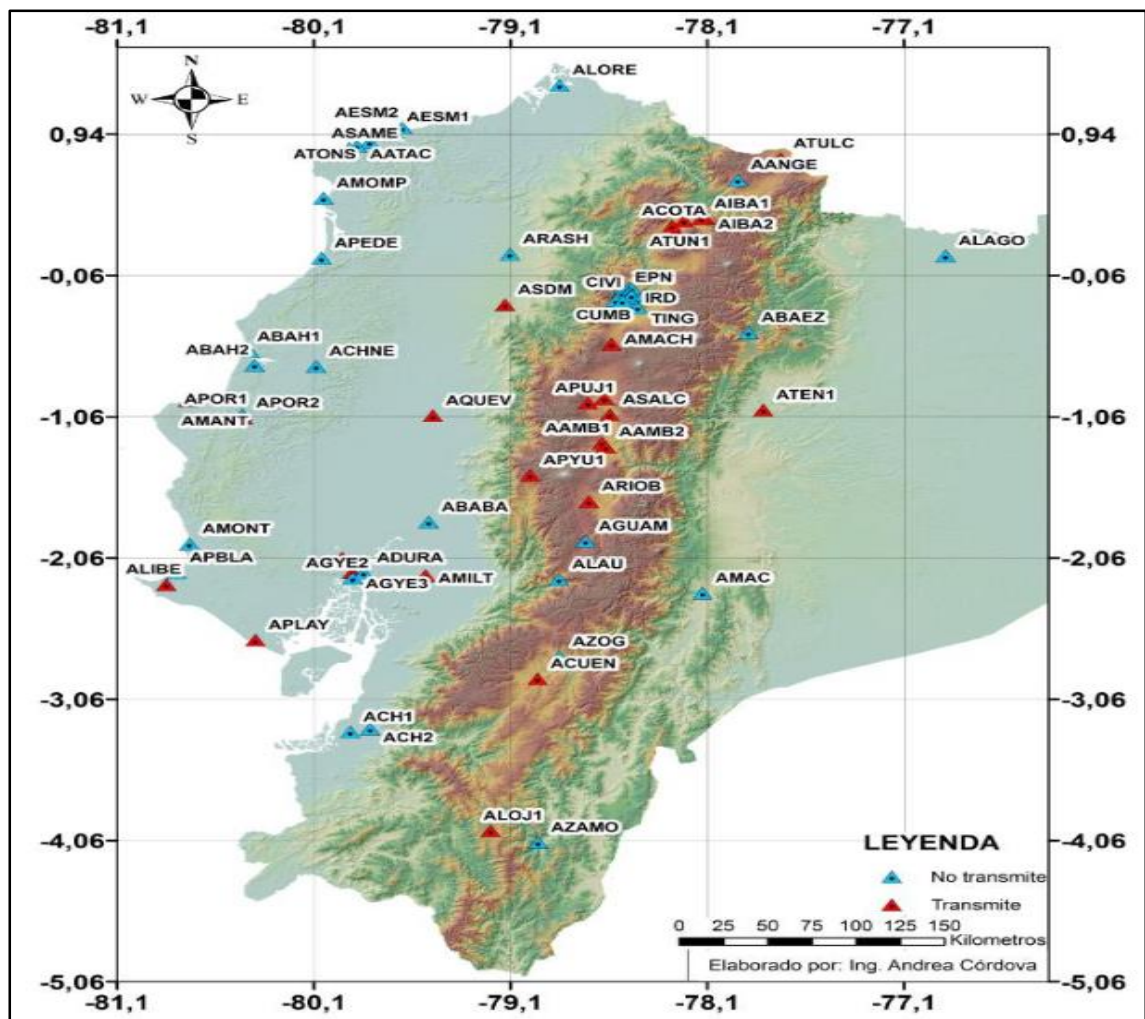


Figura 56. Red nacional de estaciones acelerográficas del Ecuador.

Fuente: Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional.

Elaboración: Ing. Andrea Córdova.

4.4.1. Análisis de resultados.

En la figura 59 se presentan los Pseudo-espectros de respuesta y diseño de: Desplazamiento, Velocidad y Aceleración, los cuales se construyeron a partir de los registros de aceleraciones del suelo proporcionados por las 41 estaciones acelerográficas que posee el RENAC en todo el territorio ecuatoriano, así mismo los espectros de respuesta y diseño fueron determinados con un factor de amortiguamiento igual al 5%, en donde dicho valor de amortiguamiento es importante en la respuesta dinámica estructural, ya que tiende a reducir los valores máximos de desplazamiento velocidad y aceleración, además el periodo máximo de vibración es de 4s.

Igualmente, se aprecia que los espectros de respuesta con mayor amplificación corresponden a las estaciones Pedernales (APED) y Chone (ACHNE), debido a que se

encuentran cercanas al epicentro del sismo, por ende la aceleración del suelo será mayor comparada con estaciones alejadas respecto al epicentro, por otro lado, en el espectro de aceleraciones (Fig. 59c), se aprecia que en un periodo de vibración igual a 0.1103s se genera una aceleración máxima de $3.6 \frac{m}{s^2}$ perteneciente al espectro de respuesta de Pedernales, el dato de aceleración es importante en el diseño de estructuras debido a que es proporcional a la fuerza que debe resistir una edificación debido al movimiento que se genera por el sismo, por lo que estructuras diseñadas con una menor aceleración pueden sufrir daños materiales en sus elementos estructurales.

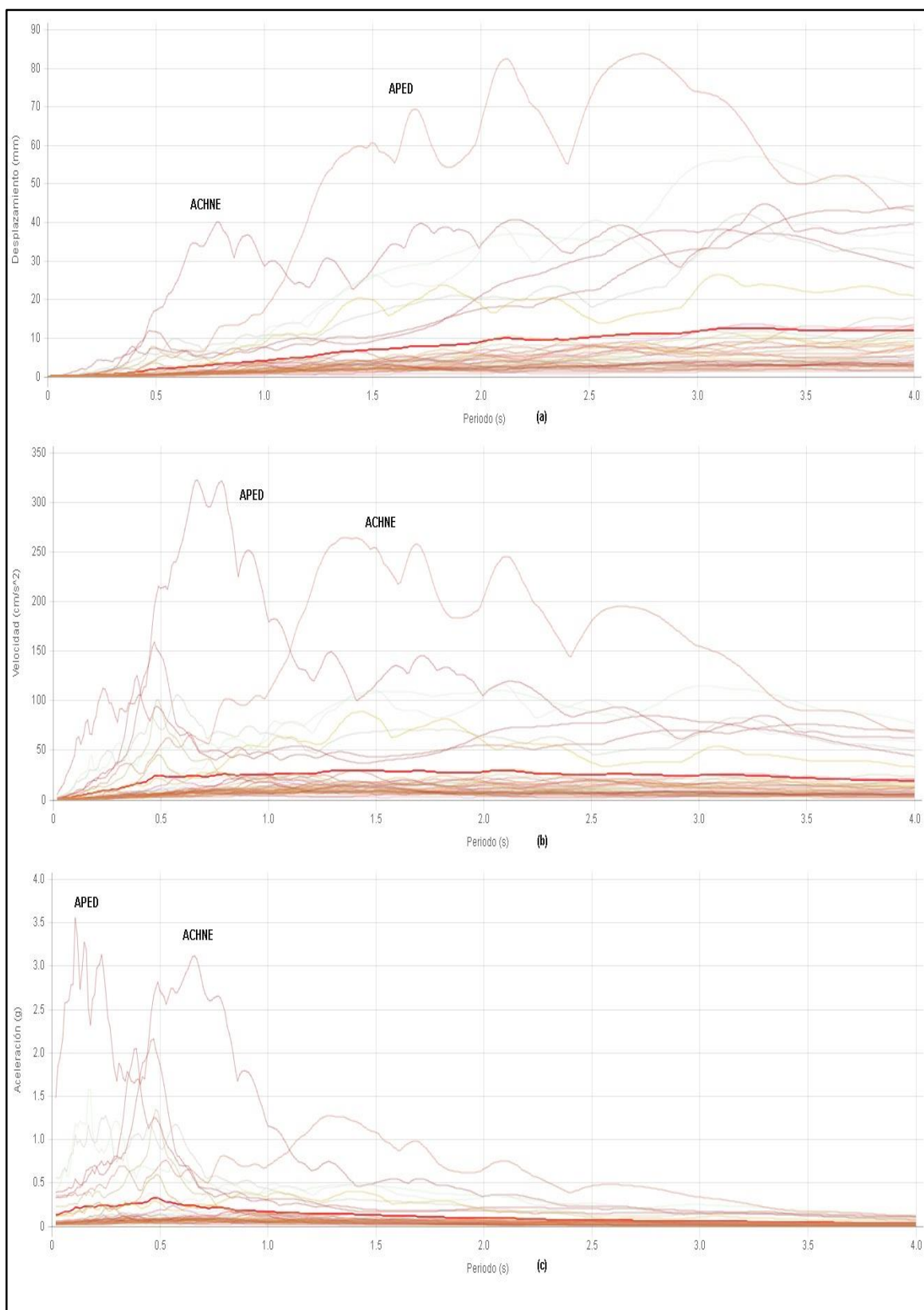


Figura 57. Espectros de respuesta y diseño de Desplazamiento, Velocidad y Aceleración del Sismo ocurrido en Ecuador- Manabí-Pedernales
Fuente y Elaboración: El autor.

CONCLUSIONES

Se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado para el “Laboratorio virtual de ingeniería sísmica”.

- Se elaboró los códigos fuentes de las funciones: AMCI, AMCIA, VASNAEE y VASAEE, que permiten realizar el análisis modal de pórticos planos de varios grados de libertad en vibración libre no amortiguada, vibración libre amortiguada, vibración armónica no amortiguada y vibración armónica amortiguada respectivamente, así mismo se desarrolló los códigos de las funciones: LeerSimos, SPECT y SDOF, que permiten generar los espectros de respuesta a partir de registros de aceleraciones del suelo.
- Se creó el código master del experimento “Análisis modal”, el cual permite agrupar y ejecutar las siguientes funciones: AMCI, AMCIA, VASNAEE y VASAEE, así mismo el código master se encuentra habilitado para la incorporación de nuevas funciones.
- Se creó el código master del experimento “Espectro” que abarca las funciones: LeerSimos, SPECT y SDOF, las cuales desarrollan los espectros de respuesta a partir de los registros de aceleraciones del suelo brindados por el RENAC y PEER.
- Se elaboró guías prácticas metodologías de las funciones de análisis modal, las mismas que ayudan al fortalecimiento del conocimiento y aprendizaje de los usuarios.
- Se desarrolló dos casos de estudios de ingeniería utilizando los experimentos y funciones elaboradas en el presente trabajo, con el fin de dar relevancia a los experimentos virtuales generados.
- Para el desarrollo de la Aplicación móvil se creó una base de datos estructurada con diferente información brindada por la NEC-2015 para obtener el espectro de diseño, esta información contiene el factor de zona Z, los diferentes tipos de suelo, coeficientes del perfil de suelo F_a , F_s , F_d , coeficiente de importancia de las estructuras para aumentar su demanda sísmica, coeficientes de regularidad en planta y elevación, diferentes tipos de estructuras y finalmente el factor de reducción sísmica.
- MATLAB es un software valido y apropiado para el procesamiento y ejecución de resultados, ya que proporciona una alta gama de comandos y funciones para las respectivas codificaciones.
- La herramienta informática “Visual Studio” facilita la vinculación con “MATLAB”, dando como solución la visualización y ejecución de resultados respectivamente.
- La herramienta “Análisis dinámico de estructuras” facilita al usuario mediante sus experimentos encontrar la respuesta de los desplazamientos máximos que puedan ocurrir en una estructura.

- Es importante disponer de una herramienta virtual que abarca conocimientos tanto informáticos como estructurales, ya que permiten solucionar y analizar inconvenientes en un corto tiempo.
- Se concluye que el experimento “Espectro de diseño”, es importante para el cálculo de edificaciones que se encuentren dentro del territorio ecuatoriano, ya que este experimento está capacitado para proporcionar los espectros de respuesta y diseño mediante los archivos de texto que brinda el RENAC, que es un Instituto perteneciente a nuestro país.
- La aplicación móvil “Espectro de diseño versión 1.0” es una herramienta móvil eficiente, la misma que posee la información adecuada para la generación de espectros de diseño dentro nuestro país.

RECOMENDACIONES

- Actualizar la presentación del laboratorio virtual de ingeniería sísmica, así mismo las herramientas informáticas que este posee.
- Generar más códigos fuentes necesarios para el análisis y diseño estructural.
- Los usuarios que hacen uso del “VLEE” brindar documentos científicos relacionados con la dinámica, análisis y diseño de estructuras.
- Para una información más detallada y conceptual se recomienda los libros de los autores Anil K. Chopra y Roberto Aguiar Falconi.
- Fructificar las herramientas que el laboratorio virtual posee dando mayor relevancia de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, R. (2006). *Dinámica de estructuras con MATLAB*. Quito.
- Attaway, S. (2013). *MATLAB A PRACTICAL INTRODUCTION TO PROGRAMMING AND PROBLEM SOLVING*.
- Botero, C. (2011). *Dinámica de estructuras sistemas de un grado de libertad*.
- Ceballos, J. (2014). *Enciclopedia de Microsoft Visual Basic. Interfaces gráficas y aplicaciones para Internet con Windows Forms y ASP.NET*. Mexico: Alfaomega.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (4 ed.). Mexico: Pearson.
- Francisco Crisafulli, Elbio Villafañe. (s.f.). *Guía de estudios de espectros de respuesta y diseño*.
- Geofísico, I. (2013). *Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional Informe Sísmico para el Ecuador*. Quito.
- McCormac, J. (2010). *Análisis de estructuras método clásico y matricial*. Alfaomega.
- NEC. (2015). *Peligro sísmico diseño sismo resistente*. Dirección de comunicación social, MIDUVI.
- Rochel Awad, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Sharp, J. (2010). *Visual C# paso a paso*. Madrid: GRUPO ANAYA, S.A.
- Tejada, A. (2011). *Análisis dinámico de estructuras en el dominio de la frecuencia*. Madrid.
- Viñan Pelaez, A. R. (2009). *Verificación de herramientas de dinámica de estructuras en el VLEE, e implementación del análisis de sistemas de dos grados de libertad*. Loja.
- Vinicio A. Suarez, A. A. (s.f.). *Desarrollo del laboratorio virtual de ingeniería sísmica aplicado al diseño estructural basado en el método de desplazamientos*. Loja.

ANEXOS

ANEXO A. Código fuente del experimento “Análisis modal de un sistema en vibración libre no amortiguado”.

```
%% ANALISIS MODAL DE UN SISTEMA EN VIBRACION LIBRE NO AMORTIGUADO
function [K]= AMCI(k_,m_,t0,pa,tf,uo,upu,Hp,n);
% DATOS DE ENTRADA:
%Dimensión del vector= (1fila * n-columns)= [n n1 n2 n3 n4 n5...n]
%k_ = [] Vector de valores que contiene la rigidez de cada piso
%m_ = [] Vector de valores que contiene la masa de cada piso.
%uo= [] Vector de valores que contiene la los desplazamientos iniciales.
%apu= [] Vector de valores que contiene la las velocidades iniciales.
%t0= Tiempo inicial.
%pa= Incremento de tiempo.
%tf= Tiempo final.
%Hp=[] Vector de valores que contiene las alturas parciales de cada
piso.
%n= Numero de grados de libertad.
k=zeros(n,n);
% PARA OBTENER LA MATRIZ DE RIGIDEZ.
[k]=Armatrizk(k_,n);
% PARA OBTENER LA MATRIZ DE MASA.
[m]=Armatrizm(m_,n);
% FRECUENCIAS DE CADA GRADO DE LIBERTAD(wni-wnn)
wni=eig(k,m,'chol')%Ordena las Frecuencias de menor a mayor "Matriz
espectral"
wnn=nthroot(wni,2)%wnn= Resuelve el polinomio.
% MODOS DE VIBRACION
[PHI,OMEGA]=eig(k,m) %obtenemos matriz espectral ("OMEGA") y matriz
modal normalizada con respecto a la masa ("PHI")
% COMPROBACION (ortogonalidad de los modos)
o=PHI(:,2) '*m*PHI(:,1);
% Encontramos "K" "M" MATRICES DESACOPLADAS
K=PHI '*k*PHI
```

```

M=PHI'*m*PHI

v=PHI'

% Determinamos la expansion modal
for i=1:n

    q0(i)=((PHI(:,i)'*m*uo')/(PHI(:,i)'*m*PHI(:,i))) % Desplazamiento
end

for i=1:n

    qp0(i)=((PHI(:,i)'*m*upu')/(PHI(:,i)'*m*PHI(:,i))) % Velocidad
end

%Llamamos a la función de vibración libre no amortiguada (VLNA), e
imprime los resultados de salida
for i=1:n

[wn Tn fn us t u up upp Ek Es Ei
Fs]=VLNA(q0(i),qp0(i),t0,tf,pa,M(i,i),K(i,i));

    wn_imrpimir(i,:)=wn;
    Tn_imrpimir(i,:)=Tn;
    fn_imrpimir(i,:)=fn;
    us_imrpimir(i,:)=us;
    t_imrpimir(i,:)=t;
    u_imrpimir(i,:)=u;
    up_imrpimir(i,:)=up;
    upp_imrpimir(i,:)=upp;
    Ek_imrpimir(i,:)=Ek;
    Es_imrpimir(i,:)=Es;
    Ei_imrpimir(i,:)=Ei;
    Fs_imrpimir(i,:)=Fs;
end

% Impresión de los datos de salida
text_tiket=fopen('RESULTADOS DE SALIDA.txt','wt');
for i=1:n

    fprintf(text_tiket,[ 'wn ' num2str(wn_imrpimir(i,:)) '\n']);
end

```



```

for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Tn ' num2str(Tn_imrpimir(i,:)) '\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'fn ' num2str(fn_imrpimir(i,:)) '\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'us ' num2str(us_imrpimir(i,:)) '\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 't ']);

    for k=1:length(t_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(t_imrpimir(i,k)) ' ']);

    end

    fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'u ']);
    for k=1:length(u_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(u_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end

    fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'up ']);
    for k=1:length(up_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(up_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
end

```

```

        fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'upp ']);
    for k=1:length(upp_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(upp_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
    fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Ek ']);
    for k=1:length(Ek_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(Ek_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
    fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Es ']);
    for k=1:length(Es_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(Es_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
    fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Ei ' num2str(Ei_imrpimir(i,:)) '\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Fs ']);
    for k=1:length(Fs_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(Fs_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
end

```

```

        fprintf(text_tiket,['\n']);
    end

    % Desplazamientos de cada modo
    t=t0:pa:tf;
    for i=1:n
        for k=1:length(t)
            qnt(i,k)=(q0(i)*cos(wnn(i)*t(k))+(qp0(i)/wnn(i))*sin(wnn(i)*t(k)));
        end
    end

    for modo=1:n
        for i=1:n
            for j=1:length(t)
                Un(i,j,modo)=PHI(i,modo) *qnt(modo,j);
                Untotal=length(Un);
            end
        end
    end

    % Sumatoria de todos los modos de vibración
    Unl=zeros (n,length(t));

    % GRAFICAS
    % GRAFICAS LOS MODOS DE VIBRACION
    y(1)=0;
    sumaPiso=0;

    for j=1:n
        sumaPiso=sumaPiso+ Hp(j)
        y(j+1)=sumaPiso;
    end

    for i=1:n
        figure

        x=[0;PHI(:,i)]

        plot(x,y,'--b','LineWidth',1);ylabel('A L T U R A O M E G A E P I S
O');xlabel('O M E G A E S P L A Z A M I E N T O');
    end

```

```

        grid on;

        hold on;

        titulo=num2str(i);
        title(strcat('Modo - ', titulo));

        x=zeros(1,n+1);
        plot(x,y,'-mo',...

                'LineWidth',3,...

                'MarkerEdgeColor','k',...

                'MarkerFaceColor',[.49 1 .63],...

                'MarkerSize',10);
    end

    % GRAFICAS DE TODOS LOS MODOS DE VIBRACION EN LA ESTRUCTURA
    figure
    hold on
    grid on
    for i=1:n
        x=[0;PHI(:,i)];
        if(mod(i, 2) == 0)
            plot(x,y,'--c','LineWidth',2);
        else
            if (mod(i, 3) == 0)
                plot(x,y,'--r','LineWidth',2);
            else
                plot(x,y,'--b','LineWidth',2);
            end
        end
    end
end
x=zeros(1,n+1);
plot(x,y,'-mo',...

        'LineWidth',3,...

        'MarkerEdgeColor','k',...

```

```

                                'MarkerFaceColor',[.49 1 .63],...

                                'MarkerSize',10);

title('M O D O S   D E   V I B R A C I O N'); ylabel('A L T U R A   D E   P
I S O S');xlabel('D E S P L A Z A M I E N T O');

for piso=1:n

    for modo=1:n

        for j=1:length(t)

            Un1(piso,j)=Un1(piso,j)+Un(piso,j,modo);

        end

    end

% IMPRIME LA SUMATORIA DE DESPLAZAMIENTOS MODALES

fprintf(text_tiket,[ 'Un1 ']);

    for k=1:length(Un1(piso,:))

        fprintf(text_tiket,[ num2str(Un1(piso,k)) ' ']);

    end

    fprintf(text_tiket,['\n']);

figure

    plot (t,Un1(piso,:));

    grid on;

    hold on;

    title(strcat('D E S P L A Z A M I E N T O   M O d A L . M o d o - ',
num2str(piso)));

    ylabel('D E S P L A Z A M I E N T O');xlabel('T I E M P O');

end

% IMPRIME EL TOTAL DE LOS DESPLAZAMIENTO MODALES

for i=1:size(v,1);

    fprintf(text_tiket,[ 'v ']);

    for k=1:length(v)

        fprintf(text_tiket,[ num2str(v(i,k)) ' ']);

    end

    fprintf(text_tiket,['\n']);

end

```

```
% GRAFICA TOTAL DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN

figure
title('D E S P L A Z A M I E N T O   M O D A L. Todos los modos - ');
ylabel('D E S P L A Z A M I E N T O');xlabel('T I E M P O');
hold on
grid on
for i=1:n    plot (t,Un1(i,:));
end
```

ANEXO B. Código fuente “Vibración libre no amortiguada”.

```
function [wn Tn fn us t u up upp Ek Es Ei  
Fs]=VLNA(u0,up0,t0,tf,pa,m1,k1);  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%  
%           Universidad Técnica Particular de Loja  
%           Vibración Libre No Amortiguada (V.L.N.A)  
%  
% Autor: Jhandry Alexis Ramón.  
% Tutor: Ing. Msc. Edwin Patricio Duque Yaguache.  
%  
%  
%           [t u us]=VLNA(u0,up0,t0,tf,m,k)  
%  
% Variables de entrada: %  
%  
%       u0= Desplazamiento inicial (m).  
%       up0= velocidad inicial (m/seg).  
%       t0= Tiempo inicial (seg).  
%       pa= Incremento de tiempo  
%       tf= Tiempo final (seg).  
%       m1= Masa del sistema [Tonf*(s^2/m)].  
%       k1= Rigidez del sistema (Tonf/m).  
%  
% Variables de salida:  
%  
%       u= Desplazamiento del sistema por cada intervalo de tiempo (m).  
%       up= Velocidad del sistema por cada intervalo de tiempo (m/seg).  
%       upp= Aceleración del sistema por cada intervalo tiempo (m/s^2).  
%       Ek= Energía cinética de la masa [(Joule)=(N*m)].  
%       Es= Energía potencial [(Joule)=(N*m)].  
%       Ei= Energía total del sistema  
%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%  
%Programación del sistema:  
wn=(k1/m1)^0.5;  
Tn=2*3.1416/wn;  
fn=(1/Tn);
```

```

t=t0:pa:tf;
u=linspace(length(t),1);
Ei=((0.5*k1*(u0^2))+(0.5*m1*(up0^2)));
us=(u0^2+(up0/wn)^2)^0.5;
ud=ones(length(t),1)*us;

    for i=1:length(t);

        %% Desplazamiento

        u(i)=u0*cos(wn*t(i))+(up0/wn)*sin(wn*t(i));

        %% Velocidad

        up(i)=(-u0*wn*sin(wn*t(i)))+(up0)*(cos(wn*t(i)));

        %% Aceleración

        upp(i)=(-u0*wn^2*cos(wn*t(i)))-(up0*wn)*(sin(wn*t(i)));

        %% Energía cinética

        Ek(i)=0.5*m1*wn^2*((-
u0*sin(wn*t(i)))+(up0/wn)*(cos(wn*t(i))))^2;

        %% Energía potencial

        Es(i)=0.5*k1*(u(i))^2;

    end

    %% Fuerza elástica

    Fs=k1*u;

    Area1 =(min(u)*min(Fs))/2;

    Area2 =(max(u)*max(Fs))/2;

    Fp=k1*u(i);

    %% Graficar tabla de valores

    fprintf(1,' |           Detalle           | Símbolo | Magnitud
| Unidades |\n')

    fprintf(1,' -----\n' )

    fprintf(1,' | Frecuencia circular natural | Wn      | %6.2f
| 1/seg      |\n' ,wn)

    fprintf(1,' | Frecuencia ciclica natural   | fn      | %6.2f
| 1/seg      | \n' ,fn)

    fprintf(1,' | Periodo natural de vibración | Tn      | %6.2f
| seg        | \n' ,Tn)

```



```

        fprintf(1, ' | Amplitud | us | %6.2f
| m | \n' ,us)

        fprintf(1, ' | Energial | E1 | %6.2f
| tonf*m | \n' , Areal)

        fprintf(1, ' | Energia2 | E2 | %6.2f
| tonf*m | \n' , Area2)

        fprintf(1, ' | Energia de entrada total | Ei | %6.2f
| tonf*m | \n\n\n\n\n' , Ei)

        fprintf(1, ' | Tiempo | Desplazamiento | Velocidad |
Aceleracion | Energía | \n' )

        fprintf(1, ' -----
-----\n' )

        fprintf(1, ' | %6.2f | %6.2f | %6.2f | %6.2f
| %6.2f | \n' ,t,u,up,upp,Fs);

%% Gráficas del sistema:

figure

plot(t,u);

title('RELACION DESPLAZAMIENTO VS TIEM
P O'); ylabel('DESPLAZAMIENTO');xlabel('TIEM P O');

grid on

hold on

%envolvente

plot(t,ud,'r'); hold on

plot(t,-ud,'r');

figure

plot(t,up);

title('RELACION VELOCIDAD VS TIEM P O');
ylabel('VELOCIDAD');xlabel('TIEM P O');

hold on

grid on

figure

plot(t,upp);

title('RELACION ACELERACION VS TIEM P O');
ylabel('ACELERACION');xlabel('TIEM P O');

hold on

grid on

```

```

figure

p=plot(u,Fs);

grid on

hold on

title('F U E R Z A   E L A S T I C A'); ylabel('F U E R Z
A');xlabel('D E S P L A Z A M I E N T O u(t)'); grid on

length(Fs)

set(p, 'Color','g','LineWidth',4)

yyy = [0, 0,min(Fs)];

xxx = [0, min(u), min(u)];

fill(xxx,yyy, 'b')

xxx = [ max(u),0,max(u)];

yyy = [ 0, 0,max(Fs)];

fill(xxx,yyy, 'r')

text((min(u)/2), (max(Fs)/10),{' A_1=' num2str(Area1)})

text((max(u)/2), (min(Fs)/10),{' A_2=' num2str(Area2)})

text(0, (min(Fs)/2),{' Area total = ' num2str(Area1+Area2)})

figure

plot(t,Ek,'r');

hold on

grid on

title('E N E R G I A   C I N É T I C A'); ylabel('E k');xlabel('T I E M
P O'); grid on

figure

plot(t,Es,'b');

hold on

grid on

title('E N E R G I A   P O T E N C I A L'); ylabel('E
s');xlabel('T I E M P O'); grid on

figure

title('E N E R G I A   D E   E N T R A D A   T O T A L');
ylabel('E k, E s, E i'); xlabel('T I E M P O'); grid on

hold on

```

```

    plot(t,Es,'b');

    hold on

    grid on

    plot (t,Ek,'r')

    grid on

    hold on

    plot (t,Ei,'m')

    grid on

    hold on

    legend('ENERGIA POTENCIAL (Es)', 'ENERGIA CINETICA (Ek)', 'ENERGIA
DE ENTRADA TOTAL (Ei)')

    hold on

    grid on

    figure

    subplot(1,1,1)

    plot(t,Fs); hold on

    title('RELACION FUERZA DESPLAZAMIENT
O');xlabel('TIEMPO');ylabel('DESPLAZAMIENTO');

    subplot(1,1,1)

    plot(u,Fs,':r')

    hold on

    grid on

    figure

    plot(u,Fs,':r')

    title('FUERZA');xlabel('DESPLAZAMIENT
O');ylabel('FUERZA');

    hold on

    grid on

end

```

ANEXO C. Código fuente del experimento “Análisis modal de un sistema en vibración libre amortiguado”.

```
%% ANALISIS MODAL DE UN SISTEMA EN VIBRACION LIBRE AMORTIGUADO
function [K]= AMCIA(k_,m_,c_,t0,pa,tf,u0,upu,Hp,n);
% DATOS DE ENTRADA
%dimensión del vector= (1fila * n-columnas)= [n n1 n2 n3 n4 n5...n]
%k_ = [] Vector de valores que contiene la rigidez de cada piso
%c_ = [] Vector de valores que contiene el amortiguamiento de cada piso.
%m_ = [] Vector de valores que contiene la masa de cada piso.
%u0= [] Vector de valores que contiene la los desplazamientos
iniciales.
%upu= [] Vector de valores que contiene la las velocidades iniciales.
%t0= Tiempo inicial.
%pa= Incremento de tiempo.
%tf= Tiempo final.
%Hp= [] Vector de valores que contiene las alturas parciales de cada
piso.
%n= Numero de grados de libertad.
k=zeros(n,n);
% PARA OBTENER LA MATRIZ DE RIGIDEZ
[k]=Armatrizk(k_,n);
% PARA OBTENER LA MATRIZ DE MASA
[m]=Armatrizm(m_,n);
% PARA OBTENER LA MATRIZ DE AMORTIGUAMIENTO
[c]= Armatrizc(c_,n);
% FRECUENCIAS DE CADA GRADO DE LIBERTAD (wni-wnn)
wni=eig(k,m,'chol')%ordena las Frecuencias de menor a mayor "Matriz
espectral"
wnn=nthroot(wni,2)%wnn= Resuelve el polinomio
MODOS DE VIBRACIÓN
[PHI,OMEGA]=eig(k,m) %obtenemos matriz espectral ("OMEGA") y matriz
modal normalizada ("PHI")
% ORTOGONALIDAD DE LOS MODOS
```

```

o=PHI(:,2) '*m*PHI(:,1)

% Encontramos M, C, y K (Matices desacopladas)

M=PHI '*m*PHI
C=PHI '*c*PHI
K=PHI '*k*PHI
v=PHI '

% Amortiguamientos x11, x12
for i=1:n
    Cn(i)= PHI(:,i) '*c*PHI(:,i)
    Mn(i)= PHI(:,i) '*m*PHI(:,i)
end
for i=1:n
    xi(i)=Cn(i)/(2*Mn(i)*wnn(i)); %amortiguamientos Ei=(C/2*M*Wn)
end
% Determinamos expansion modal
for i=1:n
    q0(i)=((PHI(:,i) '*m*u0')/(PHI(:,i) '*m*PHI(:,i))) %
Desplazamiento
end
for i=1:n
    qp0(i)=((PHI(:,i) '*m*upu')/(PHI(:,i) '*m*PHI(:,i))) % Velocidad
end
% Llamamos a la función de vibración libre amortiguada (VLA)
for i=1:n
fprintf(text_tiket,[ num2str(upp_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
    fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Ei ' num2str(Ei_imrpimir(i,:)) '\n']);
end
for i=1:n

```

```

fprintf(text_tiket,[ 'Ek ']);
for k=1:length(Ek_imrpimir)
    fprintf(text_tiket,[ num2str(Ek_imrpimir(i,k)) ' ']);
end
    fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Es ']);
    for k=1:length(Es_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(Es_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
        fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Ed ']);
    for k=1:length(Ed_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(Ed_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
        fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Fs ']);
    for k=1:length(Fs_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(Fs_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
        fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Fd ']);
    for k=1:length(Fd_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(Fd_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
end

```

```

        end

        fprintf(text_tiket,['\n']);
    end
    for i=1:n
        fprintf(text_tiket,['Ft ']);
        for k=1:length(Ft_imrpimir)
            fprintf(text_tiket,[ num2str(Ft_imrpimir(i,k)) ' ']);
        end
        fprintf(text_tiket,['\n']);
    end

    % Desplazamientos de cada modo
    for i=1:n
        wdd(i)=wnn(i)*(1-xi(i)^2)^0.5;
    end

    t=t0:pa:tf;

    for i=1:n
        for k=1:length(t)
            qnt(i,k)=(exp(-
            xi(i)*wnn(i)*t(k)))*((q0(i)*cos(wdd(i)*t(k))+(((qp0(i))+xi(i)*wnn(i)*q
            0(i)))/(wdd(i)))*sin(wdd(i)*t(k))));

            end
        end

        for modo=1:n
            for i=1:n
                for j=1:length(t)
                    Un(i,j,modo)=PHI(i,modo) *qnt(modo,j);

                end
            end
        end

        % Sumatoria de todos los modos de vibración
        Un1=zeros (n,length(t));

        % GRAFICAS LOS MODOS DE VIBRACION

```

```

y(1)=0;
sumaPiso=0;

for j=1:n
    sumaPiso=sumaPiso+ Hp(j)
    y(j+1)=sumaPiso;
end

for i=1:n
    figure
    x=[0;PHI(:,i)]
    plot(x,y,'--b','LineWidth',1);ylabel('A L T U R A O M E G A E P I S O');xlabel('O M E G A E S P L A Z A M I E N T O');

    grid on;
    hold on;
    titulo=num2str(i);
    title(strcat('Modo - ', titulo));
    x=zeros(1,n+1);
    plot(x,y,'-mo',...
        'LineWidth',3,...
        'MarkerEdgeColor','k',...
        'MarkerFaceColor',[.49 1 .63],...
        'MarkerSize',10);

end

% GRAFICAS DE TODOS LOS MODOS DE VIBRACION EN LA ESTRUCTURA
figure
hold on
grid on
for i=1:n
    x=[0;PHI(:,i)]
    if(mod(i, 2) == 0)
        plot(x,y,'--c','LineWidth',2);
    else
        if (mod(i, 3) == 0)

```



```

        plot(x,y,'--r','LineWidth',2);

    else

        plot(x,y,'--b','LineWidth',2);

    end

end

end

x=zeros(1,n+1);
plot(x,y,'-mo',...

        'LineWidth',3,...

        'MarkerEdgeColor','k',...

        'MarkerFaceColor',[.49 1 .63],...

        'MarkerSize',10);

title('M O D O S   D E   V I B R A C I O N'); ylabel('A L T U R A   D E
P I S O S');xlabel('D E S P L A Z A M I E N T O');

for piso=1:n
    for modo=1:n
        for j=1:length(t)
            Un1(piso,j)=Un1(piso,j)+Un(piso,j,modo);
        end
    end
end

% IMPRIMER LA SUMATORIA DE DESPLAZAMIENTOS MODALES

fprintf(text_tiket,[ 'Un1 ']);

for k=1:length(Un1(piso,:))
    fprintf(text_tiket,[ num2str(Un1(piso,k)) ' ']);
end

fprintf(text_tiket,['\n']);

figure

plot (t,Un1(piso,:));

grid on;

hold on;

title(strcat('D E S P L A Z A M I E N T O   M O D A L . M o d o-',
num2str(piso)));

```

```

        ylabel('D E S P L A Z A M I E N T O');xlabel('T I E M P O');
    end

    % Imprime el total de los desplazamiento modales
    for i=1:size(v,1);
        fprintf(text_tiket,[ 'v ']);
        for k=1:length(v)
            fprintf(text_tiket,[ num2str(v(i,k)) ' ']);
        end
        fprintf(text_tiket,['\n']);
    end

    figure
    title('D E S P L A Z A M I E N T O M O D A L. Todos los modos-');
    ylabel('D E S P L A Z A M I E N T O');xlabel('T I E M P O');
    hold on
    grid on
    for i=1:n
        plot (t,Un1(i,:));
    end

```

ANEXO D. Código fuente “Vibración libre amortiguada”.

```
function [wn Tn wd fn Td Cs us ro t u up upp Ei Ek Es Ed Fs Fd
Ft]=VLA(u0,up0,t0,tf,pa,m1,k1,xi);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%           Vibración Libre Amortiguada (V.L.A)
%           Universidad Técnica Particular de Loja
%
% Autor: Jhandry Alexis Ramón Pulla
% Tutor: Ing. Msc. Edwin Patricio Duque Yaguache
%
%           [t u us]=VLA(u0,up0,t0,tf,m1,k1,xi)
%
% Variables de entrada:
%
%           u0 = Desplazamiento inicial (m).
%           up0 = velocidad inicial (m/seg).
%           t0 = Tiempo inicial (seg).
%           pa = Incremento de paso
%           tf = Tiempo final (seg).
%           m = Masa del sistema [Tonf*(s^2/m)].
%           k = Rigidez del sistema (Tonf/m).
%           xi = amortiguamiento.
%
% Variables de salida:
%           u = Desplazamiento del sistema por cada intervalo de tiempo (m)
%           up = Velocidad del sistema por cada intervalo de tiempo (m/seg)
%           upp = Aceleración del sistema por cada intervalo tiempo (m/s^2)
%           Ek = Energía cinética de la masa [(Joule)=(N*m)]
%           Es = Energía potencial [(Joule)=(N*m)].
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%Programación del sistema:
wn=(k1/m1)^0.5;
wd=wn*(1-xi^2)^0.5;
Tn=2*3.14/wn;
```

```

t=t0:pa:tf;

u=linspace(length(t),1);

fn=1/Tn;

Td= ((Tn)/((1-(xi^2))^0.5));

Cs=2*xi*m1*wn;

Ei=((0.5*k1*(u0^2))+(0.5*m1*(up0^2)));

B=((up0+xi*wn*u0)/(wd));

us=(u0^2+(up0/wn)^2)^0.5;

ro=((u0)^2+((up0+xi*wn*u0)/wd)^2)^0.5;

    for i=1:length(t);

        %desplazamiento

        u(i)=(exp(-
xi*wn*t(i)))*((u0*cos(wd*t(i))+(((up0)+xi*wn*u0))/(wd))*sin(wd*t(i))))
;

        %Velocidad

        up(i)=(exp(-xi*wn*t(i)))*(-
u0*wd*sin(wd*t(i))+(up0*cos(wd*t(i)))+(xi*wn*u0));

        %Aceleración

        upp(i)=(exp(-xi*wn*t(i)))*((-u0*wd^2*cos(wd*t(i))-
(((up0+xi*wn*u0)/wd)*sin(wd*t(i))*wd)));

        %ENVOLVENTE

        env(i)=ro*exp(-xi*wn*t(i));

        %Energia cinética

        Ek(i)= 0.5*m1*((up(i))^2);

        %Energia potencial

        Es(i)= 0.5*k1*((u(i))^2);

        %ENERGIA DE DISIPACION (función)

        Ed(i)=IntegralTrap(t0,t(i),Cs,xi,wn,u0,wd,up0);

    end

    u=u';up=up';upp=upp';t=t';

    resul=[u up upp];

    %% Fuerza

    Fs=k1*u;

```

```

Fd=(Cs*up);

length(Fs);

length (Fd);

Ft=(Fs+Fd);

%% Graficar tabla de valores

        fprintf(1,' |           Detalle           | Símbolo |
Magnitud | Unidades | \n')

        fprintf(1,' -----
-----\n' )

        fprintf(1,' | Frecuencia natural circular | Wn | %6.2f
| 1/seg | \n' ,wn)

        fprintf(1,' | Frecuencia natural ciclica | fn | %6.2f
| 1/seg | \n' ,fn)

        fprintf(1,' | Frecuencia | wd | %6.2f
| 1/seg | \n' ,wd)

        fprintf(1,' | Periodo de vibracion natural | Tn | %6.2f
| s | \n' ,Tn)

        fprintf(1,' | Periodo natural amortiguado | Td | %6.2f
| s | \n' ,Td)

        fprintf(1,' | Coeficiente de amortiguamiento| Cs | %6.2f
| tonf*s/m | \n' ,Cs)

fprintf(1,' | Energia de entrada total | Ei | %6.2f |
tonf*s/m | \n' ,Ei)

        fprintf(1,' | Amplitud del movimiento | ro | %6.2f
| m | \n\n\n' ,ro)

fprintf(1,' | Tiempo | Desplazamiento | Velocidad | Aceleracion
| Energía | \n' );

        fprintf(1,' -----
-----\n' );

        fprintf(1,' | %6.2f | %6.2f | %6.2f | %6.2f
| %6.2f | \n' ,t,u,up,upp,Fs);

        Titulos=['Desplazamiento','Velocidad','Aceleracion'];

        Datos=[u,up,upp];

%% Gráficas del sistema:

figure;

plot(t,u);

hold on

```

```

    plot(t,env,'r');

    hold on

    plot(t,-env,'r');

    title('RELACION DESPLAZAMIENTO VS TIEM
P O');

    ylabel('DESPLAZAMIENTO ( m )');xlabel('TIEMPO (
s )');

    grid on
figure ;
title('RELACION VELOCIDAD VS TIEMPO');
hold on
plot(t,up); ylabel('VELOCIDAD');xlabel('TIEMPO');
hold on
grid on
figure;
plot(t,upp);
title('RELACION ACELERACION VS TIEMPO');
ylabel('ACELERACION'); xlabel('TIEMPO');
grid on
hold on

figure
plot(t,Es,'b');

title('RELACION DE ENERGIA POTENCIAL VS
TIEMPO')
ylabel('ENERGIA POTENCIAL'); xlabel('TIEMPO');
grid on
hold on

figure
plot(t,Ek,'r');

title('RELACION DE ENERGIA CINETICA VS
TIEMPO')

```

```

ylabel('E N E R G I A   C I N E T I C A'); xlabel('T I E M P O');
grid on
hold on
figure
plot(t,Ed,'k');
title('R E L A C I O N   D E   E N E R G I A   D E   D I S I P A C I O
N   V S   T I E M P O')
ylabel('E N E R G I A   D E   D I S I P A C I O N'); xlabel('T I E M P
O');
grid on
hold on

%% RELACIONES ENERGIA TIEMPO, EK, ES, EI, ED.
figure
plot(t,Ed,'k');
title('R E L A C I O N   D E   E N E R G I A S   V S   T I E M P O')
hold on
plot(t,Es,'b');
hold on
plot(t,Ek,'r');
hold on
plot(t,Ei,'m');
hold on
ylabel('E i, E s , E k ,E d'); xlabel('T I E M P O');
legend('ENERGIA DE DISIPACION (Ed)', 'ENERGIA POTENCIAL (Es)', 'ENERGIA
CINETICA (Ek)', 'ENERGIA DE ENTRADA TOTAL (Ei)')
hold on
grid on

%%FUERZA DESPLAZAMIENTO
figure
hold on
plot(t,Fs,'b');

```

```

title('RELACION FUERZA DESPLAZAMIENTO');xlabel('DESPLAZAMIENTO TIEMPO');ylabel('FUERZA');

hold on

legend('RELACION FUERZA VS TIEMPO','RELACION FUERZA VS DESPLAZAMIENTO')

hold on

grid on

%%RELACION FUERZA VELOCIDAD

figure

plot(u,Fs,'r');

title('FUERZA AMORTIGUAMIENTO VS DESPLAZAMIENTO');

xlabel('DESPLAZAMIENTO');ylabel('AMORTIGUAMIENTO');

hold on

plot(u,Ft,':b');

hold on

grid on

legend('FUERZA','AMORTIGUAMIENTO EXISTENTE')

%% HISTERISIS DEL SISTEMA

figure

plot(up,Ft,'b');

title('FUERZA AMORTIGUAMIENTO VS VELOCIDAD');ylabel('AMORTIGUAMIENTO'); xlabel('VELOCIDAD');

legend('AMORTIGUAMIENTO QUE SE EJERCE CONFORME AUMENTA LA VELOCIDAD')

grid on

plot(u,Fs,'r');

```


ANEXO E. Función de la energía de disipación.

```
function [Ei]=IntegralTrap(t0,tf,Cs,xi,wn,u0,wd,up0);

    div=1000;

    h=(tf-t0)/div;

    suma=0;

    incremento=t0;
for j=0: div

    if j==0

        suma=suma+(Cs*(exp(-xi*wn*incremento))*(-
u0*wd*sin(wd*incremento)+(up0*cos(wd*incremento)+(xi*wn*u0)))^2);

    else

        suma=suma+2*(Cs*(exp(-xi*wn*incremento))*(-
u0*wd*sin(wd*incremento)+(up0*cos(wd*incremento)+(xi*wn*u0)))^2);

    end

    incremento=incremento+h;

end

Ei= suma*(h/2);
```

ANEXO F. Código fuente del experimento “Análisis modal de un sistema en vibración armónica no amortiguado en estado estacionario”.

```
%ANALISIS MODAL PARA UN SISTEMA EN VIBRACIÓN ARMÓNICA NO AMORTIGUADO EN
%ESTADO ESTACIONARIO

function[K]= VASNAEE2(k_,m_,t0,pa,tf,po,W,Hp,n);

% DATOS ENTRADA:

%dimensión del vector= (1fila * n-columnas)= [n n1 n2 n3 n4 n5...n]

%k_ = [] Vector de valores que contiene la rigidez de cada piso
%m_ = [] Vector de valores que contiene la masa de cada piso.
%po= [] Vector de valores que contiene la carga de cada piso.
%W= [] Vector de valores que contiene la frecuencia de carga por cada
 piso.

%t0= Tiempo inicial.
%pa= Incremento de tiempo.
%tf= Tiempo final.

%Hp= [] Vector de valores que contiene las alturas parciales de cada
 piso.

%n= Numero de grados de libertad.

k=zeros(n,n);

% PARA OBTENER LA MATRIZ DE RIGIDEZ

[k]=Armatrizk(k_,n);

% PARA OBTENER LA MATRIZ DE MASA

[m]=Armatrizm(m_,n);

% FRECUENCIAS DE CASA PISO (wni-wn)

wni=eig(k,m,'chol')%orden las Frecuencias de menor a mayor "Matriz
espectral"

wn=nthroot(wni,2)%wn= Resuelve el polinomio

% MODOS DE VIBRACION

[PHI,OMEGA]=eig(k,m); %obtenemos matriz espectral ("OMEGA") y matriz
modal normalizada ("PHI")

% ORTOGONALIDAD DE LOS MODOS

o=PHI(:,2)'*m*PHI(:,1);

% Encontramos "K" y "M" (matrices desacopladas)
```

```

K=PHI'*k*PHI;

M=PHI'*m*PHI; % MATRIZ IDENTIDAD

v=PHI';

Po=PHI'*po';

% FORMULA DESPLAZAMIENTO EN ESTADO ESTACIONARIO

[qn_1 qn t Un Un1]=Desplazamiento1VASNAEE(Po,K,W,wn,PHI,t0,pa,tf,n);

% GRAFICAS

% GRAFICAS LOS MODOS DE VIBRACION

y(1)=0;

sumaPiso=0;

    for j=1:n

        sumaPiso=sumaPiso+ Hp(j)

        y(j+1)=sumaPiso;

    end

for i=1:n

    figure

    x=[0;PHI(:,i)]

    plot(x,y,'--b','LineWidth',1);ylabel('A L T U R A O M E G A E P I S O');xlabel('O M E G A E S P L A Z A M I E N T O');

    grid on;

    hold on;

    titulo=num2str(i);

    title(strcat('Modo - ', titulo));

    x=zeros(1,n+1);

    plot(x,y,'-mo',...

        'LineWidth',3,...

        'MarkerEdgeColor','k',...

        'MarkerFaceColor',[.49 1 .63],...

        'MarkerSize',10);

    end

% GRAFICAS DE TODOS LOS MODOS DE VIBRACION EN LA ESTRUCTURA

figure

```

```

hold on
grid on
for i=1:n
    x=[0;PHI(:,i)];
    if(mod(i, 2) == 0)
        plot(x,y,'--c','LineWidth',2);
    else
        if (mod(i, 3) == 0)
            plot(x,y,'--r','LineWidth',2);
        else
            plot(x,y,'--b','LineWidth',2);
        end
    end
end
x=zeros(1,n+1);
plot(x,y,'-mo',...
      'LineWidth',3,...
      'MarkerEdgeColor','k',...
      'MarkerFaceColor',[.49 1 .63],...
      'MarkerSize',10);
title('M O D O S   D E   V I B R A C I O N'); ylabel('A L T U R A   D E
P I S O S');xlabel('D E S P L A Z A M I E N T O');
for piso=1:n
    for modo=1:n
        for j=1:length(t)

            Un1(piso,j)=Un1(piso,j)+Un(piso,j,modo);

        end
    end

    figure
    plot (t,Un1(piso,:))
    grid on;

```

```

    hold on

    title(strcat('D E S P L A Z A M I E N T O M O D A L . M o d o-',
num2str(piso)));

    ylabel('D E S P L A Z A M I E N T O');xlabel('T I E M P O');
end

Figura total de todos los desplazamientos nodales

figure

    title('D E S P L A Z A M I E N T O M O D A L. Todos los modos-
');

    ylabel('D E S P L A Z A M I E N T O');xlabel('T I E M P O')

    grid on;

    hold on;
for i=1:n
    plot (t,Un1(i,:));
end

% Imprime el total del desplazamiento modal
for i=1:n
t_imrpimir(i,:)=t;
end

text_tiket=fopen('RESULTADOS DE SALIDA.txt','wt');
for i=1:n
fprintf(text_tiket,[ 't ']);

    for k=1:length(t_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(t_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end

    fprintf(text_tiket,['\n']);
end

for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Un1 ']);

    for k=1:length(Un1(i,:))
        fprintf(text_tiket,[ num2str(Un1(i,k)) ' ']);
    end
end

```

```

        fprintf(text_tiket, ['\n']);
    end
    for i=1:size(v,1);
        fprintf(text_tiket, [ 'v ']);
        for k=1:length(v)
            fprintf(text_tiket, [ num2str(v(i,k)) ' ']);
        end
        fprintf(text_tiket, ['\n']);
    end
end

```

ANEXO G. Función del desplazamiento no amortiguado en estado estacionario.

```

function [qn_1 qn t Un
Un1]=Desplazamiento1VASNAEE (Po,K,W,wn,PHI,t0,pa,tf,n);

t=t0:pa:tf;
for i=1:n
    for j=1:n
        if(i==j)

            qn_1(i)=(Po(i))/(K(i,i))*((1)/(1-((W(i))/(wn(i)))^2)))

            for k=1:length(t);
                qn(i,k)=qn_1(i)*sin(W(i)*t(k));
            end
        end
    end
end
end
for modo=1:n
    for i=1:n
        for j=1:length(t)
            Un(i,j,modo)=PHI(i,modo)*qn(modo,j);
        end
    end
end

```

```

        end

    end

end

Un1=zeros(n,length(t));

```

ANEXO H. Código fuente del experimento “Análisis modal de un sistema en vibración armónica amortiguado en estado estacionario”.

```

%VIBRACIÓN ARMÓNICA DE UN SISTEMA AMORTIGUADO EN ESTADO ESTACIONARIO

function[K]= VASAE2(k_,m_,c_,t0,pa,tf,po,W,Hp,n);

% DATOS ENTRADA

%dimensión del vector= (1fila * n-columnas)= [n n1 n2 n3 n4 n5...n]

%k_ = [] Vector de valores que contiene la rigidez de cada piso

%c_ = [] Vector de valores que contiene el amortiguamiento de cada piso.

%m_ = [] Vector de valores que contiene la masa de cada piso.

%po= [] Vector de valores que contiene la carga de cada piso.

%W= [] Vector de valores que contiene la frecuencia de carga por cada
piso.

%t0= Tiempo inicial.

%pa= Incremento de tiempo.

%tf= Tiempo final.

%Hp= [] Vector de valores que contiene las alturas parciales de cada
piso.

%n= Numero de grados de libertad.

k=zeros(n,n);

% PARA OBTENER LA MATRIZ DE RIGIDEZ

[k]=Armatrizk(k_,n);

% MATRIZ DE MASA

[m]=Armatrizm(m_,n);

% MATRIZ DE AMORTIGUAMIENTO

[c]= Armatrizc(c_,n);

FRECUENCIAS DE CASA PISO (wni-wn)

```

```

wni=eig(k,m,'chol')%ordena las Frecuencias de menor a mayor "Matriz
Espectral"

wn=nthroot(wni,2)%Resuelve el polinomio.

% MODOS DE VIBRACIÓN

[PHI,OMEGA]=eig(k,m); %obtenemos matriz espectral ("OMEGA") y matriz
modal normalizada ("PHI")

% ORTOGONALIDAD DE LOS MODOS

o=PHI(:,2)'*m*PHI(:,1);

%Encontramos M, C, y K matrices desacopladas

M=PHI'*m*PHI;

C=PHI'*c*PHI;

K=PHI'*k*PHI;

v=PHI';

Po=PHI'*po';

% Amortiguamientos xi

for i=1:n

    Cn(i)= PHI(:,i)'*c*PHI(:,i);

Mn(i)= PHI(:,i)'*m*PHI(:,i);

end

for i=1:n

    %amortiguamientos Ei=(C/2*M*Wn)

    xi(i)=Cn(i)/(2*Mn(i)*wn(i));

end

%FORMULA DEL DESPLAZAMIENTO ESTADO ESTACIONARIO CON AMORTIGUAMIENTO
VISCOZO

[Cn Dn t qnn]=Desplazamiento1VASAEE(Po,K,W,wn,xi,t0,pa,tf,n);

for modo=1:n

    for i=1:n

        for j=1:length(t)

            Un(i,j,modo)=PHI(i,modo) *qnn(modos,j);

        end

    end

end

```



```

end

% Sumatoria de todos los modos de vibración
Un1=zeros (n,length(t));

% GRAFICAS LOS MODOS DE VIBRACIÓN
y(1)=0;
sumaPiso=0;

    for j=1:n

        sumaPiso=sumaPiso+ Hp(j);

        y(j+1)=sumaPiso;

    end
for i=1:n

    figure

    x=[0;PHI(:,i)];

    plot(x,y,'--b','LineWidth',1);ylabel('A L T U R A   O M E G A   E   P I S
O');xlabel('O M E G A   E S P L A Z A M I E N T O');

    grid on;

    hold on;

    titulo=num2str(i);

    title(strcat('Modo- ', titulo));

    x=zeros(1,n+1);

    plot(x,y,'-mo',...

        'LineWidth',3,...

        'MarkerEdgeColor','k',...

        'MarkerFaceColor',[.49 1 .63],...

        'MarkerSize',10);

    end

GRAFICAS DE TODOS LOS MODOS DE VIBRACION EN LA ESTRUCTURA

figure

hold on

grid on

for i=1:n

    x=[0;PHI(:,i)];

```

```

    if(mod(i, 2) == 0)
        plot(x,y,'--c','LineWidth',2);
    else
        if (mod(i, 3) == 0)
            plot(x,y,'--r','LineWidth',2);
        else
            plot(x,y,'--b','LineWidth',2);
        end
    end
end
end
x=zeros(1,n+1);
plot(x,y,'-mo',...
      'LineWidth',3,...
      'MarkerEdgeColor','k',...
      'MarkerFaceColor',[.49 1 .63],...
      'MarkerSize',10);

title('M O D O S   D E   V I B R A C I O N'); ylabel('A L T U R A   D E
P I S O S');xlabel('D E S P L A Z A M I E N T O');

for piso=1:n
for modo=1:n
for j=1:length(t)

Un1(piso,j)=Un1(piso,j)+Un(piso,j,modo);
end
end

figure
    plot (t,Un1(piso,:));
    grid on;
    hold on;

    title(strcat('D E S P L A Z A M I E N T O   M O D A L . M o d o-',
num2str(piso)));
    ylabel('D E S P L A Z A M I E N T O');xlabel('T I E M P O');

```

```

end

figure
title('D E S P L A Z A M I E N T O   M O D A L. Todos los modos-');
ylabel('D E S P L A Z A M I E N T O');xlabel('T I E M P O');
hold on
grid on
for i=1:n
    plot (t,Un1(i,:));
end

%Imprime el total de los desplazamiento modales
for i=1:n
    t_imrpimir(i,:)=t;
end
text_tiket=fopen('RESULTADOS DE SALIDA.txt','wt');
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 't ']);

    for k=1:length(t_imrpimir)
        fprintf(text_tiket,[ num2str(t_imrpimir(i,k)) ' ']);
    end
    fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:n
    fprintf(text_tiket,[ 'Un1 ']);
    for k=1:length(Un1(i,:))
        fprintf(text_tiket,[ num2str(Un1(i,k)) ' ']);
    end
    fprintf(text_tiket,['\n']);
end
for i=1:size(v,1);
    fprintf(text_tiket,[ 'v ']);

```

```

for k=1:length(v)

    fprintf(text_tiket,[ num2str(v(i,k)) ' ']);

end

    fprintf(text_tiket,['\n']);

end

```

ANEXO I. Función del desplazamiento amortiguado en estado estacionario.

```

function [Cn Dn t qnn]=Desplazamiento1VASAEE(Po,K,W,wn,xi,t0,pa,tf,n);
t=t0:pa:tf;
for i=1:n
    for j=1:n
        if(i==j)
            Cn(i)=(Po(i))/(K(i,i))*((1-(W(i)/wn(i))^2))/((1-(W(i)/wn(i))^2)^2+(2*xi(i)*(W(i)/wn(i))^2));
            Dn(i)=(Po(i))/(K(i,i))*((-2*xi(i)*(W(i)/wn(i)))/((1-(W(i)/wn(i))^2)^2+(2*xi(i)*(W(i)/wn(i))^2)));
            for k=1:length(t);
                qnn(i,k)=Cn(i)*sind(W(i)*t(k))+Dn(i)*cosd(W(i)*t(k));
            end
        end
    end
end
end
end

```

Funciones que permiten armar las matrices de las propiedades mecánicas de un sistema de varios grados de libertad utilizando la metodología del análisis modal.

ANEXO J. Función Armatrizm (Arma la matriz de masa).

```

%% Función arma la matriz de masa (m_) para "n" grados de libertad.
function [m]=Armatrizm(m_,n);
m=zeros(n,n);
for filas=1:n

```

```

        for columnas=1:n
            if (filas == columnas)%%obtengo la diagonal (fila=columna)
                m(filas,columnas)=m_(filas);
            end
        end
    end
end

```

ANEXO K. Función Armatrizc (Arma la matriz de amortiguamiento).

```

%% Función que permite armar la matriz de amortiguamiento (c_) para "n"
grados de libertad.

function [c]= Armatrizc(c_,n);
c=zeros(n,n);
for filas=1:n
    for columnas=1:n
        if (filas == columnas)
            if(filas~=n)
                c(filas,columnas)=c_(filas)+c_(filas+1);
                c(filas,columnas+1)=-c_(filas+1);
                c(filas+1,columnas)=-c_(filas+1);
            end
            if(filas==n);
                c(filas,columnas)=c_(n);
            end
        end
    end
end
end

```

ANEXO L. Función Armatrizk (Arma la matriz de rigidez).

```
%% Función que permite armar la matriz de rigidez (k_) para "n" grados
de libertad.

function [k]=Armatrizk(k_,n);

for filas=1:n

    for columnas=1:n

        if (filas == columnas)

            if(filas~=n)

                k(filas,columnas)=k_(filas)+k_(filas+1);

                k(filas,columnas+1)=-k_(filas+1);

                k(filas+1,columnas)=-k_(filas+1);

            end

            if(filas==n);

                k(filas,columnas)=k_(n);

            end

        end

    end

end

end
```

Códigos fuente de la sub-herramienta “Espectro de diseño a partir de registros de aceleraciones sísmicas”

ANEXO M. Función LeerSismos.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Autor: Santiago Quiñones Cuenca.

% function [matrizDeSismos, arrTiempo, arrCantidadElementos, nameFiles]
% = leerSismos(directory_name)

%% LEERSISMOS read files of earquakes

%% SYNOPSIS: [a, b, c]=leerSismos(b)

% INPUT b: directory name

% OUTPUT a: matrix of eartquakes
```

```

%      b: matrix of time
%      c: matrix - number of data for file

% ruta del archivo con los datos formateados (sin tabuladores, sin
% espacios en blanco)
fileFormat = strcat(directory_name, '\file.temp');

% factores de tiempo
arrTiempo = [];
arrCantidadElementos = [];
nameFiles = '';
if exist(fileFormat, 'file')==2
    delete(fileFormat);
end

% convierte en un dato de tipo directorio
files = dir(directory_name);

% indexa todos los archivos que se encuentran en la carpeta
fileIndex = find(~[files.isdir]);

% matriz donde se almacenara los registros sismicos
matrizDeSismos = {};

try
    for i = 1:length(fileIndex)
        % obtiene el nombre del archivo
        fileName = files(fileIndex(i)).name;
        nameFiles = [nameFiles fileName ' '];
        % captura la ruta completa del archivo
        pathfile = strcat(directory_name, '\', fileName);

% genera el archivo temporal sin espacios ni tabuladores
% y devuelve el número de líneas de la cabecera y el factor de
% tiempo

        [factorTiempo, nroLineasExcluir] =
prepararRegistros(pathfile, fileFormat);

        %almacena el factor de tiempo
        arrTiempo(end+1) = factorTiempo;
    end
catch
end

```

```

        % el espacio es el separador entre valores, y el 4 indica
        % las líneas a excluir

        matrizDeSismos(end + 1) = {dlmread(fileFormat, '
',nroLineasExcluir,0)};

        % determina la cantidad de elementos

        [x y] = size(matrizDeSismos{end});

        aux=matrizDeSismos{end};

        arrCantidadElementos(end+1) = (x * y)-sum(aux(end,:)==0);

        % si el archivo es de PEER se ajusta los datos
multiplicando por

        % 980

        if nroLineasExcluir == 1

            matrizDeSismos{end} = matrizDeSismos{end} .* 981;

        end

    end

catch

    disp('El error al cargar los datos a las matrices');

end

% borra el archivo temporal

delete(fileFormat);

end

% recibe los archivos sísmicos y los convierte a un formato genera
donde

% los separadores son espacios

function[factorTiempo, nroLineasEncabezado] =
prepararRegistros(pathFileInput, pathFileFormat)

    factorTiempo = 0.015;

    nroLineasEncabezado = 1;

    finput = fopen(pathFileInput, 'r');

    ftemp = fopen(pathFileFormat, 'w' );

    try

        % lee la primera línea del archivo

        tline = fgetl(finput);

```



```

buscar = findstr('RENAC', tline);

%disp(strcat('Procesando archivo >> ', pathFileInput))

if buscar > 0 % si existe algun archivo RENAC

    tline = fgetl(finput);
    tline = fgetl(finput);
    tline = fgetl(finput);
    tline = fgetl(finput);
    tline = fgetl(finput);
    tline = fgetl(finput);
    tline = fgetl(finput);

    % obtiene el factor de tiempo de los archivos RENAC

    aux = tline;
    aux = strtrim(aux);
    aux = regexp(aux, '\s+', ' ');
    datos = strread(aux, '%s');
    factorTiempo = 1 / str2double(datos(5));
    nroLineasEncabezado = 3;

else

    tline = fgetl(finput);
    tline = fgetl(finput);
    tline = fgetl(finput);

    % obtiene el factor de tiempo de los archivos PEER

    aux = tline;
    aux = strtrim(aux);
    aux = regexp(aux, '\s+', ' ');
    datos = strread(aux, '%s');
    factorTiempo = str2double(datos(4));

end

while ischar(tline)

    tline = strtrim(tline);
    tline = regexp(tline, '\s+', ' ');

```

```

        fprintf( ftemp, '%s\n', tline);

        tline = fgetl(finput);

    end

catch

    disp('Error al preparar archivos.');
```

```

end

fclose(ftemp);

fclose(finput);

end

```

ANEXO N. Función SDOF.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Programa: Obtiene la respuesta en el tiempo para un SDOF sometido a
%cargas sísmicas. La metodología aplicada es la de Newmark
% ESCRITO POR: Edwin Duque, Junio 2016
% Descripción de la función.

%               function [u,v,ac]=SDOF(m,c,k,Ag,dt)
%
%
% DATOS DE ENTRADA
%
% m,c,k= masa, Amortiguamiento y Rigidez
% Ag= Registro sísmico. Formato [ ]nx1
% dt= Incremento de tiempo con el que fue obtenido el registro
%
% DATOS DE SALIDA
%
% u,v,ac= Respuesta en el tiempo de desplazamiento, velocidad y
% aceleración.
%
% Ultima revisión: Junio 2016
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [u,v,ac]=SDOF(m,c,k,Ag,dt);

u=zeros(length(Ag),1);

v=zeros(length(Ag),1);

```

```

ac=zeros(length(Ag),1);

t0=0; n=length(Ag); tf=round(n*dt);

t=linspace(t0,tf,n)';

K=k+3*c/dt+6*m/(dt)^2;

    a=6*m/dt+3*c;

    b=3*m+dt*c/2;

    for i=1:(length(Ag))-1

        u(1,1)=0; %initial conditions

        v(1,1)=0;

        ac(1,1)=0;

        df=-(Ag(i+1)-Ag(i))+a*v(i,1)+b*ac(i,1); % delta Force

        du=df/K;

        dv=3*du/dt-3*v(i,1)-dt*ac(i,1)/2;

        dac=6*(du-dt*v(i,1))/(dt)^2-3*ac(i,1);

        u(i+1,1)=u(i,1)+du;

        v(i+1,1)=v(i,1)+dv;

        ac(i+1,1)=ac(i,1)+dac;

    end

subplot(3,1,1); plot(t,u);ylabel('u(t) (cm)','FontSize',13)

title('RESPUESTA EN EL TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO, VELOCIDAD Y
ACELERACION RELATIVA','FontSize',13)

hold on

subplot(3,1,2); plot(t,v);ylabel('v(t) (cm)','FontSize',13)

hold on

subplot(3,1,3); plot(t,ac);xlabel('tiempo(s)','FontSize',13);
ylabel('a(t)','FontSize',13); hold off

```

ANEXO Ñ. Función SPECT.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa: Obtiene el espectro de respuesta elástico para un sismo.
%
%El amortiguamiento del espectro de respuesta es ingresado por el
%usuario pudiendo ser un valor único o un vector de factores de
%amortiguamiento.
% ESCRITO POR: Edwin Duque, Junio 2016
% Descripción de la función.
%
%               function [T,Psa,Psv,Sd]=SPECT(Ag,dt,xi)
%
%
%
% DATOS DE ENTRADA
%
% Ag=Registro de aceleraciones sismicas (cm/s2)
% dt= Incremento de tiempo con el que fue tomado el registro
% xi= amortiguamiento del espectro (e.g 0.05)
%
% DATOS DE SALIDA
%
% T=Periodo de la estructura (s)
% Psa= Espectro de respuesta de pseudoaceleración
% Psv= Espectro de respuesta de pseudovelocidad
% Sd= Espectro de respuesta de desplazamiento
% Ultima revision: Junio 2016
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [T,Psa,Psv,Sd]=SPECT(Ag,dt,xi)
g=981;
Ag(end+1,1)=0;
T0=0.00; Tf=4; incT=0.01; n=(Tf/incT);
T=linspace(T0,Tf,n)';
for i=1:length(xi)
    for j=1:n
```

```

        omega(j,1)=2*pi/T(j);

        m=1;

        c=2*m*omega(j)*xi(i);

        k=(omega(j))^2*m;

        [u,v,ac]=SDOF(m,c,k,Ag,dt);

        Sd(j,i)=max(abs((u(:,1)))));

        Psv(j,i)=Sd(j,i)*omega(j);

        Psa(j,i)=Sd(j,i)*(omega(j))^2/g;

        Sd(2,1)=0; Spv(1:2,1)=0; Spa(1:2,1)=max(abs(Ag))/g;

    end

end

figure('Name','Spectral Displacement','NumberTitle','off')
plot(T,Sd,'LineWidth',2.)
grid on
xlabel('Period (sec)','FontSize',13);
ylabel('Sd (mm)','FontSize',13);
title('Displacement Spectrum','FontSize',13)

figure('Name','Pseudo Acceleration Spectrum','NumberTitle','off')
plot(T,Psa,'LineWidth',2.)
grid on
xlabel('Period (sec)','FontSize',13);
ylabel('Psa (g)','FontSize',13);
title('Pseudo Acceleration Spectrum','FontSize',13)

figure('Name','Pseudo Velocity Spectrum','NumberTitle','off')
plot(T,Psv,'LineWidth',2.)
grid on
xlabel('Period (sec)','FontSize',13);
ylabel('Psv (cm/s^2)','FontSize',13);
title('Pseudo Velocity Spectrum','FontSize',13)

```

ANEXO O.

EJERCICIO DE APLICACIÓN UTILIZANDO EL ANÁLISIS MODAL PARA UN SISTEMA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD EN VIBRACIÓN LIBRE AMORTIGUADO

EJEMPLO

Determinar la respuesta máxima en un tiempo de $10s$ de la estructura que se aprecia en la figura 2, si las propiedades mecánicas y condiciones iniciales de cada nivel son las siguientes:

a) Masa:

$$m_1 = 25tonf \quad m_2 = 25tonf \quad m_3 = 12.5tonf$$

b) Rigidez:

$$k_1 = 3212 \frac{tonf}{m} \quad k_2 = 3212 \frac{tonf}{m} \quad k_3 = 3212 \frac{tonf}{m}$$

c) Vector del desplazamiento inicial en coordenadas nodales:

$$u_0 = [0.1; 0.02; 0.4]m$$

d) Vector de la velocidad inicial en coordenadas nodales:

$$\dot{u}_0 = [0.01; 0.03; 0.05] \frac{m}{s}$$

e) Amortiguamiento crítico:

$$\xi = 0.05$$

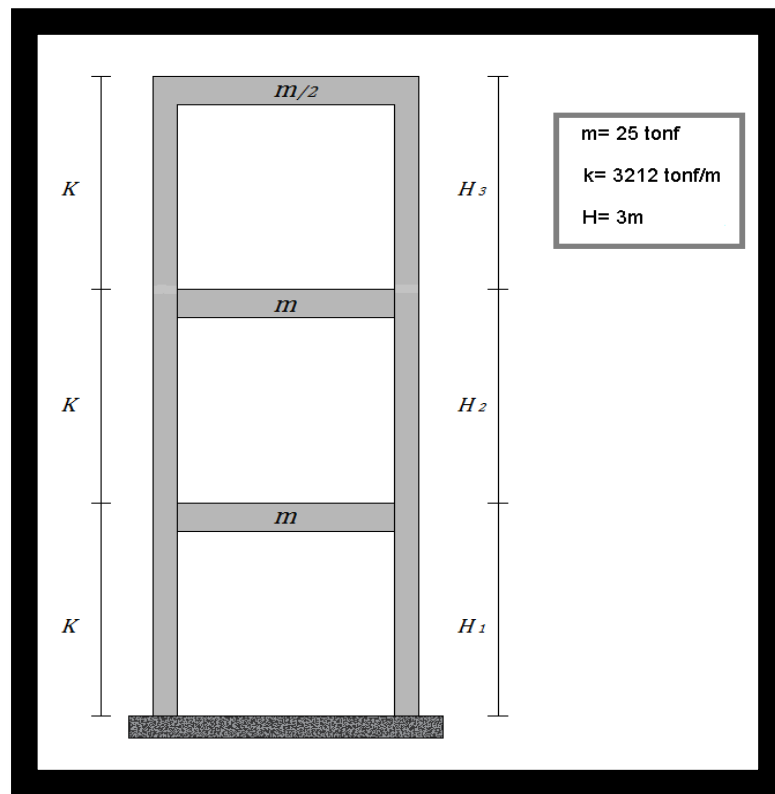


Figura 58. Pórtico de hormigón armado con tres niveles.

Procedimiento:

Obtener matriz de masa (m).

Modelo general de la matriz de masa para dos grados de libertad.

$$m = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}$$

El ejercicio propuesto presenta tres grados de libertad, como se observa en la figura 2, por lo tanto la matriz de masa es la siguiente:

$$m = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 25.0 & 0 & 0 \\ 0 & 25.0 & 0 \\ 0 & 0 & 12.5 \end{pmatrix}$$

Obtener la matriz de rigidez (k).

Modelo general de la matriz de rigidez para dos grados de libertad.

$$k = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix}$$

El ejercicio propuesto presenta tres grados de libertad, como se observa en la figura 2, por lo tanto la matriz de rigidez es la siguiente:

$$k = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6424 & -3212 & 0 \\ -3212 & 6424 & -3212 \\ 0 & -3212 & 3212 \end{pmatrix}$$

Obtener matriz de amortiguamiento (c).

Modelo general de la matriz de amortiguamiento para dos grados de libertad.

$$c = \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix}$$

Para obtener el amortiguamiento teórico de la matriz (c), se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n}$$

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

$$c = 2\xi m\omega_n$$

$$c = 2\xi m \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$c = \left[2 \times 0.05 \times 25 \times \sqrt{\frac{3212}{25}} \right] = 28.34$$

El ejercicio propuesto presenta tres grados de libertad, como se observa en la figura 2, por lo tanto la matriz de amortiguamiento es la siguiente:

$$c = \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 56.68 & -28.34 & 0 \\ -28.34 & 56.68 & -28.34 \\ 0 & -28.34 & 28.34 \end{pmatrix}$$

Determinación de frecuencias de cada piso (ω_n).

$$\det[k - m\omega_n^2] = 0$$

$$\det \left[\begin{pmatrix} 6424 & -3212 & 0 \\ -3212 & 6424 & -3212 \\ 0 & -3212 & 3212 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 25\omega_n^2 & 0 & 0 \\ 0 & 25\omega_n^2 & 0 \\ 0 & 0 & 12.5\omega_n^2 \end{pmatrix} \right] = 0$$

Las frecuencias correspondientes a cada piso van de menor a mayor, es decir desde el piso 1 hasta el piso n .

$$\omega_{n1}^2 = 34.4261, \omega_{n2}^2 = 256.9600, \omega_{n3}^2 = 479.4939$$

$$\omega_{n1} = 5.8674, \omega_{n2} = 16.0300, \omega_{n3} = 21.8973$$

Obtener los modos de vibración (ϕ_n) normalizados con respecto a la masa.

Se obtiene la matriz modal (ϕ).

$$\phi^T m \phi = I$$

$$\phi = \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1633 & -0.0816 \\ 0.1414 & -0.0000 & 0.1414 \\ 0.1633 & -0.1633 & -0.1633 \end{pmatrix}$$

$$m = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 12.50 \end{pmatrix}$$

$$\phi^T = \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1414 & 0.1633 \\ 0.1633 & -0.0000 & -0.1633 \\ -0.0816 & 0.1414 & -0.1633 \end{pmatrix}$$

I = Matriz identidad, donde en su diagonal presenta valores iguales a la unidad

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1414 & 0.1633 \\ 0.1633 & -0.0000 & -0.1633 \\ -0.0816 & 0.1414 & -0.1633 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 12.50 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1633 & -0.0816 \\ 0.1414 & -0.0000 & 0.1414 \\ 0.1633 & -0.1633 & -0.1633 \end{pmatrix} = I$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Modo de vibración 1, con $\omega_{n1}^3 = 34.4261$ es igual:

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} = 0.0816 \\ \phi_{21} = 0.1414 \\ \phi_{31} = 0.1633 \end{bmatrix}$$

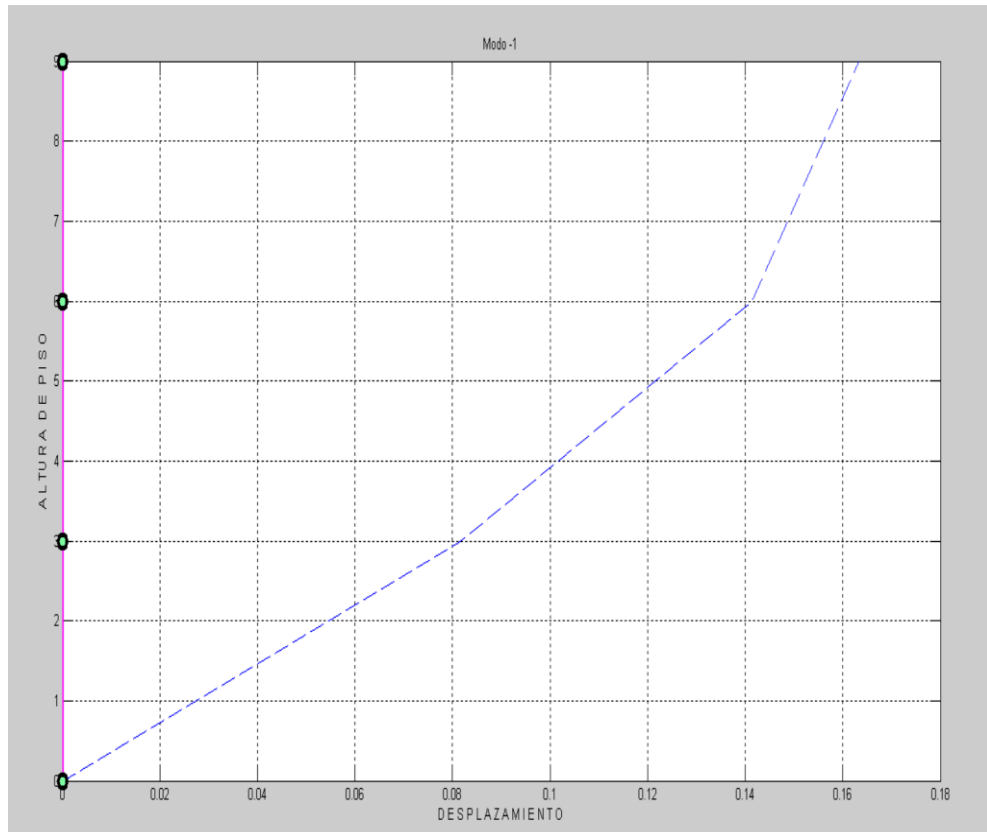


Figura 59. Modo de vibración “1”, normalizado con respecto a la masa.

Modo de vibración 1, con $\omega_{n2}^3 = 256.9600$ es igual:

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} = 0.1633 \\ \phi_{21} = 0.000 \\ \phi_{31} = -0.1633 \end{bmatrix}$$

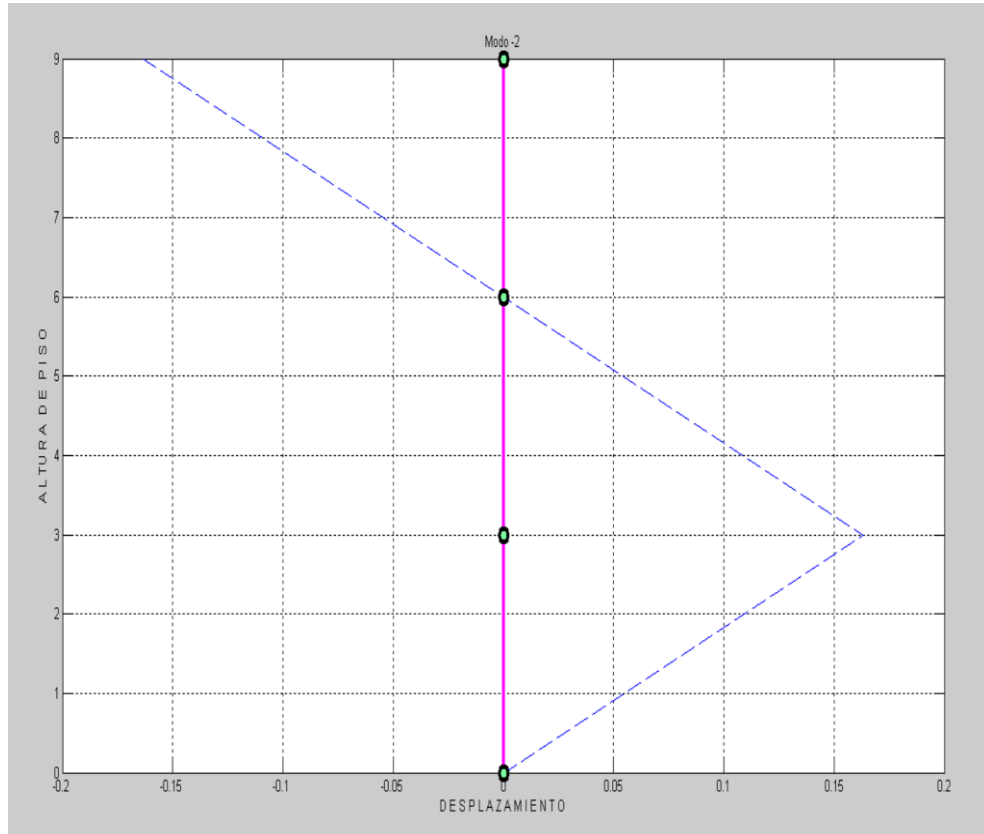


Figura 60. Modo de vibración “2”, normalizado con respecto a la masa.

Modo de vibración 1, con $\omega_{n3}^3 = 479.4939$ es igual:

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} = -0.0816 \\ \phi_{21} = 0.1414 \\ \phi_{31} = -0.1633 \end{bmatrix}$$

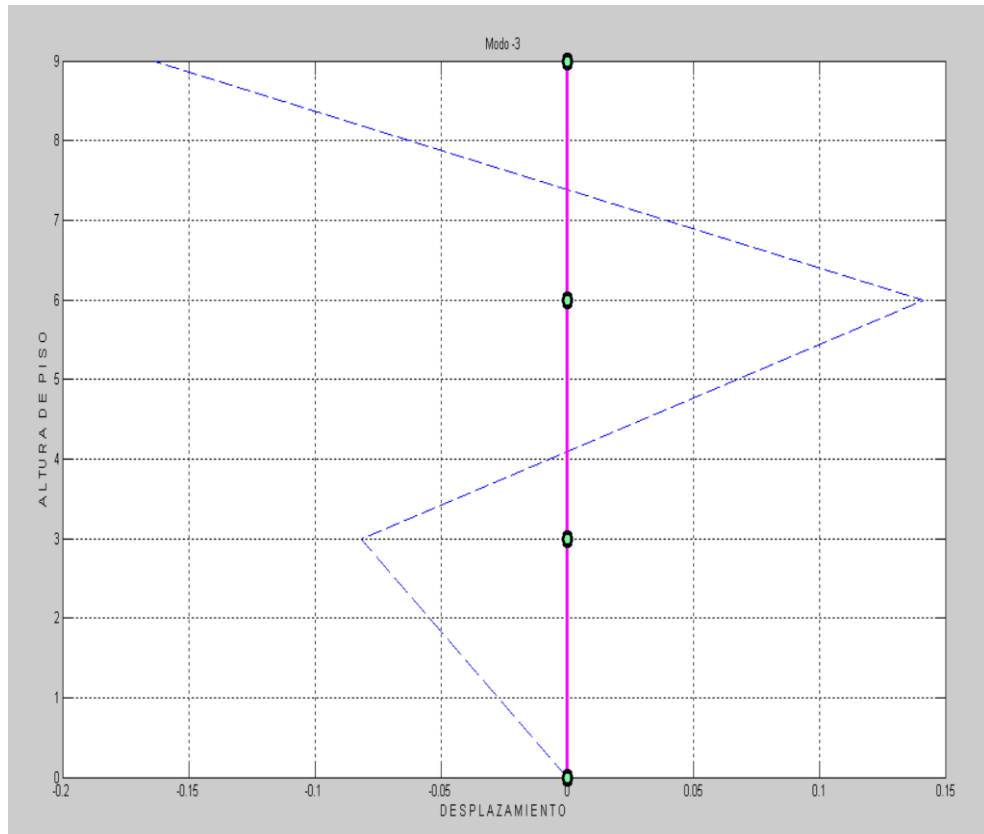


Figura 61. Modo de vibración “3”, normalizado con respecto a la masa.

Obtener la matriz modal (ϕ) .

$$\phi = \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1633 & -0.0816 \\ 0.1414 & -0.0000 & 0.1414 \\ 0.1633 & -0.1633 & -0.1633 \end{pmatrix}$$

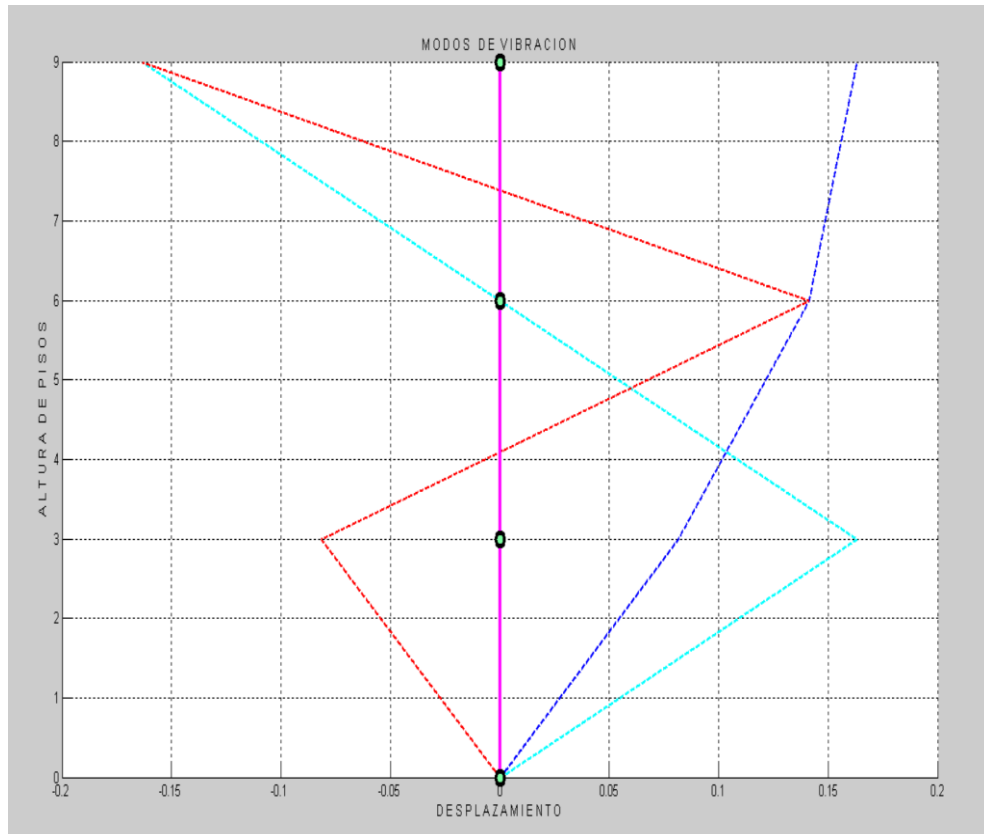


Figura 62. Modos de vibración del sistema, normalizados con respecto a la masa.

Obtenemos la matriz espectral (Ω) .

$$\Omega = \begin{pmatrix} 34.4261 & 0 & 0 \\ 0 & 256.9600 & 0 \\ 0 & 0 & 479.4939 \end{pmatrix}$$

Comprobación:

$$\phi_n^T m \phi_r = 0$$

$$\begin{bmatrix} 0.1633 & -0 & -0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 15.50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.0816 \\ 0.1414 \\ -0.1633 \end{bmatrix} = 0$$

$$0 = 0 \text{ [COMPROBADO]}$$

Encontramos $(K_n), (C_n), (M_n)$.

$$K_n = \phi^T k \phi$$

$$C_n = \phi^T c \phi$$

$$M_n = \phi^T m \phi$$

$$K_n = \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1414 & 0.1633 \\ 0.1633 & -0.0000 & -0.1633 \\ -0.0816 & 0.1414 & -0.1633 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6424 & -3212 & 0 \\ -3212 & 6424 & -3212 \\ 0 & -3212 & 3212 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1633 & -0.0816 \\ 0.1414 & -0.0000 & 0.1414 \\ 0.1633 & -0.1633 & -0.1633 \end{pmatrix}$$

$$K_n = \begin{pmatrix} 34.4261 & 0 & 0 \\ 0 & 256.9600 & 0 \\ 0 & 0 & 479.4939 \end{pmatrix}$$

$$C_n = \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1414 & 0.1633 \\ 0.1633 & -0.0000 & -0.1633 \\ -0.0816 & 0.1414 & -0.1633 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 56.68 & -28.34 & 0 \\ -28.34 & 56.68 & -28.34 \\ 0 & -28.34 & 28.34 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1633 & -0.0816 \\ 0.1414 & -0.0000 & 0.1414 \\ 0.1633 & -0.1633 & -0.1633 \end{pmatrix}$$

$$C_n = \begin{pmatrix} 0.3037 & 0 & 0 \\ 0 & 2.2672 & 0 \\ 0 & 0 & 4.2307 \end{pmatrix}$$

$$M_n = \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1414 & 0.1633 \\ 0.1633 & -0.0000 & -0.1633 \\ -0.0816 & 0.1414 & -0.1633 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 25.0 & 0 & 0 \\ 0 & 25.0 & 0 \\ 0 & 0 & 12.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.0816 & 0.1633 & -0.0816 \\ 0.1414 & -0.0000 & 0.1414 \\ 0.1633 & -0.1633 & -0.1633 \end{pmatrix}$$

$$M_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Amortiguamientos de cada modo (ξ_n).

$$\xi_n = \frac{C_n}{2M_n \omega_n}$$

$$\xi_1 = \frac{0.3037}{2 \times 1 \times 5.8674} = 0.0259$$

$$\xi_2 = \frac{2.2672}{2 \times 1 \times 16.0300} = 0.0707$$

$$\xi_2 = \frac{4.2307}{2 \times 1 \times 21.8973} = 0.0966$$

Nota: Se requiere trabajar en un mismo sistema de coordenadas, el cual trata de desacoplar las matrices y realizar el análisis del pórtico como un sistema de un grado de libertad.

Determinamos la expansión modal.

Para trabajar en un igual sistema de coordenadas, las coordenadas nodales se convierten en coordenadas modales, tanto como para el desplazamiento como velocidad, mediante la siguiente formula:

Desplazamiento:

$$q_{n(0)} = \frac{\phi_n^T m u_0}{\phi_n^T m \phi_n}$$

$$q_{n(1)} = \frac{\begin{bmatrix} 0.0816 & 0.1414 & 0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 12.50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.02 \\ 0.4 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0.0816 & 0.1414 & 0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 25.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0816 \\ 0.11414 \\ 0.1633 \end{bmatrix}} = 1.0913$$

$$q_{n(2)} = \frac{\begin{bmatrix} 0.1633 & 0 & -0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 12.50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.02 \\ 0.4 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0.1633 & 0 & -0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 25.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1633 \\ -0.0000 \\ -0.1633 \end{bmatrix}} = -0.4082$$

$$q_{n(3)} = \frac{\begin{bmatrix} -0.0816 & 0.1414 & -0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 12.50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.02 \\ 0.4 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} -0.0816 & 0.1414 & -0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 25.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0816 \\ 0.1414 \\ -0.1633 \end{bmatrix}} = -0.9499$$

Velocidad:

$$\dot{q}_{n(o)} = \frac{\phi_n^T m \dot{u}_o}{\phi_n^T m \phi_n}$$

$$\dot{q}_{n(1)} = \frac{\begin{bmatrix} 0.0816 & 0.1414 & 0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 12.50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.03 \\ 0.05 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0.0816 & 0.1414 & 0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 25.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0816 \\ 0.11414 \\ 0.1633 \end{bmatrix}} = 0.2285$$

$$\dot{q}_{n(2)} = \frac{\begin{bmatrix} 0.1633 & 0 & -0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 12.50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.03 \\ 0.05 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0.1633 & 0 & -0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 25.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1633 \\ -0.0000 \\ -0.1633 \end{bmatrix}} = -0.0612$$

$$\dot{q}_{n(3)} = \frac{\begin{bmatrix} -0.0816 & 0.1414 & -0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 12.50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.03 \\ 0.05 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} -0.0816 & 0.1414 & -0.1633 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 25.00 & 0 & 0 \\ 0 & 25.00 & 0 \\ 0 & 0 & 25.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0816 \\ 0.1414 \\ -0.1633 \end{bmatrix}} = -0.0164$$

Al obtener los datos en coordenadas modales, se procede a realizar el análisis dinámico de la figura 2 en niveles desacoplados, es decir, a cada nivel se lo analizara como un

sistema de un grado de libertad (Observar la metodología de ejercicios en vibración libre amortiguado y no amortiguado).

$$VLA(u_0, \dot{u}_0, t_0, t_f, \Delta_{pa}, m, k, \xi) = VLA(q_0, \dot{q}_0, t_0, t_f, \Delta_{pa}, M, K, \xi)$$

Nota: Realizar los apartados requeridos por la herramienta (VLA).

Resultados:

$$VLA(1.0913, 0.2285, 0, 10, 0.01, 1, 34.4261, 0.0467)$$

Detalle	Símbolo	Magnitud	Unidades
Frecuencia natural circular	ω_n	5.87	1/seg
Frecuencia natural ciclica	f_n	0.93	1/seg
Frecuencia	ω_d	5.87	1/seg
Periodo de vibracion natural	T_n	1.07	s
Periodo natural amortiguado	T_d	1.07	s
Coefficiente de amortiguamiento	C_s	0.30	tonf*s/m
Energia de entrada total	E_i	20.53	tonf*s/m
Amplitud del movimiento	r_o	1.09	m

Figura 63. Detalle de resultados del primer nivel de la figura 2.

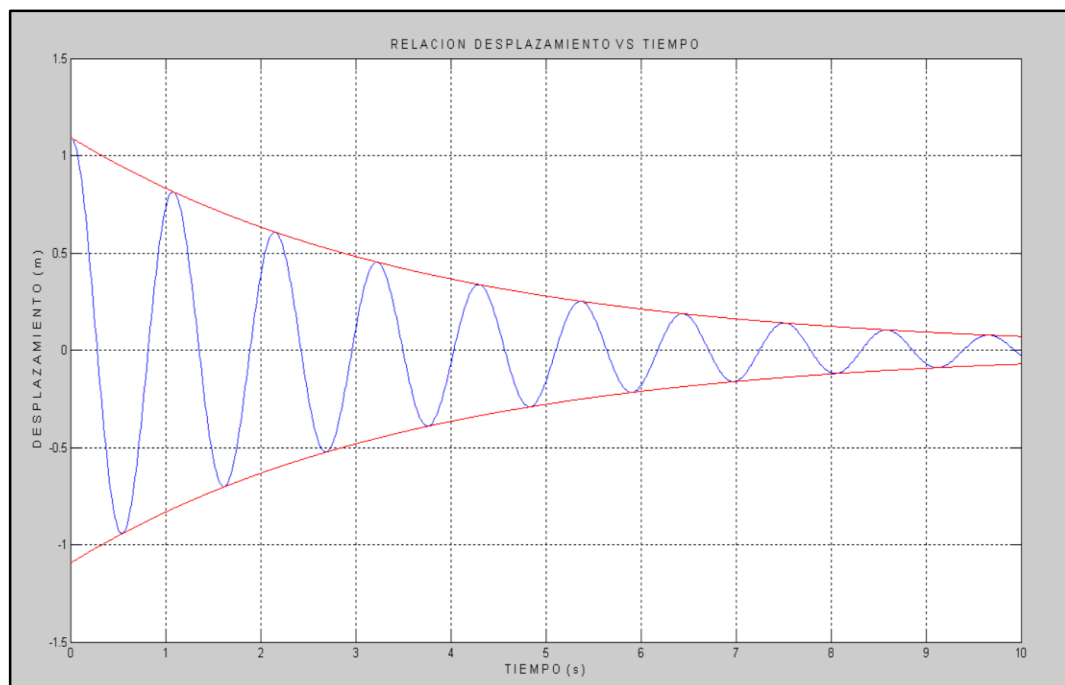


Figura 64. Relación desplazamiento vs tiempo del primer nivel de la figura 2.

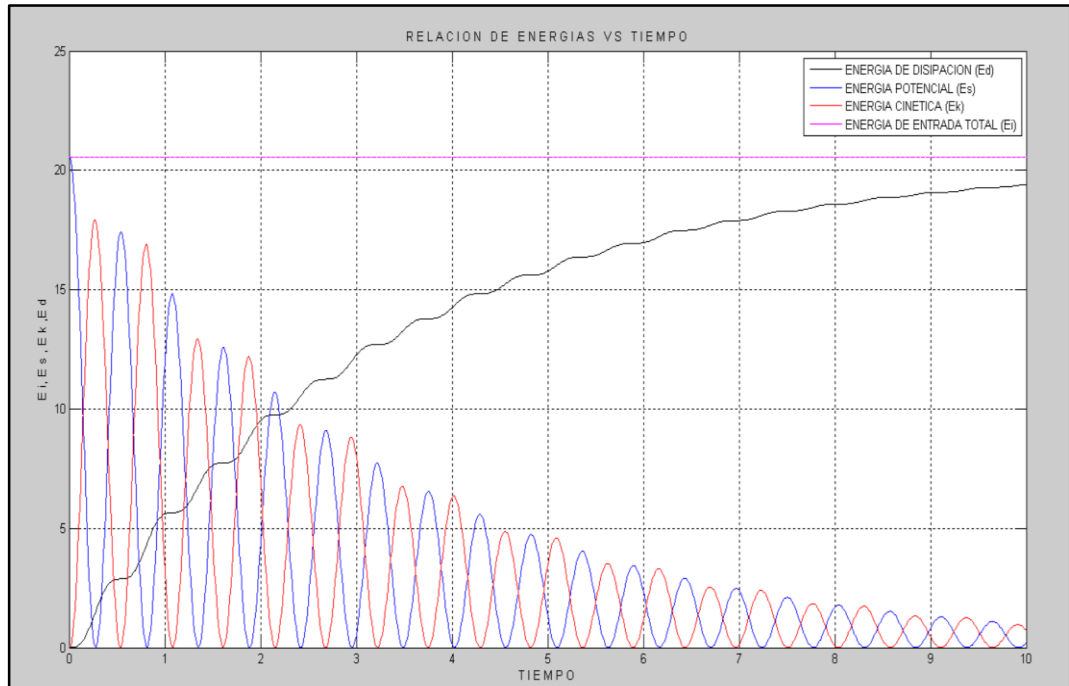


Figura 65. Total de energías del primer nivel, figura 2.

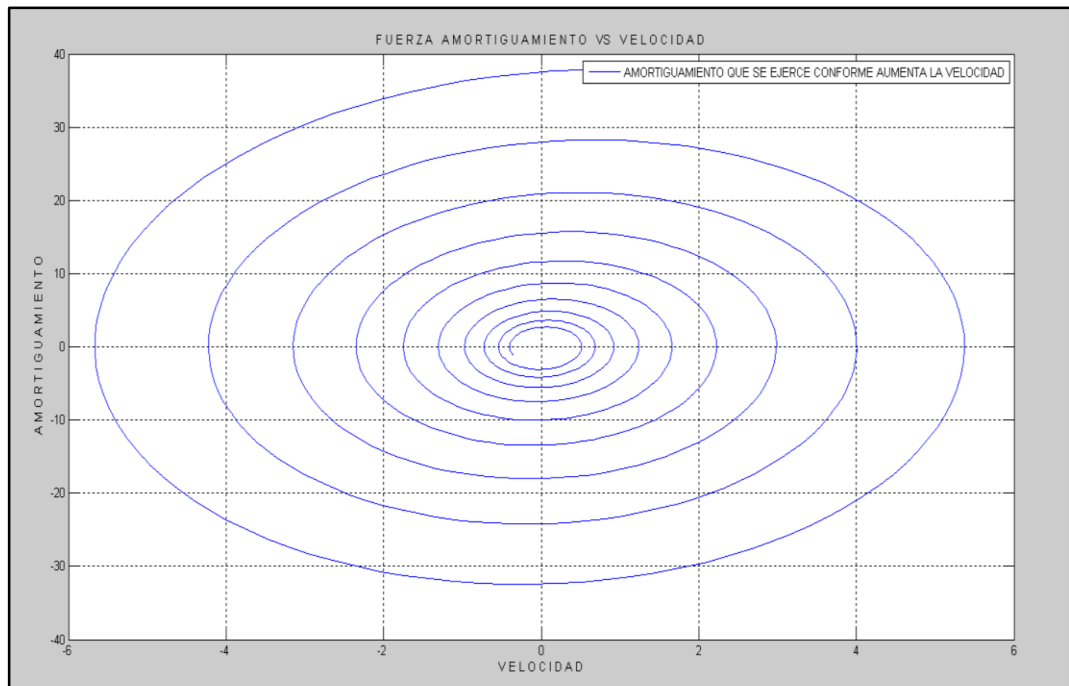


Figura 66. Histéresis del sistema del primer nivel, figura 2.

$VLA(-0.4082, -0.0612, 0, 10, 0.01, 1, 256.9600, 0.1783)$

Detalle	Símbolo	Magnitud	Unidades
Frecuencia natural circular	ω_n	16.03	1/seg
Frecuencia natural ciclica	f_n	2.55	1/seg
Frecuencia	ω_d	15.99	1/seg
Periodo de vibracion natural	T_n	0.39	s
Periodo natural amortiguado	T_d	0.39	s
Coefficiente de amortiguamiento	C_s	2.27	tonf*s/m
Energia de entrada total	E_i	21.42	tonf*s/m
Amplitud del movimiento	r_o	0.41	m

Figura 67. Detalle de resultados del segundo nivel de la figura 2.

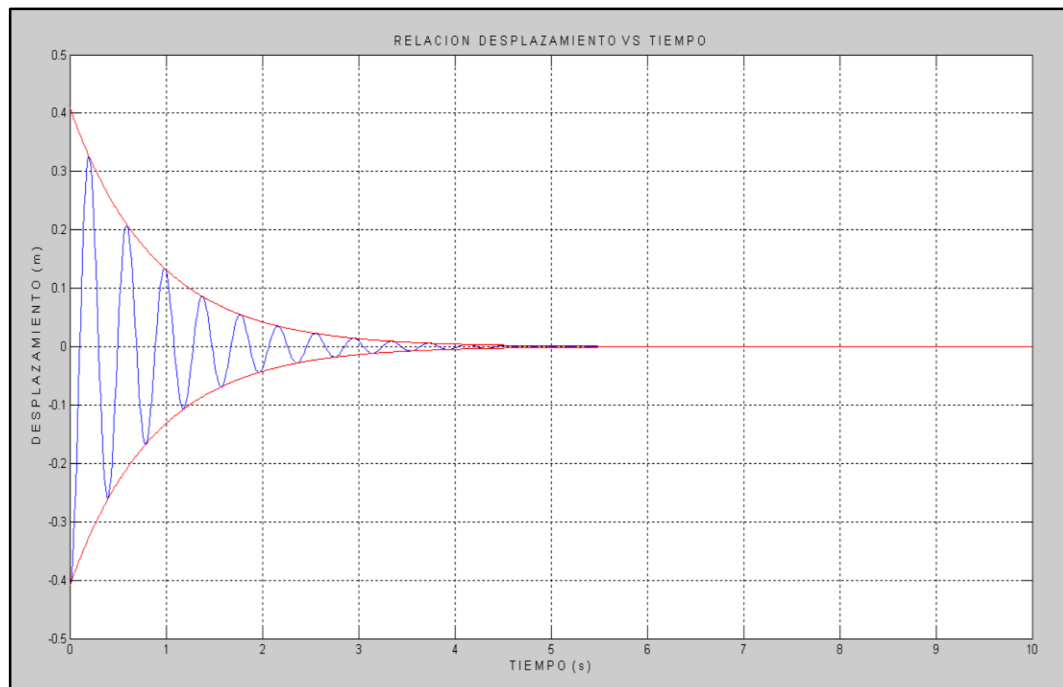


Figura 68. Relación desplazamiento vs tiempo del segundo nivel de la figura 2.

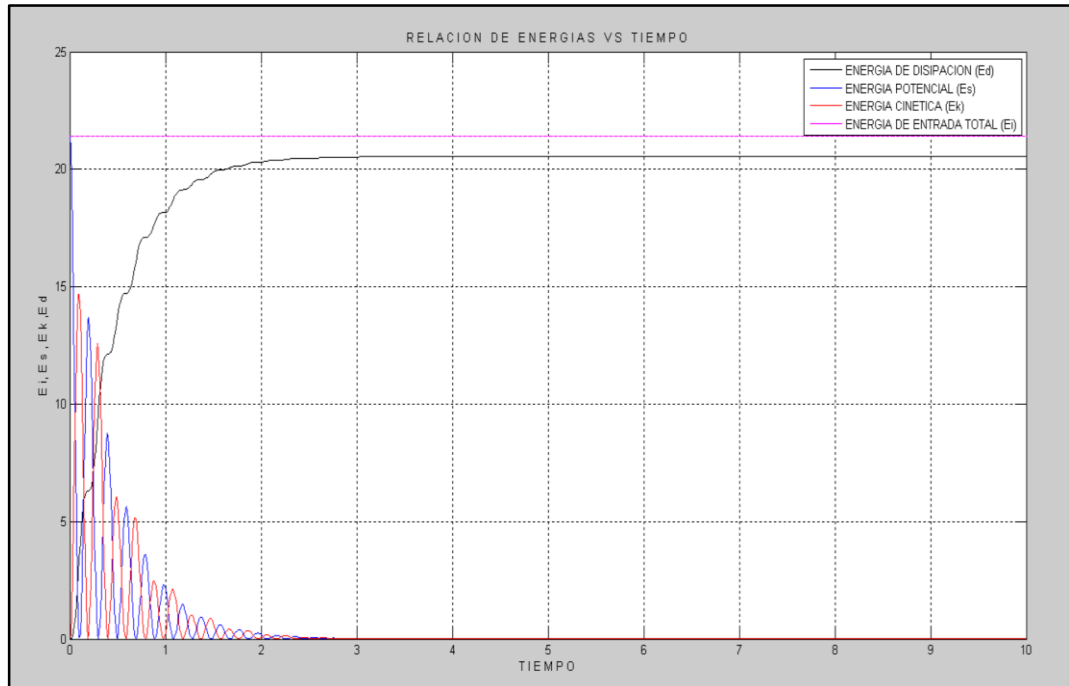


Figura 69. Total de energías del segundo nivel, figura 2.

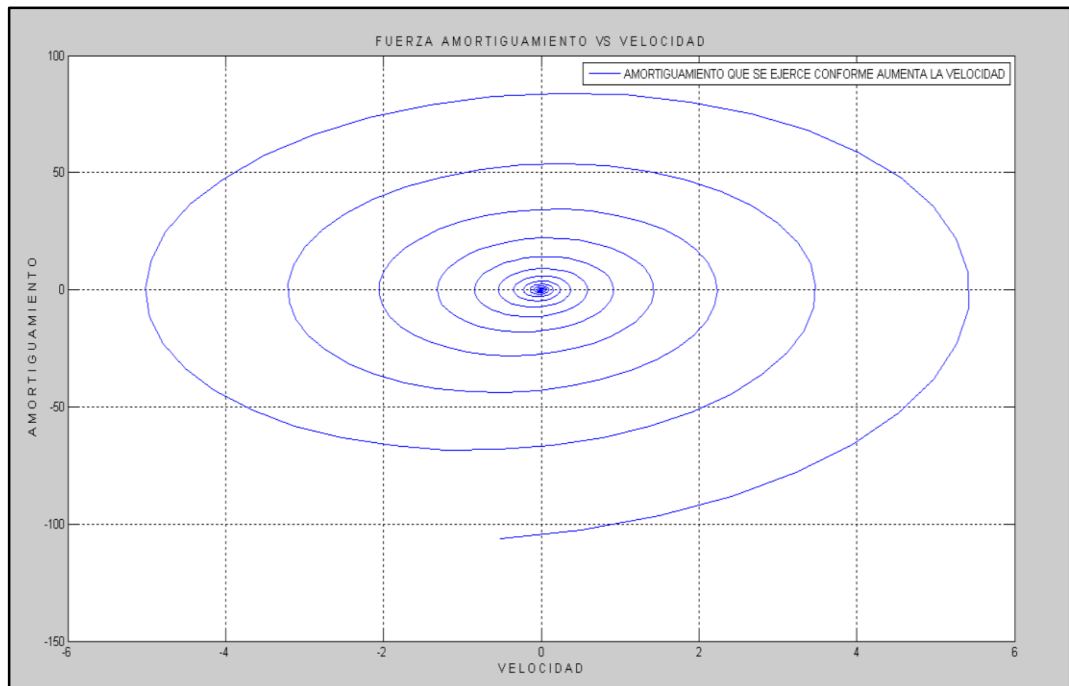


Figura 70. Histéresis del sistema del segundo nivel, figura 2.

$VLA(-0.9499, -0.0164, 0, 10, 0.01, 1, 479.4339, 0.2703)$

Detalle	Símbolo	Magnitud	Unidades
Frecuencia natural circular	ω_n	21.90	1/seg
Frecuencia natural ciclica	f_n	3.49	1/seg
Frecuencia	ω_d	21.79	1/seg
Periodo de vibracion natural	T_n	0.29	s
Periodo natural amortiguado	T_d	0.29	s
Coefficiente de amortiguamiento	C_s	4.23	tonf*s/m
Energia de entrada total	E_i	216.33	tonf*s/m
Amplitud del movimiento	r_o	0.95	m

Figura 71. Detalle de resultados del tercer nivel de la figura 2.

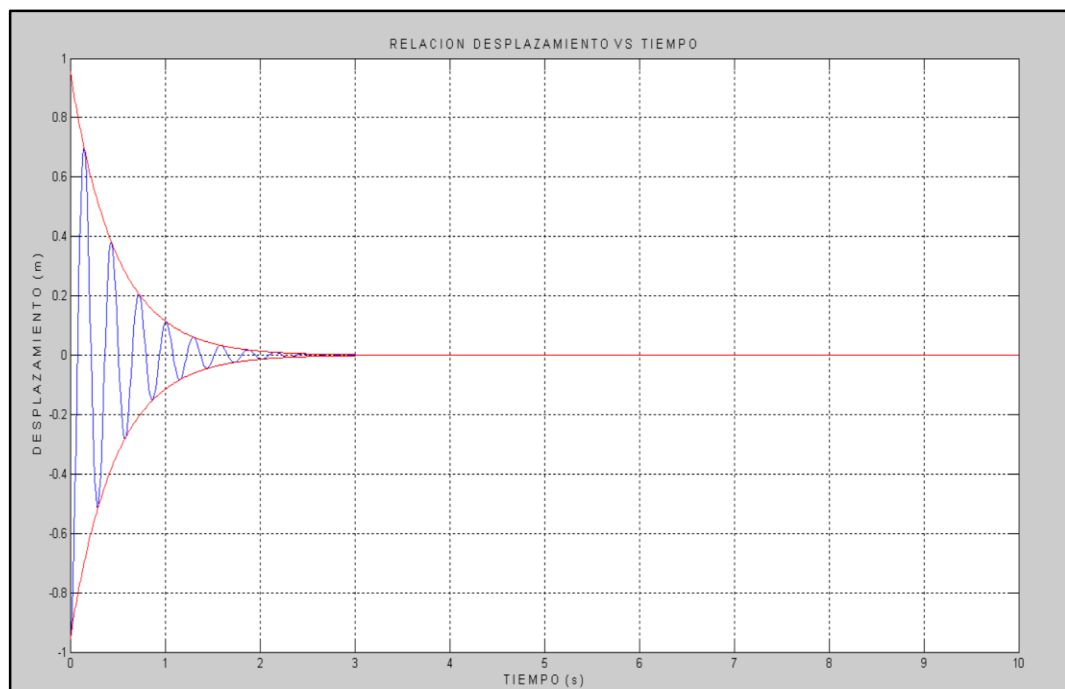


Figura 72. Relación desplazamiento vs tiempo del tercer nivel de la figura 2.

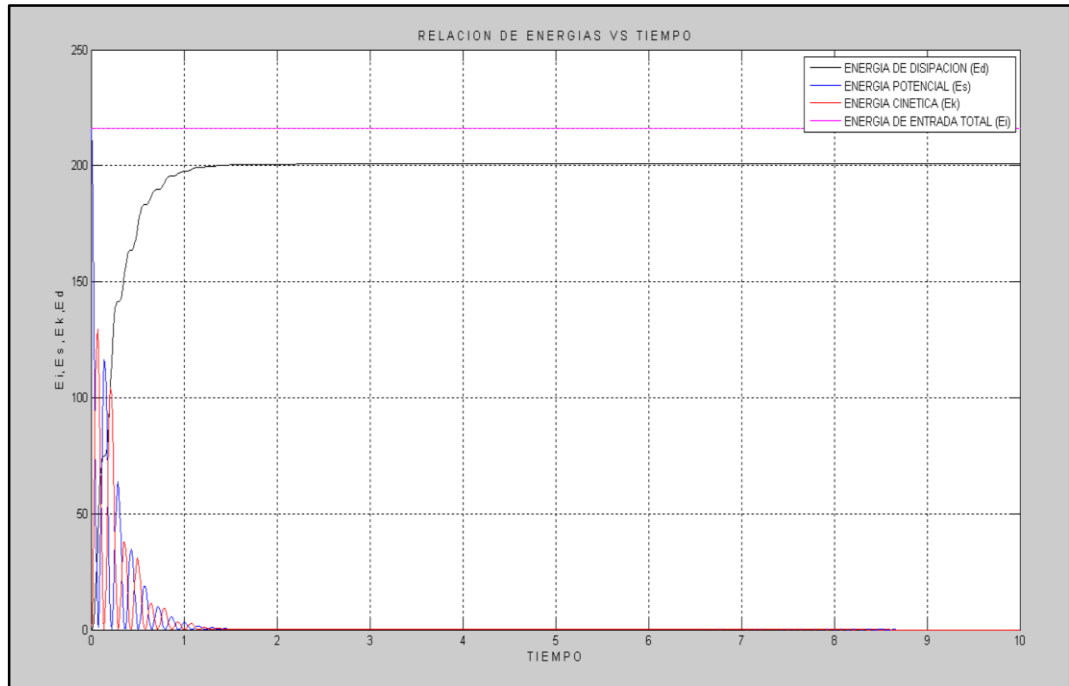


Figura 73. Total de energías del tercer nivel, figura 2.

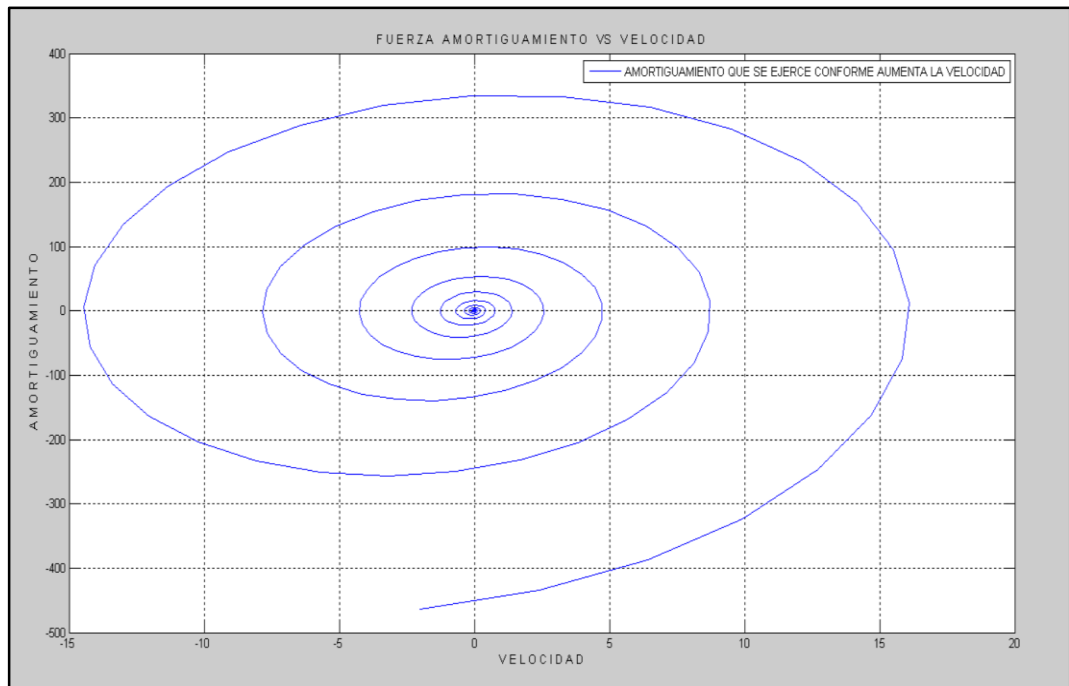


Figura 74. Histéresis del sistema del tercer nivel, figura 2.

Desplazamiento total de todos los modos en coordenadas modales

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

$$q(t) = \phi_n \left\{ e^{-\xi \omega_n t} \left[q_0 \cos(\omega_D t) + \frac{\dot{q}_0 + \xi \omega_n q_0}{\omega_D} \sin(\omega_D t) \right] \right\}$$

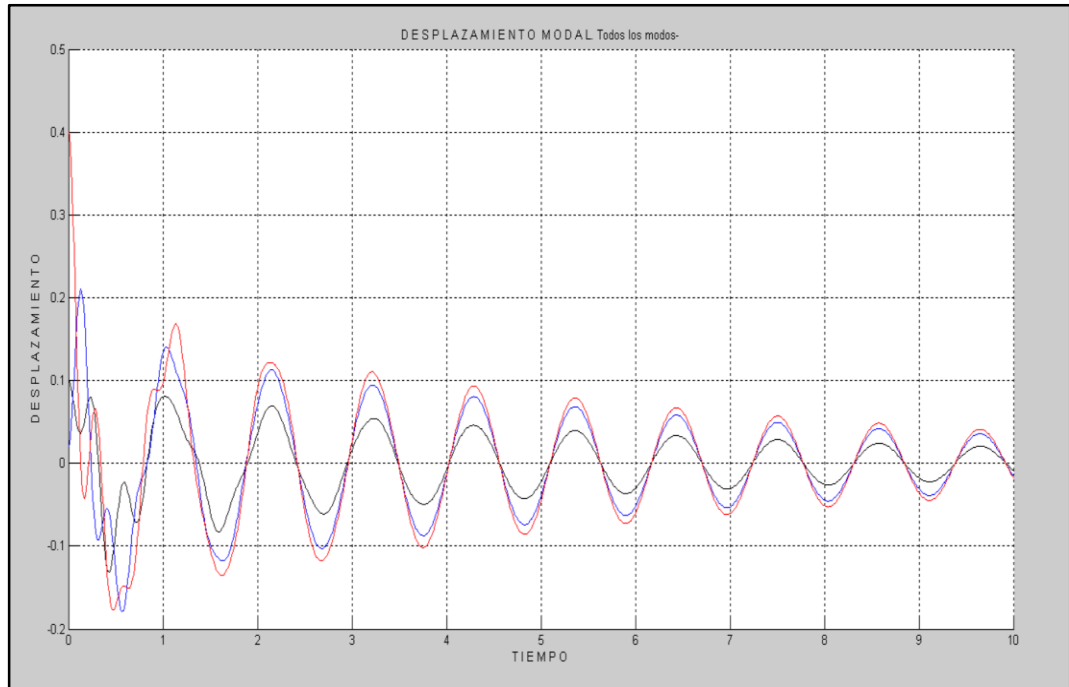


Figura 75. Desplazamientos nodales totales de los modos de vibración de la estructura que se aprecia en la figura 2.