

Arturo chavez

Tesis_ArturoChavez.pdf

 Tecnológico Nacional de México

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::20755:422888978

Fecha de entrega

23 ene 2025, 7:47 a.m. GMT-8

Fecha de descarga

23 ene 2025, 7:50 a.m. GMT-8

Nombre de archivo

Tesis_ArturoChavez.pdf

Tamaño de archivo

14.7 MB

99 Páginas

16,907 Palabras

81,920 Caracteres

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 8%  Publicaciones
- 11%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
510 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 15% Fuentes de Internet
- 8% Publicaciones
- 11% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	
datospdf.com		1%
2	Internet	
hdl.handle.net		<1%
3	Internet	
qdoc.tips		<1%
4	Publicación	
Klaus Weltner. "Differential Equations", Mathematics for Physicists and Engineers...		<1%
5	Internet	
eprints.soton.ac.uk		<1%
6	Internet	
repositorio.espe.edu.ec		<1%
7	Internet	
repositorioinstitucional.uabc.mx		<1%
8	Internet	
www.scielo.org.mx		<1%
9	Internet	
www.scribd.com		<1%
10	Internet	
www.iaeme.com		<1%
11	Internet	
www.hindawi.com		<1%

12	Internet	www.coursehero.com	<1%
13	Internet	vdocuments.mx	<1%
14	Trabajos entregados	University of Canterbury on 2024-10-17	<1%
15	Internet	hal.archives-ouvertes.fr	<1%
16	Internet	www.extrica.com	<1%
17	Internet	erlendw.github.io	<1%
18	Trabajos entregados	King's College on 2023-08-12	<1%
19	Internet	core.ac.uk	<1%
20	Internet	dergipark.org.tr	<1%
21	Trabajos entregados	Indian Institute of Technology, Madras on 2021-11-04	<1%
22	Trabajos entregados	Monash University on 2022-09-25	<1%
23	Internet	dspace.ncl.ac.uk	<1%
24	Internet	www.sems.qmul.ac.uk	<1%
25	Internet	www.slideshare.net	<1%

26	Trabajos entregados	AUT University on 2022-06-09	<1%
27	Trabajos entregados	National Institute of Technology, Silchar on 2023-05-15	<1%
28	Trabajos entregados	UNIVERSIDAD DE COLIMA on 2020-06-23	<1%
29	Trabajos entregados	University of Kentucky on 2020-12-04	<1%
30	Publicación	Weihang Gao, Caiyan Zhang. "Investigation of optimal design damping force bas...	<1%
31	Internet	files.scec.org	<1%
32	Publicación	Dominik Pisarski, Tomasz Szmidt, Czesław I. Bajer, Bartłomiej Dyniewicz, Jacek M. ...	<1%
33	Internet	ebin.pub	<1%
34	Internet	repositorio.unal.edu.co	<1%
35	Trabajos entregados	Universidad Internacional de la Rioja on 2022-07-27	<1%
36	Internet	es.slideshare.net	<1%
37	Internet	tel.archives-ouvertes.fr	<1%
38	Publicación	Javier Fernando Jiménez-Alonso, José M. Soria, Iván M. Díaz, Andrés Sáez. "Robust ...	<1%
39	Internet	cybertesis.uni.edu.pe	<1%

40	Publicación	Bruno Dal Lago. "Numerical and experimental investigation on angle multiple slit...	<1%
41	Internet	gram.eng.uci.edu	<1%
42	Internet	documentop.com	<1%
43	Internet	www.ovsa.njit.edu	<1%
44	Trabajos entregados	University of Melbourne on 2016-10-31	<1%
45	Publicación	Yue Xiang, Ping Tan, Hui He, Qianmin Chen, Yuze Zheng, Yafeng Li. "Seismic opti...	<1%
46	Internet	onlinelibrary.wiley.com	<1%
47	Internet	smartech.gatech.edu	<1%
48	Internet	repositorio.unicauca.edu.co:8080	<1%
49	Internet	theses.gla.ac.uk	<1%
50	Internet	discovery.ucl.ac.uk	<1%
51	Trabajos entregados	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2022-11-06	<1%
52	Internet	jcreview.com	<1%
53	Internet	pure.tue.nl	<1%

54	Internet	www.jait.us	<1%
55	Internet	www.markedbyteachers.com	<1%
56	Internet	solmaz.eng.uci.edu	<1%
57	Internet	www.collectionscanada.ca	<1%
58	Publicación	Franklin Y. Cheng. "Smart Structures - Innovative Systems for Seismic Response C...	<1%
59	Internet	dspace.ut.ee	<1%
60	Internet	www.arxiv-vanity.com	<1%
61	Trabajos entregados	Cranfield University on 2022-10-16	<1%
62	Trabajos entregados	Universidad Católica San Pablo on 2021-05-12	<1%
63	Trabajos entregados	Universidad Santo Tomas on 2020-11-30	<1%
64	Trabajos entregados	Queen Margaret College on 2024-03-28	<1%
65	Internet	dspace.ucuenca.edu.ec	<1%
66	Trabajos entregados	UNIV DE LAS AMERICAS on 2017-06-30	<1%
67	Internet	bibliotecadigital.udea.edu.co	<1%

68	Internet	controlinteligente.blogspot.com	<1%
69	Internet	dspace.cvut.cz	<1%
70	Internet	ndl.ethernet.edu.et	<1%
71	Trabajos entregados	University of York on 2022-05-03	<1%
72	Trabajos entregados	Universidad TecMilenio on 2024-02-03	<1%
73	Internet	americanae.aecid.es	<1%
74	Internet	fulltext6.fcla.edu	<1%
75	Internet	iaci.unq.edu.ar	<1%
76	Internet	imt.uoradea.ro	<1%
77	Internet	wusceel.cive.wustl.edu	<1%
78	Internet	www.ptolomeo.unam.mx:8080	<1%
79	Publicación	Bihan Tang, Qi Chen, Xiao Chen, Deborah Glik, Xu Liu, Yuan Liu, Lulu Zhang. "Eart...	<1%
80	Internet	sciencedocbox.com	<1%
81	Internet	tesis.ipn.mx	<1%

82	Trabajos entregados uaq on 2025-01-10	<1%
83	Internet wikizero.com	<1%
84	Internet www.ecorfan.org	<1%
85	Internet www.ngenespanol.com	<1%
86	Internet www.taringa.net	<1%
87	Trabajos entregados Universidad Católica San Pablo on 2023-06-09	<1%
88	Trabajos entregados Universidad de Alicante on 2020-05-20	<1%
89	Internet dugi-doc.udg.edu	<1%
90	Internet epdf.tips	<1%
91	Internet etheses.whiterose.ac.uk	<1%
92	Internet idus.us.es	<1%
93	Internet ijari.org	<1%
94	Internet www.gdacs.org	<1%
95	Internet 5genesis.eu	<1%

96	Publicación	DAVID PEREZ PERALES. "Propuesta de Marco y Metodología para el Modelado del ..."	<1%
97	Trabajos entregados	Escuela Politécnica Nacional on 2022-04-18	<1%
98	Trabajos entregados	Obudai Egyetem on 2024-05-15	<1%
99	Publicación	RAFAEL MERLI GISBERT. "Formulación de un modelo de Mecánica Molecular aplic..."	<1%
100	Trabajos entregados	Universidad Anahuac México Sur on 2020-10-17	<1%
101	Trabajos entregados	Universidad Autónoma de Nuevo León on 2020-07-07	<1%
102	Trabajos entregados	Universidad Católica Boliviana "San Pablo" on 2024-11-04	<1%
103	Trabajos entregados	Universidad Ricardo Palma on 2020-12-04	<1%
104	Trabajos entregados	University of Southampton on 2014-09-15	<1%
105	Internet	coek.info	<1%
106	Internet	espanol.libretexts.org	<1%
107	Internet	revistas.elpoli.edu.co	<1%
108	Internet	science.howstuffworks.com	<1%
109	Internet	wn.com	<1%

110	Internet	www.google.com	<1%
111	Internet	www.seidor.com	<1%
112	Internet	www.sepielectrica.esimez.ipn.mx	<1%
113	Publicación	Özgür Berké. "A straightforward and Lagrangian proof of the Einsteinian equival...	<1%
114	Publicación	Jörg Schwenk. "Sicherheit und Kryptographie im Internet", Springer Nature, 2014	<1%
115	Publicación	Svetlana N. Yanushkevich, Vlad P. Shmerko. "Introduction to Logic Design", CRC P...	<1%
116	Trabajos entregados	Universidad de Valladolid on 2022-06-21	<1%
117	Trabajos entregados	University of Nottingham on 2023-06-06	<1%
118	Trabajos entregados	University of Worcester on 2024-04-22	<1%
119	Internet	dokumen.pub	<1%
120	Publicación	J. Humar. "Dynamics of Structures", CRC Press, 2019	<1%
121	Trabajos entregados	Universidad Ricardo Palma on 2020-12-04	<1%



12

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MEXICALI

**Implementación de un Control Activo Aplicado a la
Respuesta Sísmica de Ciudades Inteligentes.**

28

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN SISTEMAS
COMPUTACIONALES**

PRESENTA:

Arturo Alejandro Chavez Murga

DIRECTOR DE TESIS:

Rafael I. Ayala Figueroa

CO-DIRECTOR DE TESIS:

Mario A. Camarillo Ramos

Mexicali, Baja California, México, 10 de Enero de 2025

84



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Tecnológico S/N Col. Elías Calles C.P. 21376, Mexicali, B.C.
Tel. 686 580 49 80 al 84
e-mail direccion@itmexicali.edu.mx tecnm.mx | itmexicali.edu.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Mexicali
Subdirección académica

Mexicali, B.C., **10/enero/2025**
Oficio DEPI No. 01/2025

Chávez Murga Arturo Alejandro
PRESENTE

El que suscribe, Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, comunica a usted que para la obtención del grado de Maestría en Sistemas Computacionales, se ha autorizado la reproducción de su trabajo de tesis, cuyo título es:

"Implementación de un control activo aplicado a la respuesta sísmica de ciudades inteligentes"

La autorización se emite con base a la revisión y dictamen emitido favorablemente y avalado con su rúbrica por los integrantes del Comité Tutorial, integrado por:


Rafael Iván Ayala Figueroa
Presidente

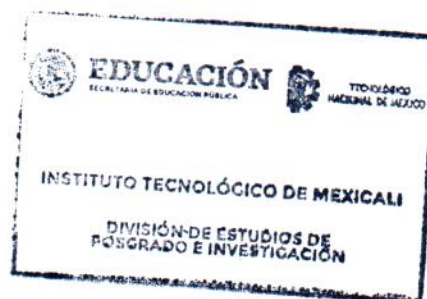

Mario Alberto Camarillo Ramos
Secretario


Verónica Quintero Rosas
Vocal

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica
La Tecnología para el Bien de la Humanidad


Mario A. Camarillo Ramos
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación

C.c.p. Departamento de Servicios Escolares
C.c.p. Subdirección Académica
C.c.p. Integrantes del Comité Tutorial
C.c.p. Archivo.-



66

Agradecimientos

12

A mis padres por su apoyo incondicional para poder llevar a cabo mis estudios de maestría. A mi director de tesis por sus valiosos consejos que guiaron esta instancia. A la División de Estudios de Posgrado e Investigación por su cálida gestión en mi programa de maestría.

Resumen

El creciente costo de materiales estructurales ha forzado a buscar alternativas de menor costo, innovando estructuralmente con sistemas de amortiguamiento que ocupen menos volumen, y a su vez consuman menos potencia al amortiguar la energía cinética en el caso de sistemas con parte activa. Se presenta un controlador inteligente, clasificado como amortiguador de masa activa (AMD), aplicando la técnica de rigidez conmutada en su ley de control, que reduce el tiempo de asentamiento en un 25 % con respecto a la respuesta natural en un prototipo de edificación de un piso. Adecuando el sistema AMD a un entorno de ciudad inteligente, en la adquisición de datos se implementa una máquina de estados finita (FSM), que adquiere y publica la información a un servidor remoto Firebase y envía un archivo histórico por correo al usuario.

Abstract

The increasing cost of structural materials has forced to look for cheaper alternatives, developing structures with damping systems that require less volume, and consume less power at damping the kinetic energy on systems with active part. A smart damper is proposed classified as active mass damper (AMD), applying the switched stiffness technique in its control law that reduces settlement time on a 25% with respect to the natural response on a building prototype of one floor. Setting the AMD to a smart city environment, on the data acquisition a finite state machine (FSM) is implemented that acquires and publish the information to a Firebase remote server and sends an historical file to the user by email.

88

Índice general

74

Agradecimientos	I
Resumen	II
Abstract	III
Índice de cuadros	V
Índice de figuras	VI

35

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Pregunta de investigación	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Justificación	4
1.5. Estado del arte	6
2. Fundamento Teórico	9
2.1. Movimientos telúricos	9
2.2. Soluciones estructurales	13

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	<i>V</i>
2.3. Fundamentos de control	16
2.3.1. Sistemas LTI	17
2.3.2. Controlabilidad y observabilidad	21
2.3.3. Modelo n pisos	22
2.3.4. Sistemas de 2do Orden	25
2.3.5. Desempeño	29
2.3.6. Ley de control conmutada	31
2.4. Sistemas de amortiguamiento	32
2.4.1. VSD	34
2.4.2. AMD	35
2.5. Internet de las cosas (IoT)	36
2.6. Ciudades inteligentes	36
3. Metodología	41
3.1. Modelo	41
3.2. Instrumentación	46
3.2.1. Despliegue de información	50
4. Resultados	52
4.1. Solución teórica	52
4.2. Solución numérica	73
4.3. Solución experimental	74
Conclusiones y trabajo futuro	77
Bibliografía	80

Índice de cuadros

3.1. Parámetros del aire.	47
4.1. Parámetros del sistema.	73
4.2. Comparativa de sensores	75

Índice de figuras

1.1. Distribución de pérdidas económicas por fenómeno natural. Fuente: [1]	4
1.2. Pérdidas económicas por año debido a terremotos (Actualizada al valor adquisitivo del año 2012). Fuente: [2]	5
1.3. VSD de Onoda en estructura tubular. Fuente: [3]	6
2.1. Epicentro	10
2.2. Propagación de ondas sísmicas	11
2.3. Movimientos superficiales. Fuente: [4]	12
2.4. Rango de frecuencias de cargas dinámicas comunes	14
2.5. Primera casa a prueba de sismos. Fuente: [5]	15
2.6. Clasificación de planos de fase	20
2.7. Estructura de N pisos	23
2.8. Efecto de la masa en una estructura	27
2.9. Efecto de la rigidez en una estructura	27
2.10. Efecto del coeficiente de amortiguamiento en la amplitud y frecuencia	28
2.11. Efecto del coeficiente de amortiguamiento en un sistema de segundo orden	29

ÍNDICE DE FIGURAS

VIII

2.12. Parámetros de una respuesta transitoria a una entrada escalón . . .	30
2.13. Representación gráfica del SHM	31
2.14. Representación gráfica de la ley de control conmutada	32
2.15. Sistema masa resorte con rigidez variable. Fuente: [6]	34
2.16. Sistema AMD de 1 + 1 grado de libertad. Fuente: [7]	35
2.17. Bus de datos RS-232. Fuente: [8]	38
2.18. Modelo de uso SMTP. Fuente: [9]	40
2.19. Ejemplo de correo con archivo adjunto	40
3.1. Vista superior del controlador: 1- Motor a pasos, 2-Masa contro- lada, 3-Tornillo ACME, 4-Sensor de efecto hall.	42
3.2. Modelo experimental: 1- Masa controlada, 2- Mecanismo biela- manivela, 3-Sensor ultrasónico, 4- Computador.	42
3.3. Mecanismo biela-manivela: 1- Masa de acero vaciado, 2- Manive- la, 3- Biela, 4- Corredor, 5- Estructura.	43
3.4. Modelo conceptual de un nivel	45
3.5. Diagrama de flujo de la FSM en arduino	46
3.6. Diagrama a bloques de la adquisición por el computador en NI Labview 2024 Q1.	50
3.7. Diagrama a bloques de la FSM en NI Labview.	50
3.8. Diagrama a bloques del envío a servidor	51
3.9. Diagrama a bloques del envío por SMTP	51
4.1. Triángulo rectángulo del primer cambio de variable.	58
4.2. Triángulo rectángulo del segundo cambio de variable	63
4.3. Triángulo rectángulo del tercer cambio de variable	67
4.4. Triángulo rectángulo del cuarto cambio de variable	72

<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	0
4.5. Respuesta simulada del controlador en Matlab o R2021b con la función ode45.	74
4.6. Diagrama de fase de la simulación controlada en Matlab.	74
4.7. Envolvente de la respuesta natural del prototipo.	76
4.8. Respuestas natural (negra), respuesta natural modelada (cyan). .	77
4.9. a) Respuesta natural b) Respuesta controlada c) Señal de control.	77
4.10. Verificación de envío por HTTP a base de datos Firebase.	78
4.11. Correo de prueba mediante protocolo SMTP.	78

Capítulo 1

Introducción

Con las consideraciones de la falta de conciencia entre expectativas sociales y el desempeño actual de construcciones modernas durante eventos sísmicos, investigadores sugieren que un urgente cambio en la filosofía y tecnologías de control de daños necesita ser empleado [10]. Cargas extremas, así como estructuras de varios pisos; tecnologías de estructuras inteligentes son mejoradas cada año [11].

De acuerdo a Harris, [12] ingenieros generalmente colocan amortiguadores en cada piso de una estructura, cada uno fijado a una columna y el otro a un haz de luz para disparar al controlador. La aplicación de técnicas de control moderno para mitigar los efectos de cargas sísmicas en estructuras de ingeniería civil ofrecen una importante alternativa a los diseños tradicionales resistentes a terremotos. En particular, los dispositivos de control semi activo se hacen presentes como una de las opciones más eficientes a corto plazo por la comunidad de ingeniería civil. Los dispositivos de esta clase tienen la capacidad de variar dinámicamente sus propiedades, indicando que serán efectivos en una variedad definida de condiciones de carga [13].

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

2

Ricciardelli compara el desempeño de AMD (sistema de control de masa activa) con TMD (Sistema de control de masa sintonizada) y ATMD (sistema de control de masa semiactiva) estandarizando la entrada para modelos de 1 grado de libertad mediante LQR (regulador lineal cuadrático). De los cuales destaca la eficiencia de los sistemas semiactivos (ATMD) por requerir menor potencia. La parte activa del sistema es la que incrementa significativamente la capacidad de TMD [14].

1.1. Planteamiento del problema

Una de las amenazas más frecuentes proviene de los fenómenos naturales tales como tormentas, sequías, temperaturas extremas, volcanes, sismos entre otros. Para ilustrar el planteamiento, México forma parte del cinturón o anillo de fuego del pacífico, en donde se gesta el 90 % de la actividad sísmica del planeta. Además, engloba múltiples volcanes activos. El 75 % de los volcanes activos del mundo. Por añadidura, Mexicali, Baja California forma parte de la mayor fractura de la tierra. El sistema de fallas de San Andrés (SAFS) consiste en un conjunto de fallas que coinciden entre la placa norteamericana y la placa del pacífico en la que se encuentran más fallas, como Cerro Prieto, Imperial, Laguna Salada y San Clemente [15].

Las técnicas de amortiguamiento surgen de la necesidad en mantener las estructuras funcionales. Cada vez se han procurado mejores normativas para estandarizar la construcción segura de inmuebles, una prueba de ello son los estándares de construcción ISO 9882-1993 y ISO 9883-1993, el estándar nacional de China JGJ3-2002, donde la aceleración máxima de una estructura pública debe ser menor a $0.28m/s^2$. Obligando de manera legal a las constructoras en incluir sistemas de amortiguamiento, sobre todo si son estructuras altas. Puesto que, son más propensas a sufrir daños por vibraciones de tifones o movimientos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

3

telúricos. Según el Centro Nacional de Datos Geofísicos de los Estados Unidos, en la última década se han perdido más de 80 mil vidas debido a los sismos.

1.2. Pregunta de investigación

¿Cuál es el desempeño de un prototipo de edificación de un piso aplicando un sistema de control activo siguiendo la técnica de rigidez conmutada acondicionado a un entorno de ciudad inteligente?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de amortiguamiento de control activo (AMD) utilizando la técnica de rigidez conmutada aplicado en un prototipo de edificación acondicionado a un entorno de ciudad inteligente.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Reducir el tiempo de asentamiento (t_s) en un 25 % con respecto a la respuesta natural del prototipo.
- Implementar una máquina de estados finita (FSM) para la instrumentación del prototipo.
- Enviar una notificación con el archivo histórico de desplazamiento al usuario.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

4

1.4. Justificación

Chen en su estudio clasificó las lesiones causadas por terremotos en diversas bases de datos reconocidas (PubMed, Cochrane, Web of Science, and China Knowledge Resource Integrated Database) fueron 74 estudios donde determinan que a pesar de vivir en países desarrollados se presentan de igual manera problemas que existen en países del tercer mundo. Sea con terremotos de alta magnitud o temblores de baja magnitud se encuentran fracturas como el problema más destacado [16]. Con el paso de los años se invierten muchos recursos en nuevas tecnologías para mejorar la seguridad en espacios públicos, transporte, servicios, infraestructura de gobierno o civil que pueden ser amenazadas de diferentes formas [17].

De acuerdo al HNDECI (índice económico de conversión de desastres naturales) se ha incrementado el impacto en un mayor número de terremotos, siendo este fenómeno natural el más severo. Alrededor del 70 % de las pérdidas directas son por sismos. Los datos suponen mal diseño de las estructuras, puesto que, hay más edificaciones que en años previos.

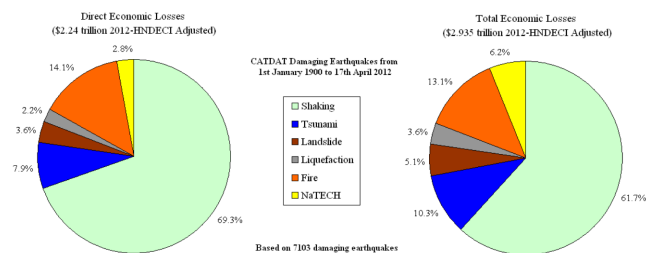


Figura 1.1: Distribución de pérdidas económicas por fenómeno natural. Fuente: [1]

Al momento de suceder un terremoto, si estos no cuentan con sistemas de amortiguamiento se aseguran daños con muy altos costos de reparación. De acuerdo al índice las reparaciones no son el único costo, esta incluye pérdidas

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

5

económicas en ámbitos de 4 tipos (pérdidas directas, indirectas, intangibles, no regionales como se ve en la Figura 1.1):

- Quiebre de negocios.
- Agricultura.
- Redes de transporte.
- Costos de auxilio.

Mediante el análisis de este índice es posible remarcar que las pérdidas indirectas de los sismos causan un daño en mayor proporción en algunos casos véase (Tohoku 2011, Kobe 1995, Ecuador 1987), debido a los efectos de interrumpir los negocios.

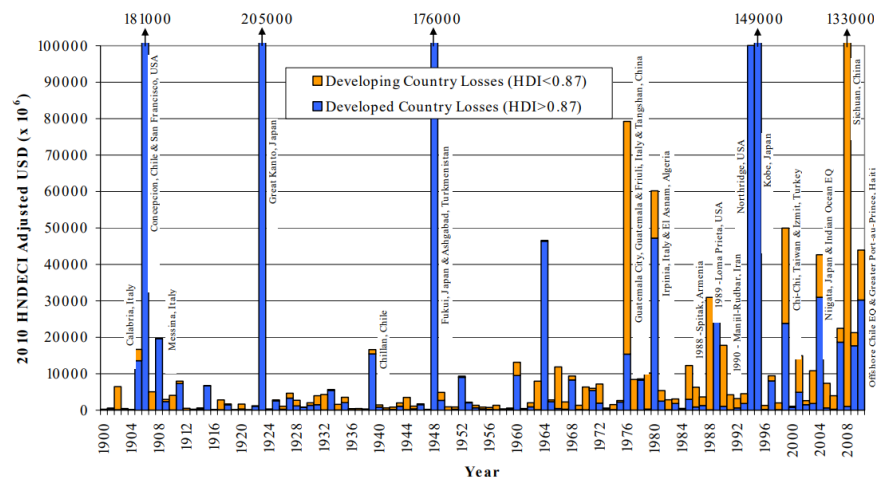


Figura 1.2: Pérdidas económicas por año debido a terremotos (Actualizada al valor adquisitivo del año 2012). Fuente: [2]

De esta manera, sentamos las bases de un correcto análisis de pérdidas por temblores, es impensable basarse únicamente en el PBI de cada país para medir el impacto económico, el país podría estar en diferentes etapas económicas, por

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

6

lo que un terremoto puede afectar más o menos a la economía de un país (Figura 1.2) [2].

1.5. Estado del arte

En el diseño de sistemas de control activo para el control estructural se tienen registro de varias propuestas, Xu presenta su amortiguador de fluido viscoso de amortiguamiento variable (VCVFD), que consiste en un pistón cilíndrico con cámaras para albergar fluidos (principalmente aceite), y un vástago. Los orificios que permiten el flujo de aceite son regulados para adaptarse a distintos sismos [18]. Incursionando en el control de rigidez, Chen demostró que la variación de rigidez tenía efectos positivos en reducir la respuesta dinámica estructural. Propuso una cuerda elástica para reducir la vibración de los resortes que podía ser controlada variando su tensión. Su propuesta surgió del problema de controlar estructuras espaciales contra las perturbaciones por meteoritos con requerimientos estrictos de peso y flexibilidad sentando bases a los dispositivos de rigidez conmutada [3]. Onoda basándose en los estudios de Chen realiza la construcción de un actuador piezoeléctrico con un elemento interno de longitud variable que al contraerse reduce la rigidez del dispositivo a su valor mínimo (Figura 1.3). En cambio, cuando recupera su longitud original, la rigidez también es reestablecida. [19].

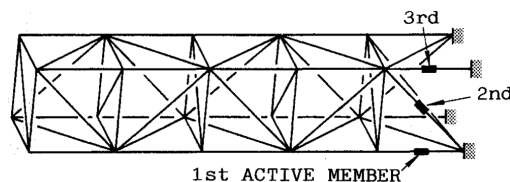


Figura 1.3: VSD de Onoda en estructura tubular. Fuente: [3]

Bobrow desarrolló un pistón de doble efecto que manejaba dos estados de

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

7

compresión al abrir o cerrar el cilindro que comprime a las masas de aceite dentro del pistón, después hizo pruebas con Nitrógeno, para mejorar su rango dinámico de compresión. Con ello mejoraron su capacidad de ajustar los cambios de rigidez [20] [21]. Otro estudio presentado en [22] desarrolla un sistema que utiliza fuerzas magnéticas para levitar un objeto ferromagnético. Al hacer conmutar la energía por electroimanes se obtiene un control de rigidez conmutado reduciendo la aceleración pico de la masa en un 50 % e incrementó la tasa de amortiguamiento 8 %. Aportando al análisis de rigidez conmutada en [23] se analizó la estabilidad del un SVD con la teoría de Floquet aportando procedimientos para sintonizar la ganancia del controlador a una óptima y mostrar la fiabilidad del controlador ante incertidumbres.

En cuanto a los dispositivos AMD, [24] lleva a cabo las simulaciones para comparar AMD con TMD donde destaca las ventajas del control activo en el desplazamiento de la estructura y aceleración con respecto a la alternativa pasiva. [25] diseñó un controlador pasivo proporcional-derivativo (PD) y otro activo de lógica difusa, para suprimir vibraciones sísmicas de manera simultánea en una estructura. En el mismo estudio analizó que el controlador activo tuvo mejor desempeño para reducir la amplitud de desplazamiento en la estructura.

Por otra parte, Sen utiliza algoritmos genéticos y de abejas para optimizar un controlador PID que reduce el desplazamiento de 2 pisos en la estructura AMD-2 [26] [27]. Para el control de vibraciones en la misma estructura Feng propone una ley de control de límite adaptable que redujo el desplazamiento y aceleración en ambos pisos [28]. Asimismo, Magdaleno utilizó el mismo prototipo para presentar un entorno de diseño para TMD y AMD para controlar las vibraciones de un edificio causadas por el viento. En su trabajo modeló la estructura como si fuera un amortiguador de masa sintonizada con péndulo (PTMD), donde la masa sintonizada se opone al desplazamiento de la estructu-

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

8

ra de manera armónica. El modelo de su AMD se conforma por un carro que se desplaza mediante un mecanismo de tornillo controlado por un servomotor en el piso superior del edificio. La ley de control que rige su desplazamiento sigue un movimiento armónico. Destaca en su trabajo que teóricamente la solución activa es mejor que la pasiva hablando en términos de respuesta en frecuencia. El poder procesar la función a la cual accionaría su sistema le da un amplio rango dinámico de frecuencias [29].

Capítulo 2

Fundamento Teórico

2.1. Movimientos telúricos

Un movimiento telúrico puede ser definido como el movimiento o temblor de la tierra causado por una repentina liberación de energía dentro de la tierra, usualmente asociado con la falla o destrucción de rocas. El modo general de ocurrencia de un temblor es un simple deslizamiento de bloques de masas rocosas (placas tectónicas) una sobre otra a lo largo del plano. El punto dentro de la tierra donde se originan las ondas sísmicas inicialmente es llamado foco e hipocentro (Figura 2.1). En cambio, el punto en la superficie terrestre situado directamente encima del hipocentro es el epicentro [30].

La energía liberada en los temblores se propaga mediante ondas sísmicas, que se define como la propagación de una turbulencia (posición, velocidad o aceleración) con determinada amplitud y frecuencia. Estas ondas son transmitidas por la compresión y dilatación de su medio, como lo es en las vibraciones puesto que son longitudinales, en dirección del camino que llevan, como el abrir y cerrar de un alambre embobinado. Es evidente que en gases o líquidos, la compresión

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

10

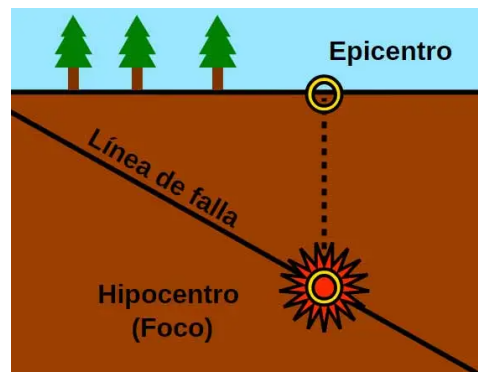


Figura 2.1: Epicentro

es la única manera en que pueden propagarse, porque el aire o agua no puede mantener dinámicas corporales (posición, velocidad o aceleración). Sin embargo, esta restricción no rige a sólidos elásticos. La elasticidad es la propiedad de la materia donde las fuerzas actúan de manera que restauran el cuerpo de un sólido cuando es distorsionado debido a la aplicación de fuerzas externas. Un material perfectamente elástico regresa a la forma original si la fuerza externa que produjo la deformación es removida [31]. Los sólidos elásticos son el principal medio por el cual se propagan las ondas sísmicas. De acuerdo a Mendoza en su estudio de sismos en la ciudad de Tacna, Perú del 2001 al 2019 la frecuencia predominante de los sismos varía de 2.12 Hz a 11.29 Hz. Resaltando, que Tacna, situada al sur del Perú se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico por la subducción de la placa de Nazca y la sudamericana [32].

De acuerdo a la teoría de propagación de ondas sísmicas así como en la acústica, las ondas sísmicas también se reflejan y transmiten en las distintas capas internas de la tierra. Durante los viajes de ondas sísmicas en todas las direcciones a través de las capas de la tierra, reflejando y refractándose como en la Figura 2.2.

39

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

11

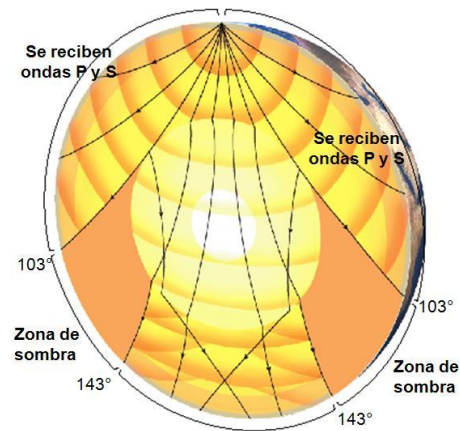


Figura 2.2: Propagación de ondas sísmicas

En un medio uniforme y homogéneo la dirección de las señales de onda que en esta teoría se consideran como rayos serían líneas derechas. Mientras que la variación en la densidad de los medios y las constantes de elasticidad cambian la ruta de estos rayos, ocasionando refracciones [33]. Las ondas sísmicas pueden ser clasificadas en dos tipos:

1. Corporales.
2. Superficiales.

Las ondas **corporales** se propagan comprimiendo y dilatando a través del medio en el que se encuentran, principalmente rocas elásticas. A medida que viajan través de las capas internas de la tierra. Estas rocas recuperan su tamaño y forma originales después de que pasa la onda [34]. Dentro de las corporales se encuentran las primarias (P) siendo las más rápidas por su trayectoria longitudinal. Se les atribuye primarias por ser las primeras en llegar a un sismómetro. De otra manera, las ondas secundarias (S) son las segundas en llegar al sismómetro y su comportamiento se caracteriza por mover partículas de piedras

12

103

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

12

hacia arriba y abajo, o de un lado a otro. Siempre de manera perpendicular a la dirección de propagación. En promedio, las ondas S alcanzan una velocidad máxima de 35km/s . En cambio, las ondas P se encuentran en 65km/s [35].

Por otra parte, las ondas **superficiales** se propagan a una frecuencia menor que las ondas corporales a través de sólidos en la superficie de la tierra. También se les atribuye ser más destructivas por tener mayor amplitud.

En la clasificación de ondas superficiales existen dos tipos (Figura 2.3). Las ondas L (Love o Lowe) que asemejan el movimiento de una serpiente (desplazamientos de izquierda a derecha), pueden propagarse por distancias muy extensas sin sufrir atenuaciones considerables. [36].

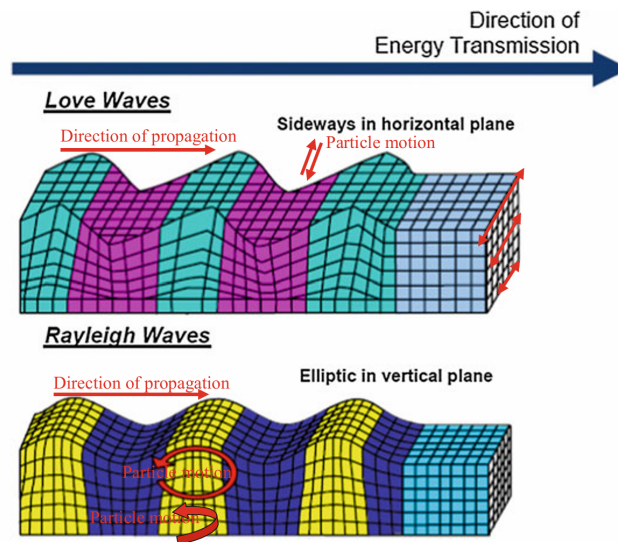


Figura 2.3: Movimientos superficiales. Fuente: [4]

Las ondas Rayleigh son el otro tipo de onda superficial atribuido a Lord Rayleigh, quién matemáticamente demostró la existencia de estas ondas en 1885. Estas ondas tienen una forma elíptica que se mueve las partículas de tierra hacia arriba y abajo, de un lado a otro, de acuerdo al departamento de ciencias

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

13

geológicas y mineras de Michigan, se enrolla a lo largo de la superficie con movimientos más complejos que las ondas L [37]. Estas ondas rodean en lagos u océanos. Por lo tanto, la mayoría del movimiento de la tierra durante un temblor es debido a las ondas Rayleigh, las cuales pueden ser las de mayor duración [38].

2.2. Soluciones estructurales

La esencia de la ingeniería en el ámbito estructural es la habilidad de planear, antes de comenzar a construir cómo es que se va a comportar la estructura. Esto requiere un conocimiento previo en cómo se va a flexionar, si se verá afectada por gravedad o fuerzas externas como viento u ondas sísmicas. En el mundo real, ninguna carga aplicada en las estructuras es completamente **estática**, también llamadas cargas fijas, son aquellas que no varía en el transcurso del tiempo (magnitud, dirección y ubicación). Entiéndase como cargas a las fuerzas que actúan en los componentes estructurales de la construcción. Las cargas son **dinámicas** es decir, varían con el tiempo [39].

Este proceso involucra el intentar predecir los movimientos en el tiempo, sin embargo en el transcurso de la historia no siempre existieron computadoras para simular modelos complejos. Es apropiado decir que se requirió de ingenio para crear dichas soluciones estructurales.

Se tiene registro desde 1500 a.C. que largas columnas y vigas de piedra fueron fabricadas para templos y palacios. Se estima que en 14000 a.C. se construyó el primer arco de ladrillos en una construcción con 80cm de diámetro. En 500 a.C. se utilizaron vigas de piedra con el fin específico de reflejar momentos de flexión. Esta se puede considerar como una solución estructural. Puesto que, considera fuerzas externas. Los momentos de flexión deben ser controlados para evitar daños catastróficos en estructuras [40].

Las cargas dinámicas pueden presentarse de distintas maneras, temblores,

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

14

viento, explosiones, vibraciones mecánicas de motores, hasta el sonido. Dos parámetros que pueden caracterizar dichas cargas son: la magnitud del cuerpo (peso, dimensiones) y su rango de frecuencias como se ilustra en la Figura 2.4. Las cargas dinámicas pueden ser remplazadas por cargas estáticas cuando su frecuencia es baja comparada con la frecuencia natural de la estructura a la cual es aplicada. Es conocido el análisis quasi-estático o cargas que recuerden a ellas mismas que su comportamiento está prediciendo el efecto de las cargas dinámicas tratadas como su equivalente estático. La mayoría de cargas externas (viento, sismos, ondas y transporte) pueden ser remplazadas por su equivalente quasi-estático [41].

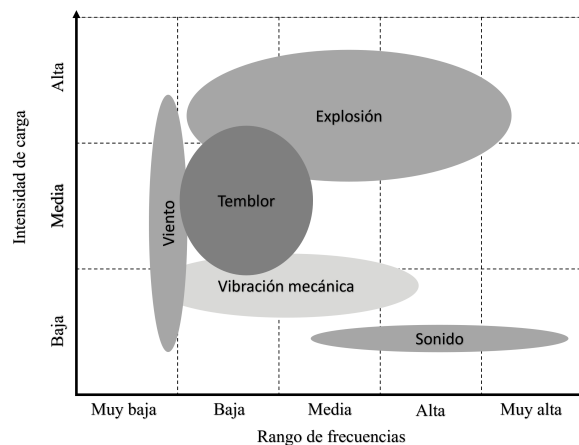


Figura 2.4: Rango de frecuencias de cargas dinámicas comunes

Una propuesta para incrementar el tamaño de las construcciones es aumentar la cantidad de vigas. Esta propuesta suma costos y peso a la construcción. A pesar de ser práctica, no asegura que la resonancia será mitigada. Propuestas más eficientes recurren al análisis en el modelo de elemento finito para la carga, deslizamiento y miembros estructurales afectados.

En cuanto a la vibración de las estructuras existe otro término importante. La **resonancia** se da cuando la frecuencia de las ondas que inciden en la es-

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

15

estructura son iguales a la frecuencia natural de la edificación. Entiéndase como frecuencia natural aquella en la que se experimenta la mayor amplitud de la vibración en una construcción sin fuerzas externas. Un ejemplo devastador del efecto de la resonancia es el puente de Tacoma que abrió en Julio de 1940 y colapsó en Noviembre del mismo año como consecuencia de vibración inducida por el viento [42].

En relación a soluciones para la mitigación de vibraciones sísmicas, una de las primeras propuestas se debe al arquitecto Pirro Ligorio. En 1570 propuso una casa a prueba de sismos. Su idea se basa en que las edificaciones no solo soportan cargas verticales, también existen fuerzas transversales inducidas por temblores. Los estudios del arquitecto Ligorio anticiparon por 2 siglos la jaula portuguesa; una casa a prueba de sismos diseñada después del terremoto de Lisbon en 1755 y erróneamente considerada por muchos la primera construcción a prueba de sismos. La propuesta de Ligorio era exclusivamente **estructural**. La construcción de Ligorio (Figura 2.5) se caracterizaba por usar poderosas esquinas reforzadas y arcos de doble ladrillo con llaves de piedra [5].

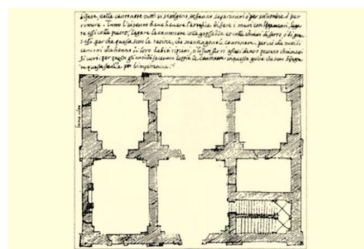


Figura 2.5: Primera casa a prueba de sismos. Fuente: [5]

En agosto de 1909 J. A. Calantarients, un médico de Scarborough escribió una carta al director del servicio sismológico de Santiago, Chile. Donde llama su atención para un método de construcción que él había desarrollado, donde menciona que el grado de severidad de un sismo pierde su significancia a través

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

16

de la existencia de uniones libres. El doctor solicitó una aplicación de patente a la oficina inglesa por su método de construcción. El cual propone que la estructura sea libre de juntas y con una capa fina de arena, mica o talco que permitiría a la estructura deslizarse durante un movimiento telúrico. De esa manera, reduciendo la fuerza transmitida a la propia construcción. Lo que el doctor estaba prescribiendo era un ejemplo temprano de aislamiento sísmico [43].

2.3. Fundamentos de control

Las técnicas para el análisis y diseño de sistemas de control son esenciales para el desarrollo de productos innovadores de ingeniería. Entiéndase como sistema a la combinación de componentes que actúan al mismo tiempo para alcanzar un objetivo. El control automático forma parte esencial en cualquier campo de la ingeniería y la ciencia. Está presente en sistemas robóticos, sistemas modernos de manufactura, sistemas de vehículos de cualquier tipo y cualquier operación industrial que tenga algún tipo de control de magnitudes físicas (temperatura, presión, humedad, velocidad, entre otros). El primer trabajo relevante de control automático fue el gobernador centrífugo de James Watt para el control de velocidad de un motor de vapor en el siglo IX. Minorsky trabajó en controladores automáticos para timones de barcos y demostró como la estabilidad podía ser determinada a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema [44].

Un sistema puede ser de tiempo-continuo si acepta señales de tiempo-continuo como sus entradas y genera seales de tiempo-continuo como sus salidas. La entrada comúnmente denotada por $u(t)$. Si el sistema tiene p entradas, entonces $u(t)$ es un vector $p \times 1$ o $\mathbf{u}(t) = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_p]^T$ donde la letra T denota la transpuesta. De manera similar, la salida será denotada por $y(t)$. El rango del

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

17

tiempo t se asume de $-\infty$ a ∞ . El sistema será de *tiempo-discreto* si acepta señales de tiempo discreto y genera señales del mismo tipo. Todas estas señales en un sistema se asume que tienen un periodo de muestreo T . La entrada y la salida se denotan por $u[k] := u(kT)$ y $y[k] := y(kT)$, donde k denota un instante de tiempo-discreto y es un número entero de $-\infty$ a ∞ .

Una **planta** puede ser una pieza de equipo, o también, un conjunto de partes en una máquina funcionando con un mismo propósito el cual es ejecutar una operación en particular. Diversos objetos a controlar (reactores, motores, estructuras) pueden considerarse plantas.

Desde 1960, gracias a las computadoras digitales fue posible el análisis en el dominio del tiempo de sistemas complejos, el análisis y síntesis de sistemas en el dominio del tiempo utilizando variables de estado ha contribuido para incrementar la complejidad de plantas modernas y los requerimientos estrictos de precisión, peso y costo para aplicaciones industriales, del espacio y defensa [44].

Las primeras semillas de control estructural fueron sembradas en el siglo XX por John Milne, un docente de ingeniería en Japón, quien construyó una casa pequeña de madera y la colocó sobre baleros esféricos deslizantes para demostrar que una estructura puede ser aislada de la energía sísmica [11]. Controlar la respuesta estructural ante cargas dinámicas (sísmicas o eólicas) es y ha sido un factor de seguridad primordial para zonas sísmicas principalmente.

2.3.1. Sistemas LTI

Se define un *Sistema-lineal continuo* de la siguiente manera.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

18

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= ax(t) + bu(t), & x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^k, \\ \dot{y}(t) &= cx(t) + du(t), & y \in \mathbb{R}^m \end{aligned} \quad (2.1)$$

Donde.

1. u : Entrada del sistema.
2. x : Estado del sistema.
3. y : Salida del sistema.

Ambas ecuaciones de Ec. (2.1) expresan una relación de *entrada-salida* entre la señal de entrada u y la señal de salida y . Cabe resaltar que el sistema tendrá distintos resultados bajo distintas condiciones iniciales. Cuando todas las matrices a, b, c, d son constantes $\forall t \geq 0$, el sistema Ec.(2.1) es llamado un *sistema invariante en el tiempo (LTI)*. [45]

Para reducir a una expresión más compacta el sistema de la Ec. (2.1). Donde A, B, C, D son constantes, se tiene la matriz de constantes.

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Por lo que el sistema lineal cambia a la forma $X' = AX$. De esta forma se puede hacer el siguiente análisis. Suponiendo que V_0 es un vector distinto de 0. Para el cual se tiene $AV_0 = \lambda V_0$ donde $\lambda \in \mathbb{R}$, entonces la función Ec. (2.3). Es una solución del sistema.

$$X_{(t)} = e^{\lambda t} V_0 \quad (2.3)$$

De acuerdo a la siguiente demostración Ec. (2.4)

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

19

$$\begin{aligned}
 X'_{(t)} &= \lambda e^{\lambda t} V_0 \\
 X'_{(t)} &= e^{\lambda t} (\lambda V_0) \\
 X'_{(t)} &= e^{\lambda t} (A V_0) \\
 X'_{(t)} &= A (e^{\lambda t} V_0) \\
 X'_{(t)} &= A X_{(t)}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Por lo cual $X_{(t)}$ no necesita resolverse el sistema de ecuaciones. Sólo un vector V_0 y su escalar asociado de la siguiente manera.

Un vector distinto de 0 llamado V_0 es llamado un *eigenvector* o vector propio de A si $AV_0 = \lambda V_0$ para alguna constante λ . Esto es llamado un *eigenvalor* o valor propio de A . [46].

Como se menciona previamente, existe una fuerte relación entre los valores propios y vectores propios con la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales.

Teorema 1 Suponiendo que V_0 es un vector propio de la matriz A con valor propio asociado λ . Entonces, la función $X_{(t)} = e^{\lambda t} V_0$ es una solución del sistema $X' = AX$. Nótese, que si V_0 es un vector propio de la matriz A con un valor propio λ . Entonces, si $AV_0 = \lambda V_0$, se tiene que para cualquier $\alpha > 0$ constante.

$$A(\alpha V_0) = \alpha AV_0 = \lambda(\alpha V_0) \tag{2.5}$$

El polinomio característico de una matriz A de $n \times n$ está dado por.

$$\begin{aligned}
 \det(A - \lambda * I) &= 0 \\
 a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

De donde I es la matriz identidad de A . Y las raíces del polinomio representarán los valores propios del sistema.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

20

Teorema 2 Suponiendo que A tiene un par de valores propios $\lambda_1 \neq \lambda_2$ con vectores asociados V_1 y V_2 . Entonces, la solución general del sistema $\dot{X} = AX$ está dada por la Ec. (2.7).

$$X(t) = \alpha e^{\lambda_1 t} V_1 + \beta e^{\lambda_2 t} V_2 \quad (2.7)$$

El comportamiento de la solución dependerá críticamente del signo de la parte real en los valores propios.

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad \begin{cases} \sigma_i = \text{Re}\lambda_i \\ \omega_i = \text{Im}\lambda_i \end{cases} \quad (2.8)$$

El flujo de las soluciones se puede clasificar de distintas maneras, sirva la Figura (2.6). Cuando la parte real del valor propio es negativa, su conjunto de soluciones tiende a converger al origen, a este flujo le podemos considerar estable. De otro modo, si la parte real es mayor a cero, su conjunto de soluciones se diverge del origen hasta el infinito, a esto le podemos llamar una solución inestable [46].

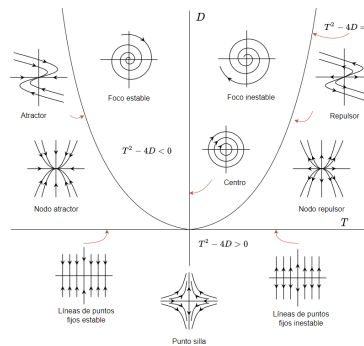


Figura 2.6: Clasificación de planos de fase

Tiene diversas propiedades para el análisis en control. De entre ellas la esta-

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

21

bilidad del sistema, la velocidad con la que se comporta la respuesta la solución general. Siempre y cuando se trate de una matriz cuadrada.

2.3.2. Controlabilidad y observabilidad

Forma canónica controlable. Es la mínima expresión en la cual todos los estados del modelo son controlables. Además, simplifica la localización de los *valores propios*.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (2.9)$$

$$y = [b_n - a_n b_0 \quad b_{n-1} - a_{n-1} b_0 \quad \cdots \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u$$

Es posible que las variables de estado no sean físicamente accesibles por alguno de los siguientes puntos.

1. Le ubicación particular de una variable de estado.
2. Falta de recursos para monitorear la variable.
3. La variable no tiene aplicación significativa.

Forma canónica observable. Un sistema con estado inicial, $x(t_0)$ es observable si y sólo si el valor del estado inicial puede ser determinado a partir

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

22

de la salida del sistema $y(t)$ que ha sido observado en un periodo de tiempo $t_0 < t < t_f$. De no ser posible obtener la entrada. El sistema permanecerá **no observable**.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_n \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -a_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_n - a_n b_0 \\ b_{n-1} - a_{n-1} b_0 \\ \vdots \\ b_1 - a_1 b_0 \end{bmatrix} u \quad (2.10)$$

$$y = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u$$

2.3.3. Modelo n pisos

Antes de comenzar con el modelo es necesario definir los grados de libertad. Se definen los como desplazamientos o rotaciones en un punto de nodal o de unión. Por tanto, cada grado de libertad permite un desplazamiento o una rotación en una dirección determinada. Particularizando a una estructura de n pisos tendrá N grados de libertad. Sirva la ilustración (2.7) donde se somete un sistema al desplazamiento del piso sin fricción.

Un sistema dinámico de N grados de libertad sometido a aceleraciones en la base puede ser modelado de la siguiente manera.

$$M[\ddot{x}_{b(t)} + \dot{x}_{(t)}] + C\dot{x}_{(t)} + Kx_{(t)} = 0 \quad (2.11)$$

Esta ecuación matricial representa N ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden. En cuanto al desplazamiento de la estructura se define la variable

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

23

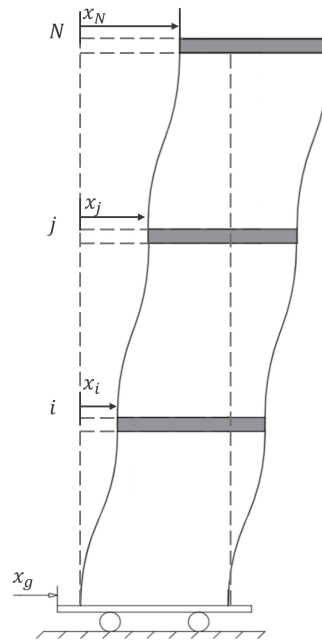


Figura 2.7: Estructura de N pisos

x . Como entrada al sistema estructural se tiene el desplazamiento de la tierra con respecto a la posición inicial de la edificación. $x_g(t)$. Además, es posible denotar su aceleración como su segunda derivada con respecto al tiempo $\ddot{x}_g(t)$. Las letras M , C y K representan las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura respectivamente [7]. Cuando $N = 2$ las matrices de constantes quedan como:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

24

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Donde:

- m_1 y m_2 : Masas de ambos pisos.
- c_1 y c_2 : Coeficiente de viscosidad de muros en el primer y segundo piso.
- k_1 y k_2 : Rigidez de los muros del primer y segundo piso.

Para un desplazamiento de la base, denotado por $x_g(t)$, se obtiene un desplazamiento total (absoluto) $x_{N(t)}^T$ en cada nivel de la estructura, donde se incluyen los efectos mencionados Ec.(2.15); el desplazamiento de la base $x_g(t)$, que produce un movimiento de cuerpo rígido, y el desplazamiento relativo x_N del nivel con respecto a la posición inicial.

$$x_{N(t)}^T = x_g(t) + x_1(t) + x_2(t) \quad (2.15)$$

Teniendo en cuenta que las fuerzas elásticas y de amortiguamiento sólo actúan con el movimiento relativo de la estructura, mientras las fuerzas inerciales actúan con la aceleración total; y que no todos los grados de libertad tienen la misma orientación que el desplazamiento de la base; al incluir la Ec. (2.16) y su segunda derivada con respecto al tiempo en la Ec. (2.11) podemos llegar a la siguiente expresión.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = M\ddot{x}_s(t) \quad (2.16)$$

Considerando un sistema lineal de la forma $X' = AX$ donde la matriz A de dimensiones $n \times n$ tiene n valores propios reales y distintos $\lambda_1, \dots, \lambda_n$. Se tiene un cambio de coordenadas T para el nuevo sistema $Y' = (T^{-1}AT)Y$ que asume

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

25

la forma particular de la Ec (2.17).

$$\begin{aligned} y_1' &= \lambda_1 y_1 \\ &\vdots \\ y_n' &= \lambda_n y_n \end{aligned} \quad (2.17)$$

Considerando al mapa lineal T que toma de base al vector E_j al valor propio V_j asociado con λ_j

$$Y(t) = \begin{pmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ \vdots \\ c_n e^{\lambda_n t} \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Por lo tanto la colección de soluciones $Y(t)$ converge a una solución general $Y'(T^{-1}AT)Y$. Que coloca a $X(t) = TY(t)$ como una solución general de $X' = AX$. Por lo que la solución general puede ser escrita de la siguiente manera Ec (2.19).

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j e^{\lambda_j t} V_j \quad (2.19)$$

2.3.4. Sistemas de 2do Orden

Tomando como ejemplo un modelo de sistema lineal de un grado de libertad (SDOF) Ec. (2.20).

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (2.20)$$

Donde:

1. ζ : Coeficiente de amortiguamiento.
2. ω_n : Frecuencia natural no amortiguada (rad/s).

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

26

$$\lambda_{1-2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.21)$$

La respuesta de la estructura puede ser determinada utilizando la teoría de dinámica estructural [47].

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} [C_1 \cos(\bar{\omega}_n t) + C_2 \sin(\bar{\omega}_n t)] \\ = \frac{1}{\bar{\omega}_n} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin \bar{\omega}_n(t-\tau) d\tau \quad (2.22)$$

Donde $\bar{\omega}_n t = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t$ es la frecuencia natural amortiguada. C_1 y C_2 son constantes determinadas por la condición inicial en la respuesta homogénea (sin entrada que someta al sistema). A partir de que podemos considerar las ondas sísmicas como señales periódicas hasta cierto tiempo.

La ecuación anterior Ec. (2.22) expresa matemáticamente el comportamiento de la posición a través del tiempo. Por lo que, diversos parámetros tienen un efecto en su respuesta. El hecho de poder manipular estos parámetros es una manera de modificar el comportamiento natural del sistema. Si las modificaciones propuestas mejoran el desempeño esperado se puede concluir que es una manera de controlar los sistemas.

Existen diversos métodos para reducir la respuesta sísmica. Modificar las matrices M , C o K directamente tienen un efecto en el desplazamiento estructural.

Variar la **masa** de la estructura no es sencillo por efectos de costo y por el peso intrínseco de los materiales utilizados en construcción. De otro modo, aumentarla para flexibilizar la estructura de tal manera que su frecuencia natural sea tal que la respuesta a un movimiento en la base sea casi nula, conlleva problemas de resistencia en los elementos estructurales (Figura 2.8). Las estructuras muy flexibles, como rascacielos y puentes colgantes, la excitación sísmica no prima en el diseño estructural, siendo más grave el efecto del viento. [7].

39

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

27

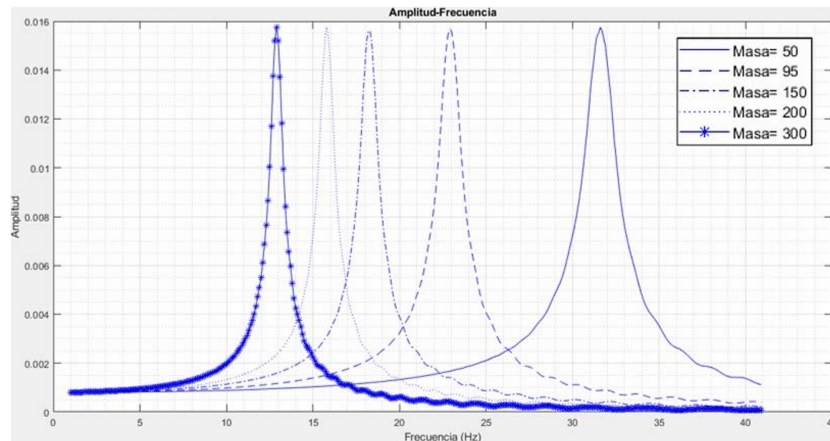


Figura 2.8: Efecto de la masa en una estructura

1

En cuanto al efecto de modificar la rigidez es menos demandante. En la práctica actual es lo que se hace cuando se obliga una estructura a cumplir con los límites establecidos para las derivas, es decir, dotar a la edificación de una rigidez tal que cumpla con unos desplazamientos límites. En consecuencia, es posible desplazar el valor de la frecuencia natural y disminuir la amplitud en el régimen permanente (Figura 2.9).

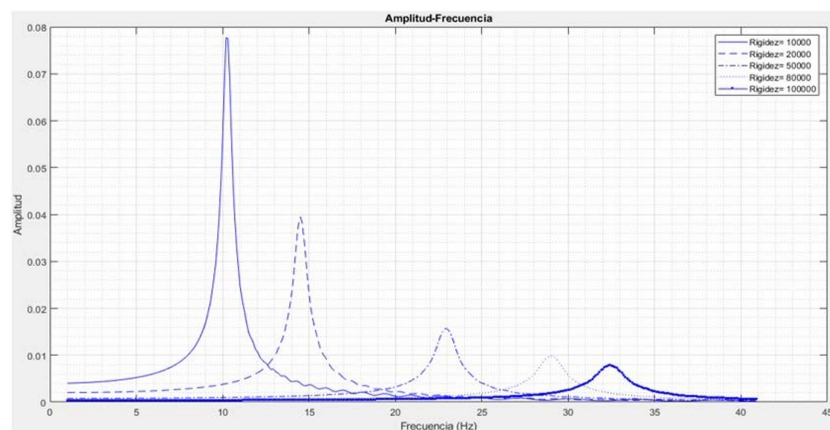


Figura 2.9: Efecto de la rigidez en una estructura

Ahora bien, el coeficiente de amortiguamiento tiene un efecto en comporta-

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

28

miento distinto. Su influencia se encuentra tanto en amplitud como en frecuencia. Cuanto menos sea el coeficiente de amortiguamiento, mayor es la amplificación dinámica y la frecuencia natural, por lo que será menos amortiguado. Por otra parte, si el coeficiente se aproxima a la unidad (Figura 2.10). Se decremen-
tan los valores de amplitud y frecuencia natural [48].

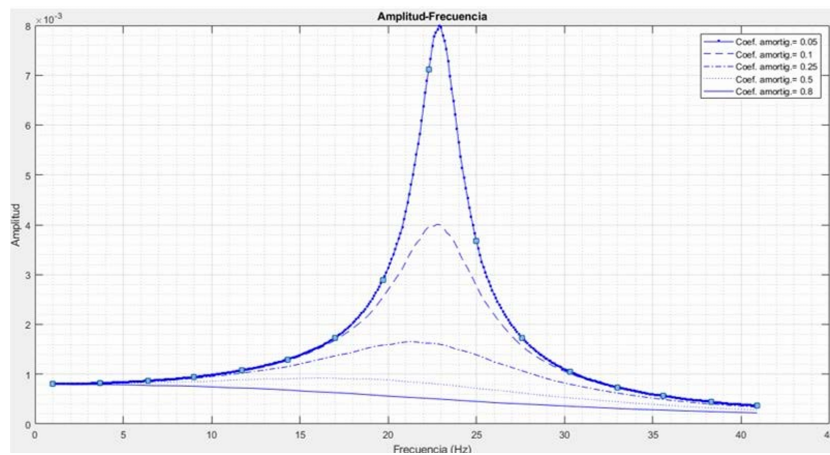


Figura 2.10: Efecto del coeficiente de amortiguamiento en la amplitud y frecuencia

A partir de este coeficiente es posible categorizar varios comportamientos conocidos como en la Fig (2.11).

1. Sobreamortiguada ($\zeta > 1$)
2. Críticamente amortiguada ($\zeta = 1$)
3. Subamortiguada ($0 < \zeta < 1$)
4. Oscilatoria o sin amortiguamiento ($\zeta = 0$)

39

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

29

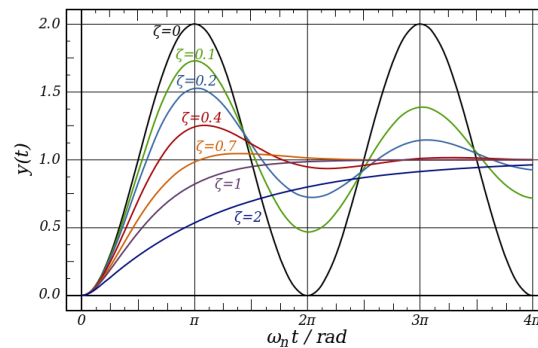


Figura 2.11: Efecto del coeficiente de amortiguamiento en un sistema de segundo orden

Evaluando todos en un mismo modelo estructural de 1 eje de libertad, (reduciendo el movimiento a 1 solo eje) como referencia de sistema. Para lo cual alimentaba a su sistema con ruido blanco y ruido filtrado. Los efectos de incluir cualquiera de estos diseños a la estructura se ve presente en la reducción de valor pico de deflexión de la estructura, la aceleración relativa (en cada piso) y absoluta. No obstante, cambiar la frecuencia natural no siempre es favorable. Dependerá de las propiedades de frecuencia en la señal del sismo. De cualquier manera, llevar a cabo cualquiera de estos sistemas en una aplicación estructural tendrán beneficios significativos [49].

2.3.5. Desempeño

Los sistemas de control están diseñados para ejecutar tareas específicas. Los requerimientos son impuestos en el sistema, usualmente dictados por especificaciones de desempeño. Las cuales pueden ser en términos de la respuesta transitoria, sobre paso máximo, tiempo de asentamiento (t_s). De acuerdo a Ogata, t_s es el tiempo requerido para que la curva de a respuesta alcance y permanezca alrededor del valor final (usualmente entre 2 % y 5 %), como se observa en la Figura 2.12. Las especificaciones de un sistema de control deben

3

2

2

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

30

ser establecidas antes de que comience el proceso de diseño [44].

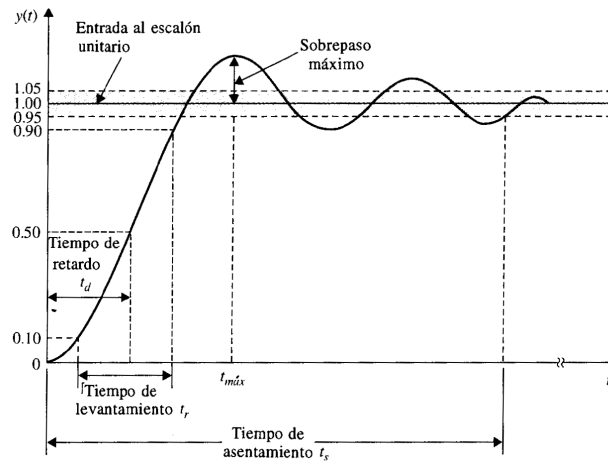


Figura 2.12: Parámetros de una respuesta transitoria a una entrada escalón

Donde:

1. t_d : Tiempo de retardo.
2. t_r : Tiempo de levantamiento.
3. t_p : Tiempo de sobre paso máximo.
4. M_p : Sobre paso máximo .
5. t_s : Tiempo de asentamiento.
6. Criterios de tolerancia (5 %, 2 %).

De acuerdo al estado del arte en una estructura se han analizado los siguientes parámetros para evaluar el desempeño del sistema de amortiguamiento.

1. Desplazamiento de la estructura (m).
2. Aceleración (m/s^2).
3. Tiempo de asentamiento (t_s).

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

31

4. Ángulo de deformación ($^{\circ}$).

2.3.6. Ley de control conmutada

Para conocer los distintos tipos de controladores es necesario detallar la manera en cual la planta es controlada. Para obtener una solución en este sentido, es conveniente describir el sistema a controlar, en términos de dinámicos. Por esta lista de números que expresa la forma cuantitativa del efecto de todas las influencias externas en la planta antes del momento presente, de este modo la evolución de la planta puede dar un tiempo especificado como una función del estado en ese tiempo. Esa función de estado que determina la acción de control es por tomada en cualquier instante, es llamada **ley de control**

El control activo tradicionalmente se realiza con propuestas armónicas. Véase [27] Considerando al movimiento armónico simple (SHM) como la proyección en un diámetro del movimiento a velocidad uniforme alrededor de la circunferencia de un círculo (Fig 2.13). Durante el SHM un objeto oscila de manera senoidal alrededor de un punto de equilibrio [50].

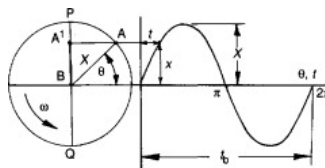


Figura 2.13: Representación gráfica del SHM

Por otra parte, cuando la ley de control la rige una función signo, se espera que haya cambios más repentinos que no vayan en todo momento en armonía con el desplazamiento. Una función estudiada previamente es $u = \text{sgn}(\dot{x})x$ donde x es el desplazamiento en metros, $\dot{x}$ es la velocidad y u la señal de control. La función signo se rige de la siguiente manera (Figura 2.14). Esta señal de control es la que se aplica a los diversos controladores que se rigen con una ley de rigidez

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

32

conmutada.

$$u(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } x > 0 \\ -1, & \text{si } x < 0 \\ 0, & \text{si } x = 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

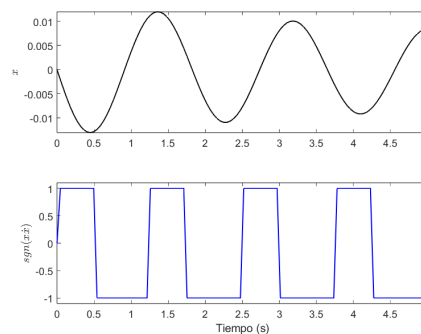


Figura 2.14: Representación gráfica de la ley de control conmutada

2.4. Sistemas de amortiguamiento

Los sistemas de amortiguamiento pueden ser clasificados por su tipo. Un sistema de control **pasivo** consiste en uno o más dispositivos embebidos a una estructura, diseñada para modificar la rigidez o amortiguamiento de una estructura de una manera apropiada sin requerir una fuente de poder externa para operarla, siguiendo una ley de control para mitigar los efectos del sismo. Dentro de esta clasificación se encuentra aislamiento de base, resorte amortiguador, con PI, PID se rigen con movimiento armónico. Amortiguador de fluido viscoso [18], [51], amortiguador sólidos viscoelásticos, amortiguadores metálicos [52], amortiguadores por control de líquido, amortiguador de masa sintonizada (TMD), entre otros [53]. Todos estos son considerados elementos **pasivos** ya que no requieren de ningún tipo de energía externa para su funcionamiento.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

33

to [54], [55], [56].

Dentro de las virtudes en sistemas pasivos, son capaces de experimentar con amplitudes de vibración más grandes. Puesto que no requieren una fuente de energía que alimente a grandes actuadores. El tiempo de respuesta es eficiente puesto que no requiere un procesamiento extra para cumplir con leyes de control complejas.

En cambio, un sistema de control **activo** se define como uno en el cual existe una fuente de poder considerable para controlar los actuadores que aplican fuerzas a la estructura de acuerdo a la ley de control. Entiéndase como **semiactivo** o mixto a los sistemas que involucren componentes pasivos y activos. Su ventaja es obtener las grandes capacidad de un sistema pasivo sumando agregando la flexibilidad de componentes activas.

Aun cuando las virtudes de los sistemas pasivos son vastas. La flexibilidad de los sistemas *activos* los hacen más capaces de mostrar mejores resultados. Ya que pueden adaptarse usando distintas condiciones y leyes de control más complejas. La lista incluye. Amortiguadores de orificio variable, dispositivos de rigidez variable (VSD) [57], [22], [58], amortiguadores de masa activa (AMD), entre otros [27], [59]. En [29] Magdaleno muestra que teóricamente una solución activa tiene mejores resultados que una pasiva tomando el tiempo de asentamiento (t_s) como medida. Este tiempo es el requerido para que la curva de la respuesta alcance y permanecer un rango alrededor del valor final (usualmente entre 2 % y 5 %) [44].

Existen desventajas como en cualquier sistema. Para el caso de los activos, es necesario tener una fuente de energía externa con suficiente potencia para abastecer al actuador de acuerdo a la ley de control. En añadidura el tiempo de procesamiento de la señal de los sensores. Los sistemas activos retroalimentan la señal de un sensor para determinar el error que existe en función del tiempo.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

34

De acuerdo a la tecnología del amortiguador, habrá consideraciones del tiempo computacional.

2.4.1. VSD

Por sus siglas en inglés (Variable Stiffness Device) Los dispositivos de rigidez variable consisten en disipar la energía del sistema al cambiar los valores de la rigidez. Una ley de control simple, basada en la posición y velocidad retroalimentada, es diseñada para conmutar la rigidez de un resorte para el caso de sistemas de masa, resorte amortiguador (Figura 2.15).

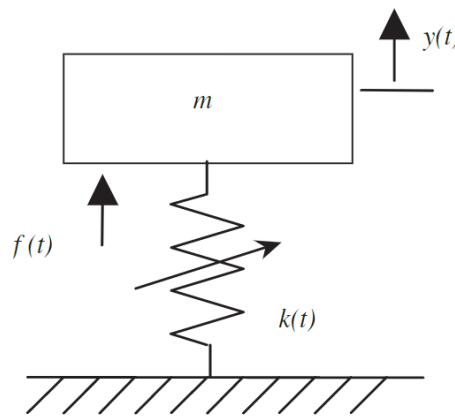


Figura 2.15: Sistema masa resorte con rigidez variable. Fuente: [6]

El sistema debe ser capaz de tener 2 estados de rigidez, referidos como alta rigidez y baja rigidez. El estado de alta rigidez es comúnmente usado cuando el sistema se está moviendo de su punto de equilibrio, para el cual la energía potencial acumulada en el sistema es maximizada. El sistema deberá cambiar a un estado de baja rigidez cuando el sistema alcance su máxima energía potencial, lo cual ocurre cuando el sistema ha llegado a su máxima amplitud de vibración para ese medio ciclo. Por lo cual, la rigidez conmutada resulta en la pérdida de energía potencial. La energía potencial reducida entonces se convierte en,

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

35

energía cinética, que es más baja que la energía cinética del ciclo pasado, debido a la pérdida de energía en el cambio de rigidez.

Este método puede ser utilizado para la mitigación de transitorios y sistemas continuamente alimentados. De cualquier manera, las limitaciones para la implementación de este tipo de vibración son la velocidad de lectura del sistema y la disponibilidad de la configuración de rigidez en práctica. Los altos precios de sensores y el ruido presente son una primera limitación notable. Sin embargo, las ventajas en procesamiento puesto que la ley de control que rige a los actuadores es reducida y no demanda grandes capacidades de cómputo para calcular el movimiento a realizar por el sistema.

2.4.2. AMD

La alternativa activa de un amortiguador de masa sintonizada (TMD), es un sistema que consta de una masa conectada a la estructura principal a través de un actuador. El cual, será desplazará la masa de acuerdo a una ley de control definidas en las ecuaciones de comportamiento o modelo estructural [14]. Véase en la fig 2.16 de AMD en un modelo de 1+1 grado de libertad .

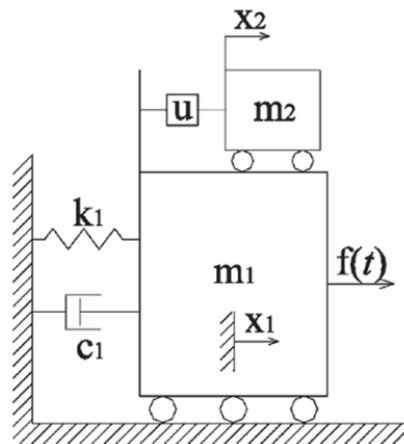


Figura 2.16: Sistema AMD de 1 + 1 grado de libertad. Fuente: [7]

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

36

2.5. Internet de las cosas (IoT)

Antes de establecer una definición es importante determinar un panorama claro de la arquitectura IoT. En [60] se describe una arquitectura de cuatro niveles que fue cambiada por [61] para proponer una definición de IoT.

- Ambiente local. También llamada capa de captura, contiene los objetos conectados y los puntos de adquisición locales. Estos elementos se comunican por diversos medios (Ethernet, fibra óptica, Wi-fi, ZigBee, entre otros [62]).
- Transporte. Permite a los objetos o puntos de adquisición comunicarse con servidores de comandos.
- Almacenamiento. Generalmente toma lugar en servicios de nube y también permite el procesamiento de los datos.
- Usuario o sistema. En esta capa se permite acceso a la información del usuario o sistema a través de APIs [63] o GUIs [64].

Tomando en cuenta la arquitectura de 4 capas vista previamente, la definición de [61] para el IoT. "Grupo de infraestructuras interconectando objetos y permitiendo su administración, minería de datos y acceso a los datos que generan".

2.6. Ciudades inteligentes

El concepto de Ciudades inteligentes se utiliza para identificar un amplio espectro de soluciones heterogéneas y programas de ciudades involucrando distintos tipos de tecnologías que proyectan resolver problemas urbanos [65]. Los principales actores de este modelo son las universidades, instituciones de investigación, compañías de alta tecnología. Puesto que, son los primeros en fomentar

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

37

los proyectos innovadores para mejorar la vida urbana. La palabra *inteligente* refiere de acuerdo al análisis de [65] en los siguientes puntos.

1. Ciudad inteligente. Una ciudad capaz de producir conocimiento para transformarlo en habilidades únicas.
2. Digital. Conectada, digitalizada para procesar y compartir la información.
3. Sostenible. Una ciudad que utilice la tecnología para reducir emisiones CO_2
4. Tecnológica. Que utilice la tecnología para mejorar la eficiencia y efectividad de su infraestructura y servicios, enfocandose en proyectos de calidad de espacio urbano, movilidad y logística.
5. Bienestar ciudadano. Apunta a producir la mejor calidad de vida en los ciudadanos.

Sistemas embebidos [66] son los artefactos de ingeniería que implementan la computación sujetos a restricciones físicas. Las restricciones físicas pueden deberse a su reacción con el entorno físico, o por su ejecución en una plataforma física. Las restricciones por reacción refieren a los tiempos límites para completar la tarea, calidad de la señal de entrada, calidad de la fuente de poder que suministre energía al dispositivo. Estos radican en los requerimientos del sistema. En cuanto a las restricciones por ejecución refiere a las velocidades de procesamiento, potencia y tasa de fallas que se originan en las características del sistema [67].

Para establecer comunicación de un sistema embebido con el almacenamiento en la nube puede llevarse a cabo de distintos protocolos. EIA/TIA-232 mejor conocido como RS-232, sire de interfaz entre los dispositivos de terminal de datos y los equipos de terminal de circuito para emplear un cambio de datos de manera serial [68].

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

38

Para establecer la comunicación se deben asegurar los siguientes puntos.

1. Voltajes comunes ($\pm 5v$ a $\pm 15v$).
2. Configuración de alambrado (TX con RX y GND comunes).
3. Mismos baudios (bits/segundo) en ambos dispositivos.
4. Manejo del protocolo de acuerdo a la Figura 2.17.

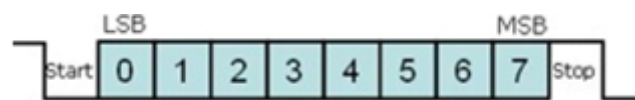


Figura 2.17: Bus de datos RS-232. Fuente: [8]

Con el fin de tener información que pueda ser utilizada en el computador y algún servicio web necesita tener un formato acorde al estandar del cual va a ser decodificado y utilizado por ambos sistemas. Existen dos muy populares JSON y XML. Con fortalezas y desventajas que califican para cubrir necesidades distintas de comunicación.

JSON (del inglés Java Script Object Notation) es una técnica de serialización de objetos muy ligera en términos de almacenamiento. Este formato se basa en la sintáxis de serialización de objetos JavaScript, en específico arreglos y literales. Su esquema debe ser del tipo objeto (con una colección de pares de llave-valor) [69]. Las definiciones de JSON pueden ser incorporadas dentro de archivos JavaScript y ser consultados sin necesidad de convertir los datos porque utilizan la sintáxis de JavaScript [70].

Así como los sistemas embebidos requieren de un protocolo serial para hacer cambio de información con un computador. Uno de los protocolos para hacer transferencia de datos entre computador y servidor web es HTTP (protocolo de transferencia de hiper texto) se caracteriza por tener la velocidad y claridad

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

39

necesaria para transferir datos entre sistemas informáticos. Se utiliza para distintas tareas a través de diversos métodos (comandos). Se hace uso del protocolo HTTP desde 1990 [71].

HTTP cuenta con una terminología para referirse a los roles de cada objeto en la comunicación.

1. Request: La solicitud de un cliente al servidor incluye dentro de la primera línea del mensaje el método aplicado para el recurso, el identificador del recurso y la versión del protocolo a seguir.
2. Client: Un programa de aplicación que establece conexiones para el propósito de enviar mensajes.
3. GET: El método GET adquiere cualquier información (en forma de una entidad) que es identificada por la solicitud.
4. POST: Este método es utilizado para solicitar al servidor que acepte la entidad y permanezca en el cuerpo de la solicitud HTTP.

Dentro del protocolo genérico HTTP se hace uso también de otros protocolos como FTP (Protocolo de transferencia de archivos) [72] o SMTP (Protocolo de transferencia de correos sencillos).

El diseño del protocolo SMTP es basado de la siguiente manera (Figura 2.18). Como resultado de una solicitud de correo de un usuario a un receptor SMTP. El receptor SMTP [9] también puede utilizar al último destinatario o un intermediario.

Los comandos SMTP son generados por el emisor-SMTP y son enviados al receptor-SMTP. Las réplicas SMTP son enviadas desde un receptor-SMTP a un emisor-SMTP en respuesta a los comandos. Sirva de ejemplo el correo de la Figura 2.19.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

40

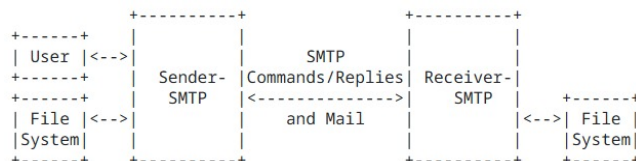


Figura 2.18: Modelo de uso SMTP. Fuente: [9]

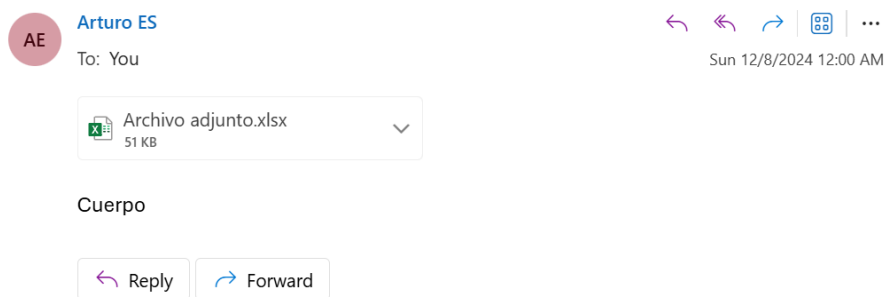


Figura 2.19: Ejemplo de correo con archivo adjunto

Capítulo 3

Metodología

3.1. Modelo

La propuesta del prototipo se basa en la estructura de masa deslizante de TE Solution. En la cual una masa reposa sobre un eje deslizante con baja fricción para mitigar armónicamente el movimiento de la estructura. Su cualidad más representativa son las paredes largas que generan un amplio rango de flexión al ser sometido a un movimiento forzado.

Se propone un AMD que acciona un mecanismo de tornillo tipo ACME con 8mm por revolución sobre un eje horizontal, este eje es accionado por un motor a pasos Nema 17. Se elije el mecanismo de tornillo por su accesibilidad económica para que siga la ley de control planteada en 3.8. Para limitar el rango de desplazamiento en la masa controlada se colocan 2 sensores de efecto hall (A3144) que al ser polarizados por un campo magnético aterrizan su salida en colector abierto. Esta señal es capturada para detener el mecanismo y regresar a la posición inicial de la masa (Figura 3.1).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

42

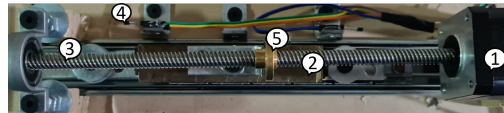


Figura 3.1: Vista superior del controlador: 1- Motor a pasos, 2-Masa controlada, 3-Tornillo ACME, 4-Sensor de efecto hall.

En cuanto al diseño del sistema propuesto se tomó como estructura una edificación con placas de acero galvanizado calibre 18, de 1 metro de largo. Se fijaron 4 ruedas que soportan la estructura para permitir el movimiento en un solo eje. Las ruedas se encuentran atornilladas a tablones de madera de 36.5x11x2cm. El piso y base están hechos de un material acrílico con 11x32x11cm. La cualidad característica del prototipo son las paredes largas que generan un amplio rango de flexión al ser sometida a un movimiento forzado. Lo cual es deseable para apreciar mejor el estudio de su desplazamiento (Figura 3.2).

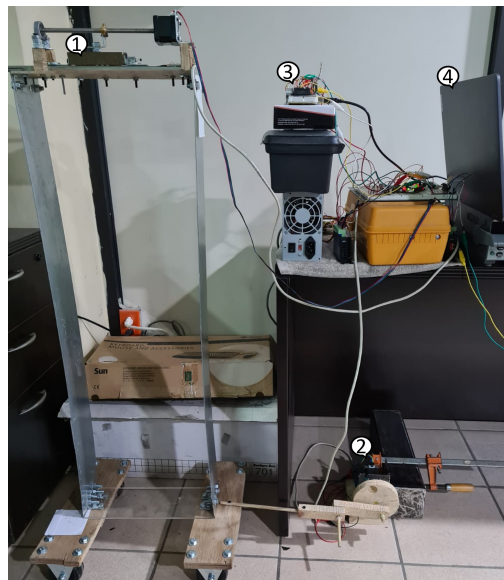


Figura 3.2: Modelo experimental: 1- Masa controlada, 2- Mecanismo biela-manivela, 3-Sensor ultrasónico, 4- Computador.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

43

Con el fin de someter la estructura a una señal de entrada controlada se acopló un mecanismo biela manivela a una de las tablas que soporta la estructura. El mecanismo es accionado por otro motor a pasos NEMA17, controlado por otra tarjeta Arduino Nano. En este mecanismo con fines de estabilidad, se prensa a un bloque de acero vaciado de 10x41x10cm de 25kg. De esta manera, se tiene un peso que se opone al momento creado del mecanismo (Figura 3.3).



Figura 3.3: Mecanismo biela-manivela: 1- Masa de acero vaciado, 2- Manivela, 3- Biela, 4- Corredor, 5- Estructura.

Si el prototipo es sometido a una excitación controlada sin ninguna resistencia que se oponga al movimiento, se obtendrá una respuesta oscilatoria conocida como respuesta natural. Una manera de encontrar las propiedades del sistema es siguiendo el experimento de Escalante para determinar el coeficiente de amortiguamiento viscoso [73].

Donde a partir de la respuesta homogénea del sistema sujeto a condiciones iniciales controladas, se determinan los cuasi periodos siguientes. τ (el tiempo que tarda la señal en alcanzar 2 valores pico, un máximo y un mínimo). Sea $\frac{\tau}{2}$ el promedio de las diferencias consecutivas de los tiempos que tarda el piso en pasar por el punto de equilibrio. Por consiguiente, $\frac{\tau}{4}$ será el tiempo que tarda el piso en ir del punto de equilibrio a un extremo.

$$\frac{\tau}{2} = \frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} (t_{i+1} - t_i) \quad (3.1)$$

$$\frac{\tau}{4} = \frac{1}{2} \frac{\tau}{2}$$

Donde n_f es el número de veces en que el desplazamiento ha cruzado por el punto de equilibrio hasta haber llegado a un margen aceptable. El Instituto

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

44

Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) indica en su normativa de seguridad estructural que la distorsión máxima permisible de muros es de 0.02m [74].

Al completarse t_{n_f} se ha vuelto aceptable la oscilación de la estructura. De otra manera, este sería el límite de la función que se necesita amortiguar.

$$\forall t > t_{n_f}, |x(t)| \leq x_{lim} \quad (3.2)$$

Donde x_{lim} es el margen máximo de desplazamiento aceptado. Teniendo $\frac{\tau}{4}$ es posible calcular λ y en consecuencia β de la curva exponencial que delimita la solución $x(t)$. También es correcto decir que la función $x(t)$ está limitada por la envolvente $y(t) = Ae^{-\lambda t}$, que sabemos tiene como $A = x(0)$ y que $x(t_{n_f})$ fue el último tiempo para el cual el piso cruza por el equilibrio hasta tener una oscilación en margen aceptable.

$$y(t_{n_f} + \frac{\tau}{4}) = x(t_{26} + \frac{\tau}{4}) \quad (3.3)$$

A partir de la ecuación de la envolvente:

$$\begin{aligned} y(t) &= Ae^{-\lambda t} \\ \ln |y(t)| &= \ln |A| + \ln |e^{-\lambda t}| \\ \ln |y(t)| &= \ln |A| - \lambda t \\ \ln |x_{lim}| &= \ln |A| - \lambda(t_{n_f}) \\ \lambda &= \frac{\ln |A| - \ln |x_{lim}|}{t_{n_f}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

A partir de $\beta = 2m\lambda$ es posible determinar el coeficiente de amortiguamiento

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

45

viscoso.

$$\beta = 2m\lambda \quad (3.5)$$

Con el coeficiente de amortiguamiento viscoso ya es posible crear una envolvente que limite la exponencial de la respuesta natural. En consecuencia, también se puede aproximar un valor de rigidez de manera gráfica.

Establecidos los parámetros que determinan la dinámica de la estructura se puede definir el modelo a trabajar en el presente AMD (Figura 3.4) donde m_c es la masa controlada que se deslizará a lo largo del tornillo ACME. Siguiendo la ley de control u . m_t contempla a la masa del piso. k la constante de rigidez conmutada de las paredes b el coeficiente de amortiguamiento viscoso de las paredes. x define el desplazamiento en metros de la estructura. F_g la fuerza aplicada por el mecanismo biela-manivela.

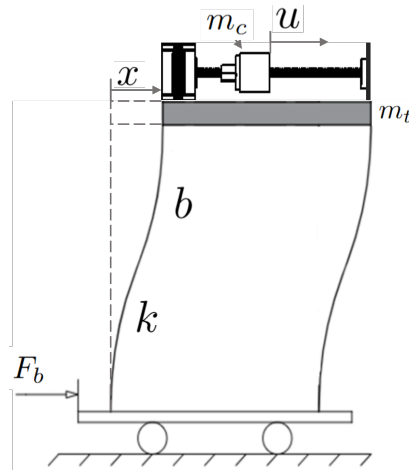


Figura 3.4: Modelo conceptual de un nivel

Asumiendo el siguiente vector de estados ($z = [x \ \dot{x}]^T$) para la posición y velocidad del piso. Donde $\dot{f}$ denota la derivada de f con respecto al tiempo. La ley de control $u = k_c \text{sgn}(\dot{x})x$ donde $\text{sgn}()$ es la función signo y k_c el parámetro de ajuste del controlador que sigue la estrategia de rigidez conmutada. Se puede

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

46

representar el modelo matemático de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}\dot{z} &= Az + Bu \\ y &= Cz\end{aligned}\tag{3.6}$$

Donde:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{pmatrix} B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix} C = (1 \ 0)\tag{3.7}$$

$$u = -k_c \operatorname{sgn}(\dot{x})x\tag{3.8}$$

Por lo que agregando el peso del controlador, la masa $m = m_t + m_c$.

3.2. Instrumentación

La instrumentación del proyecto contempla 2 máquinas de estado finitas (FSM). de la cual una se implementa al sensor ultrasónico HC-SR04 para medir el desplazamiento del piso. Esta información es procesada en el estado decaptura para determinar la señal de control y el movimiento específico a realizar por el motor a pasos en el siguiente estado a través del controlador TB6600.



Figura 3.5: Diagrama de flujo de la FSM en arduino

Para trabajar el módulo de sensor ultrasónico HC-SR04, su hoja de datos [75] provee el diagrama de tiempo. Donde infica que el módulo requiere un pulso de $10\mu S$ a la entrada *trigger*. Enseguida el módulo mandará un sonido ultrasónico de 8 ciclos a 40kHz. La señal deberá rebotar en el objeto de estudio y el puerto de *echo* se activará.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

47

Profundizando un poco en la teoría implícita. Es recomendable determinar la velocidad del sonido con la siguiente ecuación 3.9. Con el fin de aproximar una velocidad más certera.

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT_K}{M}} \quad (3.9)$$

Donde:

- c. Velocidad del sonido (m/s).
- γ . Constante adiabática.
- R. Constante molar ($\frac{J}{molK}$).
- M. Masa molecular ($\frac{g}{mol}$).
- T. Temperatura (K).

Por lo que, considerando los parámetros de la tabla 3.1. Se determina la velocidad del sonido $c = 346.3174m/s$

Parámetros del aire	
Parámetro	Valor
γ	1.38 ± 0.08
R	$8.314 \frac{J}{molK}$
T_K	$30^\circ C = 303.15K$
M	$29 * 10^{-3} \frac{g}{mol}$

Tabla 3.1: Parámetros del aire.

Cambiando de unidades.

$$c = 346.3174 \frac{m}{s} \frac{100cm}{m} \frac{1s}{1 * 10^6 \mu s} \quad (3.10)$$

$$c = 0.034cm/\mu s$$

Planteando la situación. El sonido debe rebotar en el objeto de estudio y

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

48

regresar a la posición inicial. Por lo que, se puede plantear la distancia en centímetros mediante la siguiente ecuación 3.11.

$$\begin{aligned}
 c &= 2 \frac{Distancia_{(cm)}}{t_{(\mu s)}} \\
 Distancia_{(cm)} &= \frac{c * t_{(\mu s)}}{2} \\
 Distancia_{(cm)} &= \frac{0.034 \frac{cm}{\mu s} * t_{(\mu s)}}{2} \\
 Distancia_{(cm)} &= 0.017 \frac{cm}{\mu s} * t_{(\mu s)} \\
 Distancia_{(cm)} &= \frac{1}{58} \frac{cm}{\mu s} * t_{(\mu s)}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Esta ecuación es la que debe ejecutar la tarjeta Arduino UNO para determinar la distancia a la que se encuentra el piso de la estructura. Por practicidad es recomendable trabajar con el desplazamiento en vez de la posición real de la estructura. Para encontrarlo se tiene la siguiente ecuación.

$$Desplazamiento_{(cm)} = Distancia_{(cm)} - DistanciaSensor_{(cm)} \tag{3.12}$$

Considerando que el motor a pasos debe mover la masa de acuerdo a la ley de control. También será necesario hacer la conversión de pasos rotacionales del motor a desplazamiento lineal de la masa controlada. De acuerdo a la resolución del controlador TB6600. Para alcanzar la velocidad máxima del controlador se tiene que la resolución mínima es $400 \frac{pasos}{rev}$ [76]. De acuerdo a la hoja de datos del motor a pasos NEMA 17 [77]. Cada paso representa una rotación de 1.8° .

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

49

$$360 \text{ Grados} = 400 \text{ Pasos}$$

$$360 \text{ Grados} = 8mm = 0.8cm$$

$$1 \text{ cm} = \frac{360 \text{ Grados}}{0.8}$$

$$1 \text{ cm} = 450 \text{ Grados} \quad (3.13)$$

$$Pasos = \frac{450 \text{ Grados} * 400}{360 \text{ Grados}}$$

$$1 \text{ cm} = 500 \text{ Pasos}$$

Por lo que para interpretar el desplazamiento en centímetros de la masa controlada en cada ciclo siguiendo la ley de control (Ec. 3.8) habrá que aplicar la siguiente ecuación 3.14. Cuando la función signo requiera un desplazamiento negativo sólo indica que el motor gire en sentido contrario para llevar a la masa controlada en sentido opuesto.

$$\text{DesplazamientoMasa}(cm) = 500 * Pasos * k_c \quad (3.14)$$

En cuanto a la segunda FSM contempla una tarjeta Arduino Nano que tiene como función principal obtener el desplazamiento del piso, sin embargo en el mismo paquete de información se envía el tiempo transcurrido y el signo con el cual va a girar el motor. Mediante RS-232, para el tratamiento de la información se hizo uso de algunos instrumentos del software NI Labview. Como marcadores que separan a partir de qué bit continua el siguiente dato. Se estableció en el instrumento virtual dos puntos como marcador “:”. Por lo que el dato crudo es separado en 3 particiones antes de continuar con la siguiente medición. Cada que termina un ciclo del bucle while los datos son recopilados en un archivo Excel histórico.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

50

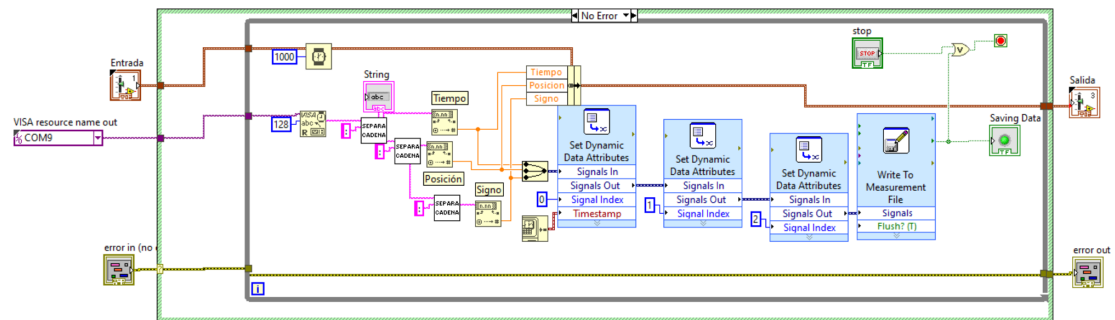


Figura 3.6: Diagrama a bloques de la adquisición por el computador en NI Labview 2024 Q1.

3.2.1. Despliegue de información

En cuanto a la parte de publicación de datos en el servidor, la siguiente

Figura 3.7 plantea de manera clara la distribución de actividades en la FSM.

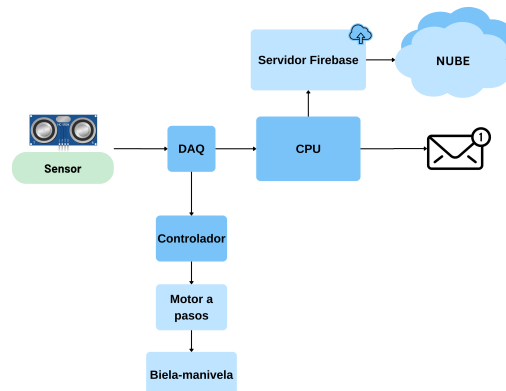


Figura 3.7: Diagrama a bloques de la FSM en NI Labview.

Para poder subir la información a la base de datos de Firebase mediante protocolo HTTP es recomendable darle formato JSON a cada paquete. Con su jerarquía de par clave-valor para almacenar información NI Labview cuenta con un instrumento virtual que facilita el cambio de formato de flotante a JSON. Enseguida mediante una solicitud POST [78], del protocolo HTTP, se publica cada paquete de datos transferidos al servidor Firebase como se muestra en la

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

51

Figura 3.8.

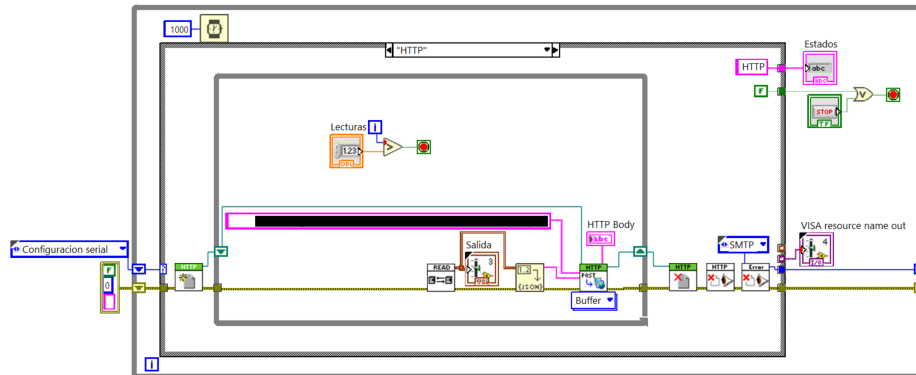


Figura 3.8: Diagrama a bloques del envío a servidor

En cuanto al protocolo SMTP, es necesario abrir un cliente SMTP, definir el servidor SMTP de correo así como el puerto requerido por el servidor. Enseguida se colocan los datos principales del correo sencillo como (correo destinatario, correo emisor, asunto y cuerpo del mensaje), para agregar un archivo adjunto NI Labview ofrece otro instrumento virtual donde se indica la dirección del archivo en el computador y se concatena el instrumento con los anteriores.

Al terminar la ejecución se envía una notificación de correo electrónico adjuntando el archivo generado previamente.

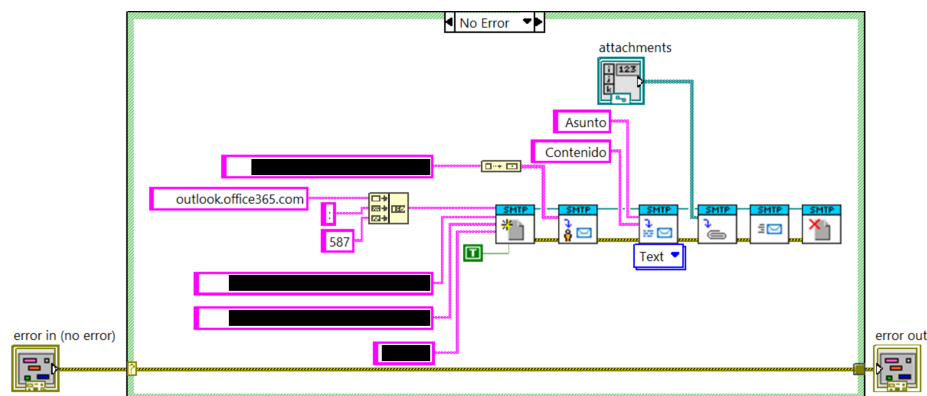


Figura 3.9: Diagrama a bloques del envío por SMTP

Capítulo 4

Resultados

4.1. Solución teórica

$$m\ddot{\bar{x}} + b\dot{\bar{x}} + k\bar{x} = u \quad (4.1)$$

$$\ddot{\bar{x}} + \frac{b}{m}\dot{\bar{x}} + \frac{k}{m}\bar{x} = \frac{1}{m}u$$

Donde $u = -k_c \operatorname{sgn}(\bar{x}\dot{\bar{x}})\bar{x}$

Al definir los parámetros no dimensionales como la tasa de amortiguamiento

$\zeta = \frac{b}{2\sqrt{km}}$ la frecuencia natural $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ y $\omega_c^2 = \frac{k_c}{m}$. Agregando a lo anterior,

la escala de tiempo $\tau = \omega_0 t$ y el cambio de variable $\bar{x} = Lx$ donde L es una

constante se puede reescribir la Ec. (4). Comenzando por reescalar el tiempo en

función de τ Se tiene que.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

53

$$\begin{aligned}
 \bar{x} &= Lx \\
 \frac{d\bar{x}}{dt} &= L \frac{dx}{dt} \\
 \frac{d\bar{x}}{dt} &= L \frac{dx}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} \\
 \frac{d\bar{x}}{dt} &= L \frac{dx}{d\tau} \cdot \frac{d(\omega_0 t)}{dt} \\
 \bar{x}' &= L\omega_0 \frac{dx}{d\tau} \cdot \frac{dt}{dt} \\
 \bar{x}' &= L\omega_0 \dot{x}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{x}'' &= \frac{d}{dt} [L\omega_0 \dot{x}] \\
 \bar{x}'' &= L\omega_0 \frac{d\dot{x}}{dt} \\
 \bar{x}'' &= L\omega_0 \frac{d\dot{x}}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} \\
 \bar{x}'' &= L\omega_0 \frac{d\dot{x}}{d\tau} \cdot \frac{d(\omega_0 t)}{dt} \\
 \bar{x}'' &= L\omega_0^2 \frac{dx}{d\tau} \cdot \frac{dt}{dt} \\
 \bar{x}'' &= L\omega_0^2 \ddot{x}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Sustituyendo en la Ec. (4).

$$\begin{aligned}
 L\omega_0^2 \ddot{x} + L\omega_0 \frac{b}{m} \dot{x} + L \frac{k}{m} x &= -L \frac{k_c}{m} \operatorname{sgn}(x\dot{x})x \\
 \left[L\omega_0^2 \ddot{x} + L\omega_0 \frac{b}{m} \dot{x} + L \frac{k}{m} x = -L \frac{k_c}{m} \operatorname{sgn}(x\dot{x})x \right] \frac{1}{L\omega_0^2} \\
 \ddot{x} + \frac{b}{\omega_0 m} \dot{x} + \frac{1}{\omega_0^2} \frac{k}{m} x &= -\frac{1}{\omega_0^2} \frac{k_c}{m} \operatorname{sgn}(x\dot{x})x \\
 \ddot{x} + \frac{b}{\omega_0 m} \dot{x} + \frac{1}{\omega_0^2} \frac{1}{m} (k + k_c \operatorname{sgn}(x\dot{x}))x &= 0
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

El parámetro de ajuste ϵ está definido por $\epsilon = \frac{\omega_s^2}{\omega_0^2} = \frac{k_c}{k}$. Por lo que la

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

54

ganancia del controlador está dada por $k_c = \epsilon k$.

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{b}{\omega_0 m} \dot{x} + \frac{1}{\omega_0^2} \frac{k}{m} (1 + \epsilon \operatorname{sgn}(x\dot{x}))x &= 0 \\ \ddot{x} + \frac{b}{\omega_0 m} \dot{x} + \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2} (1 + \epsilon \operatorname{sgn}(x\dot{x}))x &= 0 \\ \ddot{x} + \frac{b}{\omega_0 m} \dot{x} + (1 + \epsilon \operatorname{sgn}(x\dot{x}))x &= 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

En cuanto a la tasa de amortiguamiento se puede desarrollar de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} 2\zeta &= \frac{b}{\omega_0 m} \\ 2\zeta &= \frac{b}{\sqrt{\frac{k}{m}} m} \\ 2\zeta &= \frac{b}{k^{\frac{1}{2}} m^{-\frac{1}{2}} m} \\ 2\zeta &= \frac{b}{k^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}}} \\ 2\zeta &= \frac{b}{\sqrt{km}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Resultando de esta manera la Ec. (4.7)

$$\ddot{x} + 2\zeta \dot{x} + (1 + \epsilon \operatorname{sgn}(x\dot{x}))x = 0 \quad (4.7)$$

Resolviendo la ecuación diferencial homogénea para el caso de una velocidad inicial de $1m/s$ se tienen las siguiente condiciones $(x_0, \dot{x}_0) = (0, 1)$

Primer Cuadrante

Al encontrarse en el primer cuadrante. La función signo tendrá como argu-

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

55

mento un resultado positivo $\text{sgn}(x\dot{x}) = 1$. Reescribiendo la Ec (4.7)

$$\ddot{x}_1 + 2\zeta\dot{x}_1 + (1 + \epsilon)x_1 = 0 \quad (4.8)$$

Para hacer la representación en el espacio de estados se puede expresar de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \ddot{x}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(1 + \epsilon) & -2\zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.9)$$

Para obtener la ecuación característica del sistema.

$$\lambda_{12} = \det \begin{bmatrix} -\lambda & 1 \\ -(1 + \epsilon) & -2\zeta - \lambda \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{12} &= \lambda^2 + 2\zeta + (1 + \epsilon) \\ \lambda_{12} &= -\frac{2\zeta \pm \sqrt{(2\zeta)^2 - 4(1 + \epsilon)}}{2} \\ \lambda_{12} &= -\zeta \pm \frac{\sqrt{(2^2\zeta^2) - 2^2(1 + \epsilon)}}{2} \\ \lambda_{12} &= -\zeta \pm \frac{\sqrt{2^2(\zeta^2 - (1 + \epsilon))}}{2} \\ \lambda_{12} &= -\zeta \pm \frac{2}{2}\sqrt{(\zeta^2 - (1 + \epsilon))} \\ \lambda_{12} &= -\zeta \pm \sqrt{(\zeta^2 - (1 + \epsilon))} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Para obtener una respuesta oscilatoria es necesario que $\zeta^2 - (1 + \epsilon) < 0$ Por lo que $\lambda_{12} = -\zeta \pm j\omega_h$. Donde $\omega_h = \sqrt{-\zeta^2 + (1 + \epsilon)}$

Por lo que podemos adecuar la siguiente respuesta homogénea.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

56

$$x_{1(t)} = c_1 e^{(-\zeta + j\omega_h)t} + c_2 e^{(-\zeta - j\omega_h)t} \quad (4.12)$$

De acuerdo a la siguiente propiedad.

$$e^{a+b} = e^a e^b \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} x_{1(t)} &= c_1 e^{j\omega_h t} e^{-\zeta t} + c_2 e^{-j\omega_h t} e^{-\zeta t} \\ x_{1(t)} &= e^{\zeta t} [c_1 e^{j\omega_h t} + c_2 e^{-j\omega_h t}] \end{aligned} \quad (4.14)$$

Utilizando la siguiente propiedad.

$$\begin{aligned} e^{j\beta t} &= \cos(\beta t) + j \sin(\beta t) \\ e^{-j\beta t} &= \cos(\beta t) - j \sin(\beta t) \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} x_{1(t)} &= e^{-\zeta t} \{c_1 [\cos(\omega_h t) + j \sin(\omega_h t)] + c_2 [\cos(\omega_h t) - j \sin(\omega_h t)]\} \\ x_{1(t)} &= e^{-\zeta t} \{[c_1 + c_2] \cos(\omega_h t) + j[c_1 - c_2] \sin(\omega_h t)\} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Reduciendo las constantes $c_a = [c_1 + c_2]$ y $c_b = j[c_1 - c_2]$

$$x_{1(t)} = e^{-\zeta t} [c_a \cos(\omega_h t) + c_b \sin(\omega_h t)] \quad (4.17)$$

Por lo que la derivada de $x_{1(t)}$.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1(t)} &= -\zeta e^{-\zeta t} [c_a \cos(\omega_h t) + c_b \sin(\omega_h t)] + e^{-\zeta t} [-c_a \omega_h \sin(\omega_h t) + c_b \omega_h \cos(\omega_h t)] \\ \dot{x}_{1(t)} &= e^{-\zeta t} [-c_a \zeta \cos(\omega_h t) - c_b \zeta \sin(\omega_h t) - c_a \omega_h \sin(\omega_h t) + c_b \omega_h \cos(\omega_h t)] \end{aligned} \quad (4.18)$$

Reordenando.

$$\dot{x}_{1(t)} = e^{-\zeta t} \{-c_a [\zeta \cos(\omega_h t) + \omega_h \sin(\omega_h t)] + c_b [\omega_h \cos(\omega_h t) - \zeta \sin(\omega_h t)]\} \quad (4.19)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

57

Bajo las condiciones iniciales del problema de valor inicial $(x_0, \dot{x}_0) = (0, 1)$ es posible encontrar las constantes de la solución.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{1(0)} \\ \dot{x}_{1(0)} \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} c_a \\ -\zeta c_a & \omega_h c_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ c_b &= \frac{1 + \zeta c_a}{\omega_h} \\ c_b &= \frac{1}{\omega_h} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Por lo que la derivada resulta.

$$\dot{x}_{1(t)} = \frac{1}{\omega_h} e^{-\zeta t} [\omega_h \cos(\omega_h t) - \zeta \sin(\omega_h t)] \quad (4.21)$$

Reordenando.

$$\begin{bmatrix} x_{1(t)} \\ \dot{x}_{1(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\zeta t} + \frac{1}{\omega_h} \sin(\omega_h t) \\ e^{-\zeta t} [\cos(\omega_h t) - \frac{\zeta}{\omega_h} \sin(\omega_h t)] \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Obteniendo el primer tiempo de cambio.

$$t = t_1 \quad \dot{x}_{1(t_1)} = 0 \quad (4.23)$$

Si $\cos(\omega_h t) - \frac{\zeta}{\omega_h} \sin(\omega_h t) = 0$ entonces es correcto decir que $\dot{x}_{1(t_1)} = 0$.

Resolviendo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

58

$$\begin{aligned}
 \cos(\omega_h t_1) - \frac{\zeta}{\omega_h} \sin(\omega_h t_1) &= 0 \\
 \cos(\omega_h t_1) &= \frac{\zeta}{\omega_h} \sin(\omega_h t_1) \\
 \frac{\omega_h}{\zeta} &= \frac{\sin(\omega_h t_1)}{\cos(\omega_h t_1)} \\
 \frac{\omega_h}{\zeta} &= \tan(\omega_h t_1) \\
 \arctan\left(\frac{\omega_h}{\zeta}\right) &= \omega_h t_1
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

$$t_1 = \frac{1}{\omega_h} \arctan\left(\frac{\omega_h}{\zeta}\right) \tag{4.25}$$

Para encontrar la condición inicial del siguiente instante $x_1^0 = x_{1(t_1)}$

$$\begin{aligned}
 x_1^0 = x_{1(t_1)} &= e^{-\zeta t_1} + \frac{1}{\omega_h} \sin \left\{ \omega_h \left[\frac{1}{\omega_h} \arctan \left(\frac{\omega_h}{\zeta} \right) \right] \right\} \\
 x_1^0 &= e^{-\zeta t_1} + \frac{1}{\omega_h} \sin \left[\arctan \left(\frac{\omega_h}{\zeta} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

Haciendo un cambio de variable para facilitar la deducción.

$$\begin{aligned}
 y &= \arctan \left(\frac{\omega_h}{\zeta} \right) \\
 \tan(y) &= \frac{\omega_h}{\zeta}
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Utilizando como apoyo el triángulo rectángulo de la Fig (??)

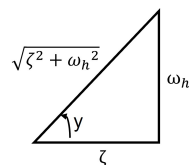


Figura 4.1: Triángulo rectángulo del primer cambio de variable.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

59

$$\begin{aligned}\sin(y) &= \frac{\omega_h}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}} \\ x_1^0 &= \frac{1}{\omega_h} e^{-\zeta t_1} \frac{\omega_h}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}}\end{aligned}\quad (4.28)$$

$$x_1^0 = \frac{1}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}} e^{-\zeta t_1} \quad (4.29)$$

Segundo Cuadrante

En este punto la función signo tendrá como argumento un resultado negativo $\text{sgn}(x\dot{x}) = -1$. Reescribiendo la Ec (4.7).

$$\ddot{x}_2 + 2\zeta\dot{x}_2 + (1 - \epsilon)x_2 = 0 \quad (4.30)$$

Para hacer la representación en el espacio de estados se puede expresar de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(1 - \epsilon) & -2\zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.31)$$

Para obtener la ecuación característica del sistema.

$$\lambda_{12} = \det \begin{bmatrix} -\lambda & 1 \\ -(1 - \epsilon) & -2\zeta - \lambda \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned}\lambda_{12} &= \lambda^2 + 2\zeta + (1 - \epsilon) \\ \lambda_{12} &= -\zeta \pm \sqrt{(\zeta^2 - (1 - \epsilon))}\end{aligned}\quad (4.33)$$

Para obtener una respuesta oscilatoria es necesario que $\zeta^2 - (1 - \epsilon) < 0$ Por

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

60

lo que $\lambda_{12} = -\zeta \pm j\omega_l$. Donde $\omega_l = \sqrt{-\zeta^2 + (1 - \epsilon)}$

Por lo que podemos adecuar la siguiente respuesta homogénea.

$$x_{2(t)} = c_1 e^{(-\zeta + j\omega_l)t} + c_2 e^{(-\zeta - j\omega_l)t} \quad (4.34)$$

De acuerdo a la siguiente propiedad.

$$e^{a+b} = e^a + e^b \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} x_{2(t)} &= c_1 e^{j\omega_l t} e^{-\zeta t} + c_2 e^{-j\omega_l t} e^{-\zeta t} \\ x_{2(t)} &= e^{\zeta t} [c_1 e^{j\omega_l t} + c_2 e^{-j\omega_l t}] \end{aligned} \quad (4.36)$$

Utilizando la siguiente propiedad.

$$\begin{aligned} e^{j\beta t} &= \cos(\beta t) + j \sin(\beta t) \\ e^{-j\beta t} &= \cos(\beta t) - j \sin(\beta t) \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} x_{2(t)} &= e^{-\zeta t} \{c_1 [\cos(\omega_l t) + j \sin(\omega_l t)] + c_2 [\cos(\omega_l t) - j \sin(\omega_l t)]\} \\ x_{2(t)} &= e^{-\zeta t} \{[c_1 + c_2] \cos(\omega_l t) + j[c_1 - c_2] \sin(\omega_l t)\} \end{aligned} \quad (4.38)$$

Reduciendo las constantes $c_a = [c_1 + c_2]$ y $c_b = j[c_1 - c_2]$

$$x_{2(t)} = e^{-\zeta t} [c_a \cos(\omega_l t) + c_b \sin(\omega_l t)] \quad (4.39)$$

Por lo que la derivada de $x_{2(t)}$.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{2(t)} &= -\zeta e^{-\zeta t} [c_a \cos(\omega_l t) + c_b \sin(\omega_l t)] + e^{-\zeta t} [-c_a \omega_l \sin(\omega_l t) + c_b \omega_l \cos(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{2(t)} &= e^{-\zeta t} [-c_a \zeta \cos(\omega_l t) - c_b \zeta \sin(\omega_l t) - c_a \omega_l \sin(\omega_l t) + c_b \omega_l \cos(\omega_l t)] \end{aligned} \quad (4.40)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

61

Reordenando.

$$\dot{x}_{2(t)} = e^{-\zeta t} \{-c_a[\zeta \cos(\omega_l t) + \omega_l \sin(\omega_l t)] + c_b[\omega_l \cos(\omega_l t) - \zeta \sin(\omega_l t)]\} \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{2(0)} \\ \dot{x}_{2(0)} \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} c_a \\ -\zeta c_a & \omega_l c_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ c_b &= \frac{\zeta c_a}{\omega_l} \\ c_b &= \frac{x_1^0 \zeta}{\omega_l} \end{aligned} \quad (4.42)$$

Sustituyendo c_a y c_b .

$$\begin{aligned} x_{2(t)} &= e^{-\zeta t} \left[x_1^0 \cos(\omega_l t) + \frac{x_1^0 \zeta}{\omega_l} \sin(\omega_l t) \right] \\ x_{2(t)} &= \frac{x_1^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\omega_l \cos(\omega_l t) + \zeta \sin(\omega_l t)] \end{aligned} \quad (4.43)$$

Obteniendo su derivada.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{2(t)} &= \frac{x_1^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [-\omega_l^2 \sin(\omega_l t) + \zeta \omega_l \cos(\omega_l t)] - \frac{\zeta x_1^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\omega_l \cos(\omega_l t) + \zeta \sin(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{2(t)} &= \frac{x_1^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\zeta \omega_l \cos(\omega_l t) - \omega_l^2 \sin(\omega_l t)] - \frac{x_1^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\zeta \omega_l \cos(\omega_l t) + \zeta^2 \sin(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{2(t)} &= \frac{x_1^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\zeta \omega_l \cos(\omega_l t) - \omega_l^2 \sin(\omega_l t) - \zeta \omega_l \cos(\omega_l t) - \zeta^2 \sin(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{2(t)} &= \frac{x_1^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [-\omega_l^2 \sin(\omega_l t) - \zeta^2 \sin(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{2(t)} &= -\frac{x_1^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\omega_l^2 \sin(\omega_l t) + \zeta^2 \sin(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{2(t)} &= -\frac{x_1^0(\zeta^2 + \omega_l^2)}{\omega_l} e^{-\zeta t} \sin(\omega_l t) \end{aligned} \quad (4.44)$$

Reordenando

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

62

$$\begin{bmatrix} x_{2(t)} \\ \dot{x}_{2(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_1^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\omega_l \cos(\omega_l t) + \zeta \sin(\omega_l t)] \\ -\frac{x_1^0(\zeta^2 + \omega_l^2)}{\omega_l} e^{-\zeta t} \sin(\omega_l t) \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Obteniendo el segundo tiempo de cambio.

$$t = t_2$$

$$x_{2(t_2)} = 0$$

$$\cos(\omega_l \cos(\omega_l t_2)) + \zeta \sin(\omega_l t_2) = 0$$

$$\cos(\omega_l \cos(\omega_l t_2)) = -\zeta \sin(\omega_l t_2)$$

$$\frac{\omega_l}{-\zeta} = \frac{\sin(\omega_l t_2)}{\cos(\omega_l t_2)} \quad (4.46)$$

$$\frac{\omega_l}{-\zeta} = \tan(\omega_l t_2)$$

$$\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) = \omega_l t_2$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega_l} \arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right)$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega_l} \left[\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) + \pi \right] \quad (4.47)$$

Para encontrar la condición inicial del siguiente instante $x_2^0 = \dot{x}_{2(t_2)}$

$$\begin{aligned} x_2^0 = \dot{x}_{2(t_2)} &= -\frac{x_1^0(\zeta^2 + \omega_l^2)}{\omega_l} e^{-\zeta t_2} \sin(\omega_l t_2) \\ x_2^0 &= -\frac{x_1^0(\zeta^2 + \omega_l^2)}{\omega_l} e^{-\zeta t_2} \sin\left\{\omega_l \left[\frac{1}{\omega_l} \left[\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) + \pi\right]\right]\right\} \\ x_2^0 &= \frac{x_1^0(\zeta^2 + \omega_l^2)}{\omega_l} e^{-\zeta t_2} \sin\left[\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right)\right] \end{aligned} \quad (4.48)$$

Haciendo un cambio de variable para facilitar la deducción.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

63

$$\begin{aligned} y &= \arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) \\ \tan(y) &= \frac{\omega_l}{-\zeta} \end{aligned} \quad (4.49)$$

Utilizando como apoyo el triángulo rectángulo de la Fig (4.2)

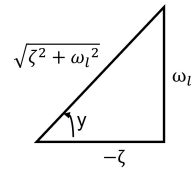


Figura 4.2: Triángulo rectángulo del segundo cambio de variable

$$\begin{aligned} \sin(y) &= \frac{\omega_l}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2}} \\ x_2^0 &= \frac{x_1^0(\zeta^2 + \omega_l^2)}{\omega_l} e^{-\zeta t_2} \frac{\omega_l}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2}} \\ x_2^0 &= x_1^0 e^{-\zeta t_2} \frac{(\zeta^2 + \omega_l^2)}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2}} \end{aligned} \quad (4.50)$$

$$\begin{aligned} x_2^0 &= x_1^0 e^{-\zeta t_2} \sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2} \\ x_2^0 &= \left[\frac{1}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}} e^{-\zeta t_1} \right] e^{-\zeta t_2} \sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2} \\ x_2^0 &= \frac{\sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2}}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}} e^{-\zeta(t_1+t_2)} \end{aligned} \quad (4.51)$$

Tercer Cuadrante

En este punto la función signo tendrá como argumento un resultado positivo $\text{sgn}(x\dot{x}) = 1$. Reescribiendo la Ec (4.7).

$$\ddot{x}_3 + 2\zeta\dot{x}_3 + (1 + \epsilon)x_3 = 0 \quad (4.52)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

64

Para hacer la representación en el espacio de estados se puede expresar de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(1+\epsilon) & -2\zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.53)$$

Para obtener la ecuación característica del sistema.

$$\lambda_{12} = \det \begin{bmatrix} -\lambda & 1 \\ -(1+\epsilon) & -2\zeta - \lambda \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{12} &= \lambda^2 + 2\zeta + (1+\epsilon) \\ \lambda_{12} &= -\zeta \pm \sqrt{(\zeta^2 - (1+\epsilon))} \end{aligned} \quad (4.55)$$

Para obtener una respuesta oscilatoria es necesario que $\zeta^2 - (1+\epsilon) < 0$ Por lo que $\lambda_{12} = -\zeta \pm j\omega_h$. Donde $\omega_h = \sqrt{-\zeta^2 + (1+\epsilon)}$

Por lo que podemos adecuar la siguiente respuesta homogénea.

$$x_{3(t)} = c_1 e^{(-\zeta + j\omega_h)t} + c_2 e^{(-\zeta - j\omega_h)t} \quad (4.56)$$

De acuerdo a la siguiente propiedad.

$$e^{a+b} = e^a + e^b \quad (4.57)$$

$$\begin{aligned} x_{3(t)} &= c_1 e^{j\omega_h t} e^{-\zeta t} + c_2 e^{-j\omega_h t} e^{-\zeta t} \\ x_{3(t)} &= e^{\zeta t} [c_1 e^{j\omega_h t} + c_2 e^{-j\omega_h t}] \end{aligned} \quad (4.58)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

65

Utilizando la siguiente propiedad.

$$\begin{aligned} e^{j\beta t} &= \cos(\beta t) + j \sin(\beta t) \\ e^{-j\beta t} &= \cos(\beta t) - j \sin(\beta t) \end{aligned} \quad (4.59)$$

$$\begin{aligned} x_{3(t)} &= e^{-\zeta t} \{c_1 [\cos(\omega_h t) + j \sin(\omega_h t)] + c_2 [\cos(\omega_h t) - j \sin(\omega_h t)]\} \\ x_{3(t)} &= e^{-\zeta t} \{[c_1 + c_2] \cos(\omega_h t) + j[c_1 - c_2] \sin(\omega_h t)\} \end{aligned} \quad (4.60)$$

Reduciendo las constantes $c_a = [c_1 + c_2]$ y $c_b = j[c_1 - c_2]$

$$x_{3(t)} = e^{-\zeta t} [c_a \cos(\omega_h t) + c_b \sin(\omega_h t)] \quad (4.61)$$

Por lo que la derivada de $x_{3(t)}$.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{3(t)} &= -\zeta e^{-\zeta t} [c_a \cos(\omega_h t) + c_b \sin(\omega_h t)] + e^{-\zeta t} [-c_a \omega_h \sin(\omega_h t) + c_b \omega_h \cos(\omega_h t)] \\ \dot{x}_{3(t)} &= e^{-\zeta t} [-c_a \zeta \cos(\omega_h t) - c_b \zeta \sin(\omega_h t) - c_a \omega_h \sin(\omega_h t) + c_b \omega_h \cos(\omega_h t)] \end{aligned} \quad (4.62)$$

Reordenando.

$$\dot{x}_{3(t)} = e^{-\zeta t} \{-c_a [\zeta \cos(\omega_h t) + \omega_h \sin(\omega_h t)] + c_b [\omega_h \cos(\omega_h t) - \zeta \sin(\omega_h t)]\} \quad (4.63)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{3(0)} \\ \dot{x}_{3(0)} \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} c_a & \\ -\zeta c_a & \omega_h c_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{x}_2^0 \end{pmatrix} \\ c_b &= \frac{\dot{x}_2^0}{\omega_h} \end{aligned} \quad (4.64)$$

Por lo que sustituyendo en $\dot{x}_{3(t)}$.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

66

$$\dot{x}_{3(t)} = e^{-\zeta t} \left\{ \frac{\dot{x}_2^0}{\omega_h} [\omega_h \cos(\omega_h t) - \zeta \sin(\omega_h t)] \right\} \quad (4.65)$$

Reordenando.

$$\begin{bmatrix} x_{3(t)} \\ \dot{x}_{3(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{x}_2^0}{\omega_h} e^{-\zeta t} \sin(\omega_h t) \\ \dot{x}_2^0 e^{-\zeta t} \left[\cos(\omega_h t) - \frac{\zeta}{\omega_h} \sin(\omega_h t) \right] \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

Obteniendo el primer tiempo de cambio.

$$t = t_3 \quad \dot{x}_{3(t_3)} = 0 \quad (4.67)$$

$$\begin{aligned} \cos(\omega_h t_3) - \frac{\zeta}{\omega_h} \sin(\omega_h t_3) &= 0 \\ \cos(\omega_h t_3) &= \frac{\zeta}{\omega_h} \sin(\omega_h t_3) \\ \frac{\omega_h}{\zeta} &= \frac{\sin(\omega_h t_3)}{\cos(\omega_h t_3)} \\ \frac{\omega_h}{\zeta} &= \tan(\omega_h t_3) \\ \arctan\left(\frac{\omega_h}{\zeta}\right) &= \omega_h t_3 \end{aligned} \quad (4.68)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega_h} \arctan\left(\frac{\omega_h}{\zeta}\right) \quad (4.69)$$

Para encontrar la condición inicial del siguiente instante $x_3^0 = x_{(t_3)}$

$$\begin{aligned} x_3^0 = x_{(t_3)} &= \frac{\dot{x}_2^0}{\omega_h} e^{-\zeta t} \sin \left\{ \omega_h \left[\frac{1}{\omega_h} \arctan \left(\frac{\omega_h}{\zeta} \right) \right] \right\} \\ x_3^0 &= \frac{\dot{x}_2^0}{\omega_h} e^{-\zeta t} \sin \left[\arctan \left(\frac{\omega_h}{\zeta} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.70)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

67

Haciendo un cambio de variable para facilitar la deducción.

$$\begin{aligned} y &= \arctan\left(\frac{\omega_h}{\zeta}\right) \\ \tan(y) &= \frac{\omega_h}{\zeta} \end{aligned} \quad (4.71)$$

Utilizando como apoyo el triángulo rectángulo de la Fig (??)

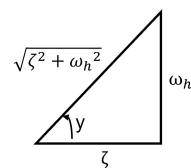


Figura 4.3: Triángulo rectángulo del tercer cambio de variable

$$\begin{aligned} \sin(y) &= \frac{\omega_h}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}} \\ x_3^0 &= \frac{\dot{x}_2^0}{\omega_h} e^{-\zeta t_3} \frac{\omega_h}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}} \\ x_3^0 &= \frac{\dot{x}_2^0}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}} e^{-\zeta t_3} \end{aligned} \quad (4.72)$$

$$\begin{aligned} x_3^0 &= \frac{\sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2}}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}} e^{-\zeta(t_1+t_2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_h^2}} e^{-\zeta t_3} \\ x_3^0 &= \frac{\sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2}}{\zeta^2 + \omega_h^2} e^{-\zeta(t_1+t_2+t_3)} \end{aligned} \quad (4.73)$$

Cuarto Cuadrante

En este punto la función signo tendrá como argumento un resultado negativo $\text{sgn}(x\dot{x}) = -1$. Reescribiendo la Ec (4.7).

$$\ddot{x}_4 + 2\zeta\dot{x}_4 + (1 - \epsilon)x_4 = 0 \quad (4.74)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

68

Para hacer la representación en el espacio de estados se puede expresar de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_4 \\ \ddot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(1-\epsilon) & -2\zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.75)$$

Para obtener la ecuación característica del sistema.

$$\lambda_{12} = \det \begin{bmatrix} -\lambda & 1 \\ -(1-\epsilon) & -2\zeta - \lambda \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{12} &= \lambda^2 + 2\zeta + (1-\epsilon) \\ \lambda_{12} &= -\zeta \pm \sqrt{(\zeta^2 - (1-\epsilon))} \end{aligned} \quad (4.77)$$

Para obtener una respuesta oscilatoria es necesario que $\zeta^2 - (1-\epsilon) < 0$ Por lo que $\lambda_{12} = -\zeta \pm j\omega_l$. Donde $\omega_l = \sqrt{-\zeta^2 + (1-\epsilon)}$

Por lo que podemos adecuar la siguiente respuesta homogénea.

$$x_{4(t)} = c_1 e^{(-\zeta + j\omega_l)t} + c_2 e^{(-\zeta - j\omega_l)t} \quad (4.78)$$

De acuerdo a la siguiente propiedad.

$$e^{a+b} = e^a + e^b \quad (4.79)$$

$$\begin{aligned} x_{4(t)} &= c_1 e^{j\omega_l t} e^{-\zeta t} + c_2 e^{-j\omega_l t} e^{-\zeta t} \\ x_{4(t)} &= e^{\zeta t} [c_1 e^{j\omega_l t} + c_2 e^{-j\omega_l t}] \end{aligned} \quad (4.80)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

69

Utilizando la siguiente propiedad.

$$\begin{aligned} e^{j\beta t} &= \cos(\beta t) + j \sin(\beta t) \\ e^{-j\beta t} &= \cos(\beta t) - j \sin(\beta t) \end{aligned} \quad (4.81)$$

$$\begin{aligned} x_{4(t)} &= e^{-\zeta t} \{c_1 [\cos(\omega_l t) + j \sin(\omega_l t)] + c_2 [\cos(\omega_l t) - j \sin(\omega_l t)]\} \\ x_{4(t)} &= e^{-\zeta t} \{[c_1 + c_2] \cos(\omega_l t) + j[c_1 - c_2] \sin(\omega_l t)\} \end{aligned} \quad (4.82)$$

Reduciendo las constantes $c_a = [c_1 + c_2]$ y $c_b = j[c_1 - c_2]$

$$x_{4(t)} = e^{-\zeta t} [c_a \cos(\omega_l t) + c_b \sin(\omega_l t)] \quad (4.83)$$

Por lo que la derivada de $x_{4(t)}$.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{4(t)} &= -\zeta e^{-\zeta t} [c_a \cos(\omega_l t) + c_b \sin(\omega_l t)] + e^{-\zeta t} [-c_a \omega_l \sin(\omega_l t) + c_b \omega_l \cos(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{4(t)} &= e^{-\zeta t} [-c_a \zeta \cos(\omega_l t) - c_b \zeta \sin(\omega_l t) - c_a \omega_l \sin(\omega_l t) + c_b \omega_l \cos(\omega_l t)] \end{aligned} \quad (4.84)$$

Reordenando.

$$\dot{x}_{4(t)} = e^{-\zeta t} \{-c_a [\zeta \cos(\omega_l t) + \omega_l \sin(\omega_l t)] + c_b [\omega_l \cos(\omega_l t) - \zeta \sin(\omega_l t)]\} \quad (4.85)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{4(0)} \\ \dot{x}_{4(0)} \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} c_a & \\ -\zeta c_a & \omega_l c_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_3^0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ c_b &= \frac{\zeta c_a}{\omega_l} \\ c_b &= \frac{x_3^0 \zeta}{\omega_l} \end{aligned} \quad (4.86)$$

Sustituyendo c_a y c_b .

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

70

$$\begin{aligned} x_{4(t)} &= e^{-\zeta t} \left[x_3^0 \cos(\omega_l t) + \frac{x_3^0 \zeta}{\omega_l} \sin(\omega_l t) \right] \\ x_{4(t)} &= \frac{x_3^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\omega_l \cos(\omega_l t) + \zeta \sin(\omega_l t)] \end{aligned} \quad (4.87)$$

Obteniendo su derivada.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{4(t)} &= \frac{x_3^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [-\omega_l^2 \sin(\omega_l t) + \zeta \omega_l \cos(\omega_l t)] - \frac{\zeta x_3^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\omega_l \cos(\omega_l t) + \zeta \sin(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{4(t)} &= \frac{x_3^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [-\omega_l^2 \sin(\omega_l t) + \zeta \omega_l \cos(\omega_l t) - \zeta \omega_l \cos(\omega_l t) - \zeta^2 \sin(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{4(t)} &= \frac{x_3^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [-\omega_l^2 \sin(\omega_l t) - \zeta^2 \sin(\omega_l t)] \\ \dot{x}_{4(t)} &= -\frac{x_3^0}{\omega_l} (\zeta^2 + \omega_l^2) e^{-\zeta t} \sin(\omega_l t) \end{aligned} \quad (4.88)$$

Reordenando

$$\begin{bmatrix} x_{4(t)} \\ \dot{x}_{4(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_3^0}{\omega_l} e^{-\zeta t} [\omega_l \cos(\omega_l t) + \zeta \sin(\omega_l t)] \\ -\frac{x_3^0}{\omega_l} (\zeta^2 + \omega_l^2) e^{-\zeta t} \sin(\omega_l t) \end{bmatrix} \quad (4.89)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

71

Obteniendo el cuarto tiempo de cambio.

$$\begin{aligned}
 t &= t_4 \\
 x_{4(t_4)} &= 0 \\
 \omega_l \cos(\omega_l t_4) + \zeta \sin(\omega_l t_4) &= 0 \\
 \omega_l \cos(\omega_l t_4) &= -\zeta \sin(\omega_l t_4) \\
 \frac{\omega_l}{-\zeta} &= \frac{\sin(\omega_l t_4)}{\cos(\omega_l t_4)} \\
 \frac{\omega_l}{-\zeta} &= \tan(\omega_l t_4) \\
 \arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) &= \omega_l t_4 \\
 t_4 &= \frac{1}{\omega_l} \arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right)
 \end{aligned} \tag{4.90}$$

$$t_4 = \frac{1}{\omega_l} \left[\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) + \pi \right] \tag{4.91}$$

Para encontrar la condición inicial del siguiente instante $\dot{x}_4^0 = \dot{x}_{4(t_4)}$.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_4^0 = \dot{x}_{4(t_4)} &= -\frac{x_3^0}{\omega_l} (\zeta^2 + \omega_l^2) e^{-\zeta t_4} \sin(\omega_l t_4) \\
 \dot{x}_4^0 = \dot{x}_{4(t_4)} &= -\frac{x_3^0}{\omega_l} (\zeta^2 + \omega_l^2) e^{-\zeta t_4} \sin \left\{ \omega_l \left[\frac{1}{\omega_l} \left[\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) + \pi \right] \right] \right\} \\
 \dot{x}_4^0 &= -\frac{x_3^0}{\omega_l} (\zeta^2 + \omega_l^2) e^{-\zeta t_4} \sin \left[\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) \right]
 \end{aligned} \tag{4.92}$$

Haciendo un cambio de variable para facilitar la deducción.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

72

$$\begin{aligned} y &= \arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) \\ \tan(y) &= \frac{\omega_l}{-\zeta} \end{aligned} \quad (4.93)$$

Utilizando como apoyo el triángulo rectángulo de la Fig (??)

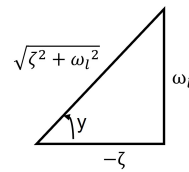


Figura 4.4: Triángulo rectángulo del cuarto cambio de variable

$$\begin{aligned} \sin(y) &= \frac{\omega_l}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2}} \\ \dot{x}_4^0 &= \frac{x_3^0}{\omega_l} (\zeta^2 + \omega_l^2) e^{-\zeta t_4} \frac{\omega_l}{\sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2}} \end{aligned} \quad (4.94)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4^0 &= x_3^0 \sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2} e^{-\zeta t_4} \\ \dot{x}_4^0 &= \frac{\sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2}}{\zeta^2 + \omega_h^2} e^{-\zeta(t_1+t_2+t_3)} \sqrt{\zeta^2 + \omega_l^2} e^{-\zeta t_4} \\ \dot{x}_4^0 &= \frac{\zeta^2 + \omega_l^2}{\zeta^2 + \omega_h^2} e^{-\zeta(t_1+t_2+t_3+t_4)} \end{aligned} \quad (4.95)$$

A partir del análisis, la función conmutada $\text{sgn}(x\dot{x})$ puede escribirse como la función periódica de $q_v(t)$.

$$q_v(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, t_1] \\ -1, & t \in [t_1, t_1 + t_2] \\ 1, & t \in [t_1 + t_2, t_1 + t_2 + t_3] \\ -1, & t \in [t_1 + t_2 + t_3, T] \end{cases} \quad (4.96)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

73

Donde el periodo T es la suma de todos los instantes $T = \sum_{i=1}^4 t_i$

$$\begin{aligned}
 T_{(\epsilon, \zeta)} &= t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \\
 T_{(\epsilon, \zeta)} &= \frac{1}{\omega_h} \arctan\left(\frac{\omega_h}{\zeta}\right) + \frac{1}{\omega_l} \left[\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) + \pi \right] \\
 &\quad + \frac{1}{\omega_h} \arctan\left(\frac{\omega_h}{\zeta}\right) + \frac{1}{\omega_l} \left[\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) + \pi \right] \\
 T_{(\epsilon, \zeta)} &= \frac{2}{\omega_h} \arctan\left(\frac{\omega_h}{\zeta}\right) + \frac{2}{\omega_l} \left[\arctan\left(\frac{\omega_l}{-\zeta}\right) + \pi \right]
 \end{aligned} \tag{4.97}$$

Donde $\omega_h = \sqrt{-\zeta^2 + (1 + \epsilon)}$ y $\omega_l = \sqrt{-\zeta^2 + (1 - \epsilon)}$.

4.2. Solución numérica

Siguiendo la técnica de decremento logarítmico detallada en la metodología y desarrollada más adelante en los resultados experimentales. Se determinaron los siguientes parámetros Tabla 4.1.

Parámetros del sistema			
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa controlada	m_c	0.35	kg
Masa del piso	m_t	0.5222	kg
Suma de masas en el piso superior	m	0.8722	kg
Rigidez de los muros	k	6.2	$\frac{N}{m}$
Viscosidad de los muros	b	0.11	$\frac{Ns}{m}$
Ganancia del controlador	k_c	0.15	$\frac{Np}{m}$

Tabla 4.1: Parámetros del sistema.

La solución numérica de x del sistema controlado para una señal impulso de $1m/s$ es graficada en la Fig (4.5) siguiendo la ley de control Ec. (3.8). Con una constante de rigidez controlada $k_c = 0.35$

Observando el plano fase de la velocidad y aceleración Fig. 4.6. Es más claro ver cómo de converge a cero con mayor rapidez que dejando el sistema en reposo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

74

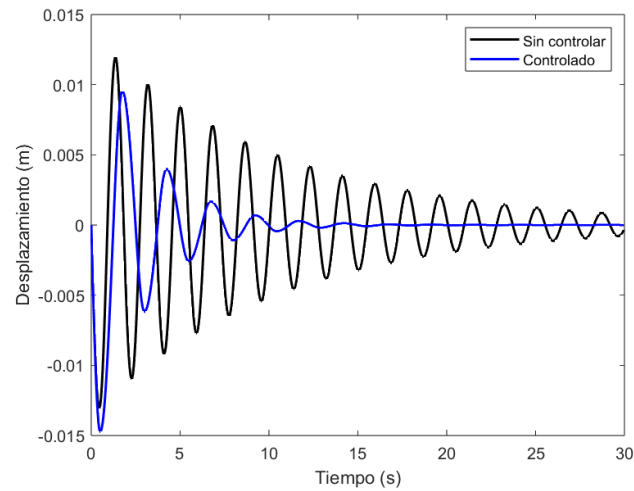


Figura 4.5: Respuesta simulada del controlador en Matlab o R2021b con la función ode45.

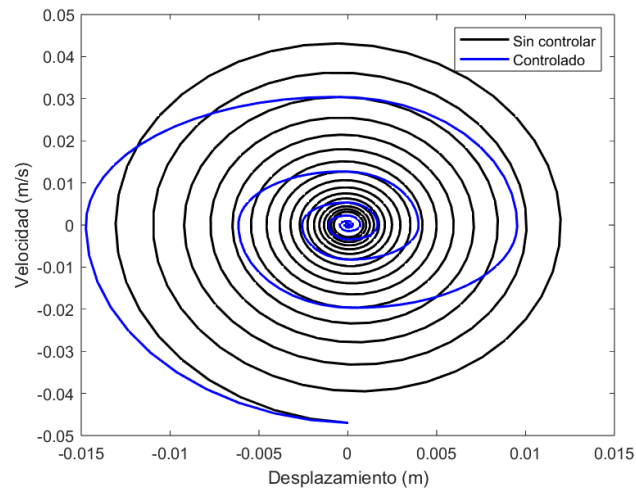


Figura 4.6: Diagrama de fase de la simulación controlada en Matlab.

4.3. Solución experimental

Las propiedades del sistema estructural son determinadas de siguiendo la técnica de decremento logarítmico detallada en la metodología. Para comenzar

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

75

es necesario acondicionar un experimento donde se va a instrumentar la posición del piso con respecto al tiempo. Para determinar la posición de la masa controlada se llevó a cabo una comparativa entre sensores comerciales. Entre los cuales, el sensor ultrasónico HC-SR04 destaca por su exactitud en un rango de 4 a 16 cm. Con una frecuencia de muestreo mayor a la del sensor SHARP 2Y0A21F88.

Comparativa de sensores comerciales			
Identificador	Frecuencia	Rango	Resolución
HC-SR04	20Hz	43cm	3mm
2Y0A21F88	18.87Hz	70cm	6.5mm

Tabla 4.2: Comparativa de sensores

Determinando los cuasi periodos τ , $\frac{\tau}{2}$ y $\frac{\tau}{4}$.

$$\frac{\tau}{2} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} (t_{i+1} - t_i) = 0.9836s \quad (4.98)$$

$$\frac{\tau}{4} = 0.4918s$$

Al completarse t_{26} se ha vuelto aceptable la oscilación de la estructura. De otra manera, este sería el límite de la función que se necesita amortiguar.

$$\forall t > t_{26}, |x(t)| \leq 0.01m \quad (4.99)$$

Teniendo $\frac{\tau}{4}$ es posible calcular λ y en consecuencia β de la curva exponencial que delimita la solución $x(t)$. También es correcto decir que la función $x(t)$ está limitada por la envolvente $y(t) = Ae^{-\lambda t}$, que sabemos tiene como $A = x_{(0)} = 0.07m$ y que $x_{(t_{26})} = 0$ fue el último tiempo para el cual el piso cruza por el equilibrio hasta tener una oscilación en margen aceptable.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

76

$$\begin{aligned} y(t_{26} + \frac{\tau}{4}) &= x(t_{26} + \frac{\tau}{4}) \\ y(t_{26} + \frac{\tau}{4}) &= x(18.48) = 0m \end{aligned} \quad (4.100)$$

A partir de la ecuación de la envolvente:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\ln |0.07| - \ln |0.01|}{18.48} \\ \lambda &= 0.1053 \end{aligned} \quad (4.101)$$

A partir de $\beta = 2m\lambda$ es posible determinar el coeficiente de amortiguamiento viscoso.

$$\begin{aligned} \beta &= 2m\lambda \\ \beta &= 2(0.5222)(0.1053) \\ \beta &= 0.11 \frac{Ns}{m} \end{aligned} \quad (4.102)$$

Con el coeficiente de amortiguamiento viscoso ya es posible crear la envolvente que limita la exponencial de la respuesta natural 4.7.

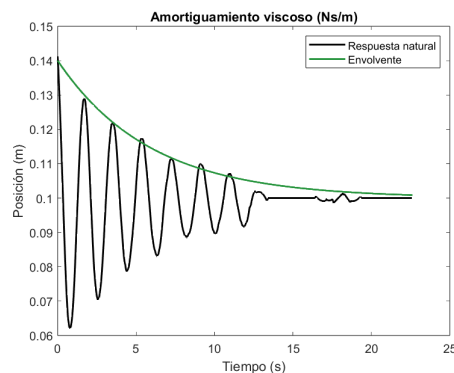


Figura 4.7: Envolvente de la respuesta natural del prototipo.

De manera gráfica es posible aproximar un valor de rigidez (Figura 4.8).

Al modelo experimental se le aplicó una vibración de 0.047m/s durante 0.4 segundos que de manera natural la estructura amortiguó hasta llegar a un criterio del 2 % en un tiempo de asentamiento t_s de 12.053 segundos. Por otra parte,

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

77

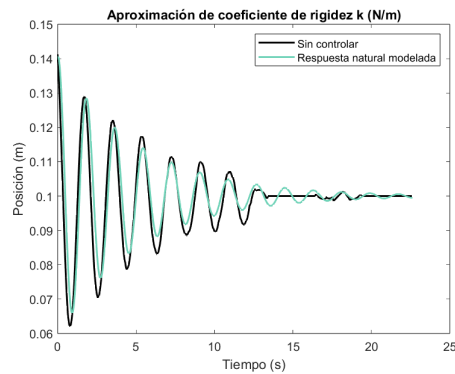


Figura 4.8: Respuestas natural (negra), respuesta natural modelada (cyan).

al aplicar el controlador se consigue llegar a un tiempo t_s de 9.086 segundos. Por consiguiente, se tiene una reducción del 25 % al tiempo de asentamiento que se consigue en la respuesta natural. En la Figura 4.9 de manera simultánea también se observa la señal aplicada al controlador del motor a pasos.

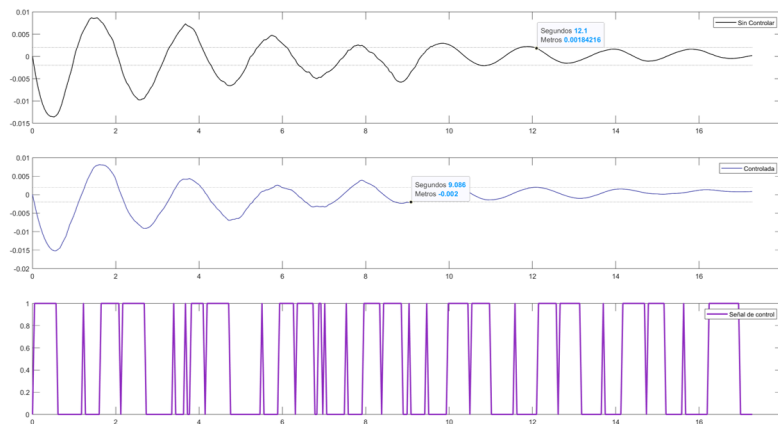


Figura 4.9: a) Respuesta natural b) Respuesta controlada c) Señal de control.

En cuanto a la publicación de los datos en formato JSON pueden ser observados en la base de datos de Firebase (Figura 4.10). Por otra parte, la notificación con histórico adjunto se presenta en la Figura 4.11.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

78

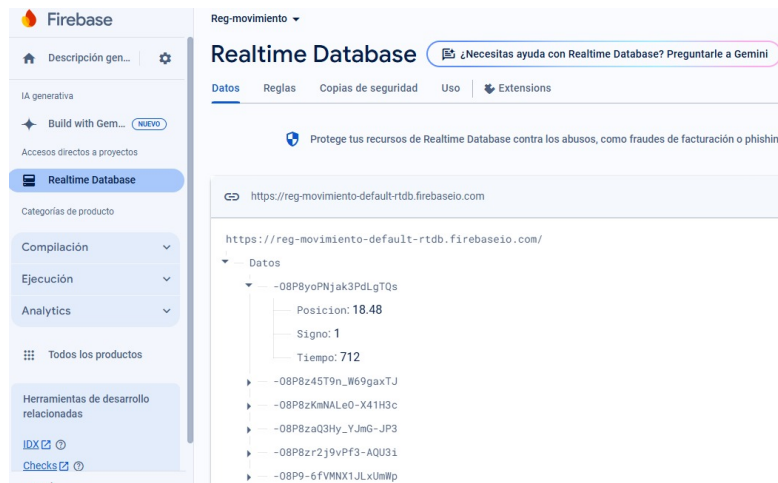


Figura 4.10: Verificación de envío por HTTP a base de datos Firebase.

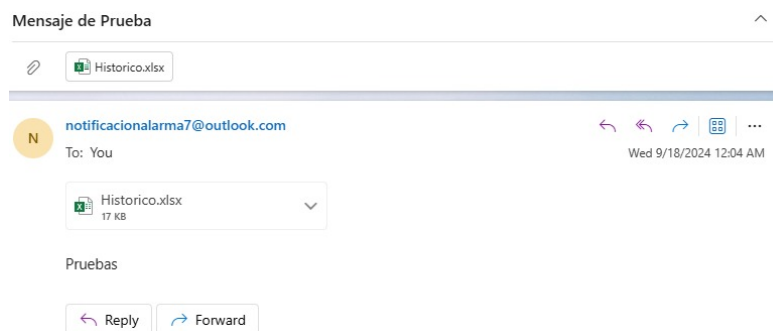


Figura 4.11: Correo de prueba mediante protocolo SMTP.

Conclusiones y trabajo futuro

En conclusión este trabajo ha planteado una propuesta de AMD que reduce el tiempo de asentamiento en 25 % con respecto a la respuesta natural bajo un criterio de 2 %. Teniendo como característica principal su ley de control conmutada que es distinta a lo cotidiano que sería amortiguar armónicamente. Se estableció el enfoque del trabajo como prototipo con el fin de comprobar que la ley funcione con resultados positivos, y a su vez desarrollar una interfaz que haga buena sintonía para un entorno IoT. Puesto que, utiliza el formato JSON para los paquetes de datos y provee al usuario un correo con archivo histórico adjunto. Se espera que el prototipo de pie a controladores de mayor capacidad en el ámbito de las ciudades inteligentes.

Bibliografía

- [1] J. E. Daniell, “The worldwide economic impact of historic earthquakes,” *WCEE*, 2012.
- [2] J. E. Daniell, “The cost of historic earthquakes today – economic analysis since 1900 through the use of catdat,” *Australian Earthquake Engineering Society*, 2010.
- [3] J.-C. Chen, “Response of large space structures with stiffness control,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 21, pp. 463–467, 9 1984.
- [4] J. Jia, “Characterize ground motions,” 2017.
- [5] F. Pezzella, “Who designed the first anti-seismic house? a lesson from history,” 2 2021.
- [6] A. Ramaratnam and N. Jalili, “A switched stiffness approach for structural vibration control: theory and real-time implementation,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 291, pp. 258–274, 3 2006.
- [7] D. Gomez and J. Marulanda, “Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas,” *Universidad del Valle*, 12 2007.

BIBLIOGRAFÍA

81

- [8] O. Weis, “Cómo leer datos de un puerto serie: Guía completa para windows,” 11 2024.
- [9] J. Postel, “Simple mail transfer protocol,” 8 1982.
- [10] C. Zhang, H. Li, W. Gao, and C. Li, “Experimental and analytical investigations on new viscoelastic damped joints for seismic mitigation of structures with precast shear walls,” *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 27, 2 2020.
- [11] G. W. Housner, L. A. Bergman, T. K. Caughey, A. G. Chassiakos, R. O. Claus, S. F. Masri, R. E. Skelton, T. T. Soong, B. F. Spencer, and J. T. P. Yao, “Structural control: Past, present, and future,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, pp. 897–971, 9 1997.
- [12] W. Harris, “10 technologies that help buildings resist earthquakes,” 9 2013.
- [13] F. Yi, “Seismic response control using smart dampers,” in *Seismic response control using smart dampers*, pp. 1022–1026 vol.2, IEEE, 1999.
- [14] F. Ricciardelli, A. Pizzimenti, and M. Mattei, “Passive and active mass damper control of the response of tall buildings to wind gustiness,” *Engineering Structures*, vol. 25, pp. 1199–1209, 7 2003.
- [15] K. Scharer and A. Streig, “The san andreas fault system: Complexities along a major transform fault system and relation to earthquake hazards,” *Transform Plate Boundaries and Fracture Zones*, pp. 249–269, 2019.
- [16] B. Tang, Q. Chen, X. Chen, D. Glik, X. Liu, Y. Liu, and L. Zhang, “Earthquake-related injuries among survivors: A systematic review and quantitative synthesis of the literature,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 21, pp. 159–167, 3 2017.

BIBLIOGRAFÍA

82

- [17] M. A. Richter, M. Hagenmaier, O. Bandte, V. Parida, and J. Wincent, "Smart cities, urban mobility and autonomous vehicles: How different cities needs different sustainable investment strategies," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 184, p. 121857, 11 2022.
- [18] W. Xu, Y. Wang, H. Guo, D. Du, and S. Wang, "Theoretical and experimental investigation on the seismic performance of a novel variable-damping viscous fluid damper," *Journal of Building Engineering*, vol. 53, p. 104537, 8 2022.
- [19] J. Onoda, T. Endo, H. Tamaoki, and N. Watanabe, "Vibration suppression by variable-stiffness members," *AIAA Journal*, vol. 29, pp. 977–983, 6 1991.
- [20] F. J. James E. Bobrow and K. Thai, "A new approach to shock isolation and vibration suppression using a resetable actuator1," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 122, pp. 570–573, 9 2000.
- [21] J. Leavitt, F. Jabbari, and J. E. Bobrow, "Optimal performance of variable stiffness devices for structural control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 129, pp. 171–177, 3 2007.
- [22] D. Ledezma-Ramirez, N. Ferguson, and M. Brennan, "An experimental switchable stiffness device for shock isolation," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 331, pp. 4987–5001, 11 2012.
- [23] R. Ayala and L. Moreno-Ahedo, "Active damping for vibration control based on the switched stiffness technique," *Journal of Vibroengineering*, vol. 23, pp. 891–907, 6 2021.
- [24] D. Hrovat, P. Barak, and M. Rabins, "Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 109, pp. 691–705, 8 1983.

BIBLIOGRAFÍA

83

- [25] R. Guclu and H. Yazici, "Vibration control of a structure with atmd against earthquake using fuzzy logic controllers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 318, pp. 36–49, 11 2008.
- [26] Quanser, "Active mass damper - one floor (amd-2) user manual," *Quanser Innovte, Educate*.
- [27] M. A. Şen, M. Tinkir, and M. Kalyoncu, "Optimisation of a pid controller for a two-floor structure under earthquake excitation based on the bees algorithm," *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 37, pp. 107–127, 3 2018.
- [28] J. Feng, Z. Liu, X. He, Q. Fu, and G. Li, "Adaptive vibration control for an active mass damper of a high-rise building," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 52, pp. 1970–1983, 3 2022.
- [29] A. Magdaleno, E. Pereira, P. Reynolds, and A. Lorenzana, "A common framework for tuned and active mass dampers: Application to a two-storey building model," *Experimental Techniques*, vol. 45, pp. 661–671, 10 2021.
- [30] J. Vidal, "¿que es la escala de magnitud richter?," *CICESE*, pp. 1–7, 1 2013.
- [31] D. Cline, *Variational Principles in Classical Mechanics*. LibreTexts, 9 2023.
- [32] W. Mendoza, "Frecuencias y periodos predominantes de sismos registrados en la ciudad de tacna, mediante análisis y espectro de fourier," *Ingeniería Investiga*, pp. 1–16, 6 2020.
- [33] Ömer Aydan, *Earthquake Science and Engineering*. CRC Press, 5 2022.
- [34] B. A. Bolt, *Inside the earth : evidence from earthquakes*. San Francisco W. H. Freeman, 1982.
- [35] L. Braile, "Seismic wave demonstrations and animations," 2 2010.

BIBLIOGRAFÍA

84

- [36] P. Kielczynski, *Properties and Applications of Love Surface Waves in Seismology and Biosensors*. InTech, 5 2018.
- [37] “Surface waves,” 2023.
- [38] D. N. P. Rao, “Earthquakes,” *Andhra Pradesh Akademi of Sciences*, pp. 1–36, 1 2016.
- [39] S. Rajasekaran, *Introduction to dynamics*. Elsevier, 2009.
- [40] B. Addis, *Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction*. Phaidon, 2007.
- [41] BETA, “Structural vibration and ways to avoid it,” 2023.
- [42] A. A. Sabana, *Theory of Vibration*. Springer, 3 ed., 2019.
- [43] F. Naeim and J. M. Kelly, *Design of Seismic Isolated Structures*. John Wiley and Sons, Inc., 1999.
- [44] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Pearson, 5 ed., 8 2009.
- [45] J. Hespanha, *Linear Systems Theory*. Princeton University Press, 2009.
- [46] M. W. Hirsch, S. Smale, and R. L. Devaney, *First Order Equations, Dynamical Systems, and an Introduction to Chaos*. Elsevier, 2013.
- [47] C. Y. Franklin, *Smart Structures*. CRC, 2008.
- [48] C. Chagoyen and G. Medina, “Influencia de la masa, la rigidez y el amortiguamiento en la dinámica de amortiguadores de masa sintonizados,” *Centro Azúcar*, vol. 50, 9 2023.
- [49] J.-P. Ou, B. Wu, and T. Soong, “Performance comparison of passive energy dissipation systems in structural applications – i: Linear reference system,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 1, pp. 237–259, 10 1998.

BIBLIOGRAFÍA

85

- [50] J. Carvill, *Mechanical Engineer's Data Handbook*. Elsevier, 1993.
- [51] J. Yang, Y. Kwon, and D. Kim, "Regional smart city development focus: The south korean national strategic smart city program," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7193–7210, 2021.
- [52] A. Benavent-Climent, D. Escolano-Margarit, J. Arcos-Espada, and H. Ponce-Parra, "New metallic damper with multiphase behavior for seismic protection of structures," *Metals*, vol. 11, p. 183, 1 2021.
- [53] T. Konar and A. D. Ghosh, "Flow damping devices in tuned liquid damper for structural vibration control: A review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, pp. 2195–2207, 6 2021.
- [54] Y. Xiang, P. Tan, H. He, H. Yao, and X. Zheng, "Pendulum tuned mass damper (ptmd) with geometric nonlinear dampers for seismic response control," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 570, p. 118023, 2 2024.
- [55] F. Yang, R. Sedaghati, and E. Esmailzadeh, "Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review," *Journal of Vibration and Control*, vol. 28, pp. 812–836, 4 2022.
- [56] M. G. Soto and H. Adeli, "Tuned mass dampers," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 20, pp. 419–431, 12 2013.
- [57] D. Ledezma-Ramirez, N. Ferguson, and M. Brennan, "Shock isolation using an isolator with switchable stiffness," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, pp. 868–882, 2 2011.
- [58] C. J. GOH and T. K. CAUGHEY, "A quasi-linear vibration suppression technique for large space structures via stiffness modification," *International Journal of Control*, vol. 41, pp. 803–812, 3 1985.

BIBLIOGRAFÍA

86

- [59] C. Chang, “Mass dampers and their optimal designs for building vibration control,” *Engineering Structures*, vol. 21, pp. 454–463, 5 1999.
- [60] S. Li, L. D. Xu, and S. Zhao, “The internet of things: a survey,” *Information Systems Frontiers*, vol. 17, pp. 243–259, 4 2015.
- [61] B. Dorsemayne, J.-P. Gaulier, J. P. Wary, N. Kheir, and P. Urien, “Internet of things: A definition and taxonomy,” pp. 72–77, IEEE, 9 2015.
- [62] L. Mainetti, L. Patrono, and A. Vilei, “Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things: A survey,” in *SoftCOM 2011, 19th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, pp. 1–6, 2011.
- [63] R. P. L. Buse and W. Weimer, “Synthesizing api usage examples,” in *2012 34th International Conference on Software Engineering (ICSE)*, pp. 782–792, 2012.
- [64] B. J. Jansen, “The graphical user interface,” *ACM SIGCHI Bulletin*, vol. 30, pp. 22–26, 4 1998.
- [65] R. Dameri, “Searching for smart city definition: a comprehensive proposal,” *International Journal of Computers and Technology*, vol. 11, pp. 2544–2551, 10 2013.
- [66] R. Ernst, “Codesign of embedded systems: status and trends,” *IEEE Design and Test of Computers*, vol. 15, pp. 45–54, 1998.
- [67] T. A. Henzinger and J. Sifakis, “The embedded systems design challenge,” in *FM 2006: Formal Methods* (J. Misra, T. Nipkow, and E. Sekerinski, eds.), (Berlin, Heidelberg), pp. 1–15, Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [68] A. Devices, “Fundamentals of rs-232 serial communications,” 3 2001.

BIBLIOGRAFÍA

87

- [69] F. Pezoa, J. L. Reutter, F. Suarez, M. Ugarte, and D. Vrgoč, “Foundations of json schema,” pp. 263–273, *International World Wide Web Conferences Steering Committee*, 4 2016.
- [70] Z. ul Haq, G. F. Khan, and T. Hussain, “A comprehensive analysis of xml and json web technologies,” 2015.
- [71] T. Berners, “Hypertext transfer protocol – http/1.0,” 5 1996.
- [72] M. Gien, “A file transfer protocol (ftp),” *Computer Networks (1976)*, vol. 2, pp. 312–319, 9 1978.
- [73] J. E. Escalante, “Análisis del coeficiente de amortiguamiento viscoso en un sistema masa-resorte-amortiguador utilizando pplane y geogebra,” *Universidad Veracruzana*, 2016.
- [74] INIFED, *Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones*, vol. 4. 2014.
- [75] E. Freaks, “Ultrasonic ranging module hc-sr04.”
- [76] Leadshine, “Dm542,” 2012.
- [77] Schneider, “Nema 17.”
- [78] R. Fielding, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, L. Masinter, P. Leach, and T. Berners-Lee, “Hypertext transfer protocol – http/1.1,” 6 1999.