

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Generales . . . . .	2
1.2.2. Específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	3
1.4. Estructuración del trabajo de título . . . . .	3
<b>2. Modelos matemáticos para el análisis dinámico de estructuras</b>	<b>4</b>
2.1. Modelo de edificio lineal . . . . .	4
2.2. Modelo de histéresis bilineal . . . . .	5
2.3. Modelo de histéresis Bouc-Wen . . . . .	6
2.4. Modelo de histéresis Bouc-Wen con Pinching . . . . .	8
2.5. Fuerzas de impacto . . . . .	10
2.6. Disipador viscoso . . . . .	12
2.7. Disipador friccional . . . . .	13
<b>3. Librerías para el análisis dinámico de estructuras: implementación y validación</b>	<b>15</b>
3.1. Modelo de edificio lineal . . . . .	15
3.2. Modelo de histéresis bilineal . . . . .	18
3.3. Modelo de histéresis Bouc-Wen . . . . .	22
3.4. Modelo de histéresis Bouc-Wen con Pinching . . . . .	25
3.5. Fuerzas de impacto . . . . .	28
3.6. Disipador viscoso . . . . .	29
3.7. Disipador friccional . . . . .	31
3.8. Tutorial de implementación . . . . .	33
3.8.1. Implementación de un disipador viscoso . . . . .	33
3.8.2. Implementación de fuerzas restitutivas en un edificio . . . . .	35
<b>4. Potencialidad del uso de librerías modulares para el análisis dinámico de estructuras</b>	<b>37</b>
4.1. Respuesta sísmica de un edificio con aislación . . . . .	37
4.1.1. Descripción del modelo . . . . .	38
4.1.2. Análisis de los resultados . . . . .	40
4.2. Respuesta sísmica de un puente con aislación . . . . .	47

4.2.1. Descripción del modelo . . . . .	47
4.2.2. Análisis de los resultados . . . . .	50
4.3. Sintonización de modelos histeréticos . . . . .	53
4.4. Estudio de vulnerabilidad . . . . .	60
<b>5. Conclusiones</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>69</b>
<b>Anexos</b>	<b>72</b>
<b>A. Cómo utilizar Simulink</b>	<b>73</b>
A.1. Creación de un modelo . . . . .	74
A.2. Funciones definidas por el usuario . . . . .	84
A.3. Correr simulaciones . . . . .	85
A.4. Detallamiento de los elementos de la librería . . . . .	87
A.4.1. Modelo de edificio lineal . . . . .	87
A.4.2. Modelo de histéresis bilineal . . . . .	87
A.4.3. Modelo de histéresis Bouc-Wen . . . . .	88
A.4.4. Modelo de histéresis Bouc-Wen con Pinching . . . . .	89
A.4.5. Fuerzas de Impacto . . . . .	90
A.4.6. Disipador viscoso y friccional . . . . .	91
<b>B. Códigos en Matlab</b>	<b>92</b>
B.1. Implementación de un disipador viscoso . . . . .	92
B.2. Implementación de fuerzas restitutivas en un edificio . . . . .	94
<b>C. Inferencia bayesiana</b>	<b>98</b>
C.1. Análisis bayesiano . . . . .	98
C.1.1. Extensión análisis bayesiano . . . . .	99

# Índice de Tablas

2.1. Parámetros sugeridos por Carr (2008b) para el modelo de Bouc-Wen. . . . .	8
2.2. Parámetros sugeridos por Ma et al. (2004) para el modelo de Bouc-Wen con pinching. . . . .	9
3.1. Descripción de los parámetros necesarios para el módulo en Simulink del modelo de edificio lineal. . . . .	15
3.2. Descripción de los parámetros necesarios para el módulo en Simulink del modelo de histéresis bilineal . . . . .	18
3.3. Descripción de los parámetros necesarios para el módulo en Simulink del modelo de histéresis Bouc-wen . . . . .	22
3.4. Parámetros utilizado en la validación del modelo: Bouc-Wen . . . . .	23
3.5. Descripción de los parámetros necesarios para el módulo de Simulink del modelo de histéresis Bouc-Wen extendido. . . . .	25
3.6. Descripción de los parámetros necesarios para el módulo de Simulink del modelo de fuerzas de impacto . . . . .	28
3.7. Parámetros utilizados en la validación del modelo: fuerzas de impacto. . . . .	28
4.1. Parámetros utilizados para el aislador (modelo Bouc-wen) en la base del edificio	39
4.2. Masa de los diferentes elementos que componen el sistema de la Figura 4.15.	49
4.3. Parámetros del Bouc-Wen utilizados para los aisladores en la base del puente.	49
4.4. Condiciones iniciales para el inicio de la iteraciones en la inferencia bayesiana.	55
4.5. Límites utilizados para la estabilidad del modelo Bouc-Wen. . . . .	55
4.6. Parámetros óptimos y gradientes del ajuste bayesiano a una histéresis de alta fidelidad. . . . .	56

# Índice de Ilustraciones

2.1. Estructura de varios grados de libertad. Imagen adaptada de Chopra (2001) con cambio de variables. . . . .	4
2.2. Histéresis bilineal. Se presenta la composición a través de un resorte lineal y una curva elasto-plástica perfecta. . . . .	6
2.3. Sensibilidad de los modelos acorde a los parámetros utilizados. Imagen proporcionada por Wen (1976). . . . .	7
2.4. Idealización del choque de dos cuerpos con distintas propiedades. Fuente: Muthukumar and DesRoches (2006). . . . .	11
2.5. Varios modelos de la relación fuerza-desplazamiento para las fuerzas de impacto. (a)Resorte lineal; (b) Modelo de Kelvin; (c) Resorte no lineal de Hertz; (d) Modelo de Hertzdamp. Fuente: Muthukumar and DesRoches (2006). . . . .	11
2.6. Representación de un disipador viscoso. Fuente: Ras and Boumechra (2016). . . . .	12
2.7. Comportamiento de un disipador viscoso. (a) Curva fuerza-desplazamiento; (b) Curva fuerza-velocidad. . . . .	12
2.8. Curva fuerza-desplazamiento de un disipador friccional. . . . .	13
2.9. Representación de una disipador friccional uniaxial. Fuente: Aiken and Kelly (1990). . . . .	14
3.1. Módulo en Simulink para el modelo de edificio lineal. . . . .	16
3.2. Registro de aceleración del sismo de Constitución del 27 de febrero del 2010. . . . .	16
3.3. Comparación de respuestas en un grado de libertad ante el sismo de Constitución del 27 de febrero del 2010 con distintos métodos numéricos. . . . .	17
3.4. Comparación de respuestas en el piso 15 ante el sismo de Constitución del 27 de febrero del 2010 con distintos métodos numéricos. . . . .	17
3.5. Módulo en Simulink para el modelo de histéresis bilineal. . . . .	18
3.6. Representación de un grado de libertad con histéresis bilineal en la columna. . . . .	19
3.7. Excitación armónica incremental. . . . .	19
3.8. Respuesta frente al sismo de Constitución del 27 de febrero del 2010 con modelo de histéresis bilineal. (a) Comparación de desplazamientos; (b) Comparación de las histéresis generadas . . . . .	20
3.9. Respuesta frente a una excitación armónica incremental con modelo de histéresis bilineal. (a) Comparación de desplazamientos; (b) Comparación de las histéresis generadas . . . . .	21
3.10. Módulo en Simulink para el modelo de histéresis Bouc-Wen. . . . .	22
3.11. Respuesta frente al sismo de Constitución del 27 de febrero del 2010 con modelo de histéresis Bouc-Wen. Comparación de: (a) desplazamientos; (b) histéresis. . . . .	23

3.12.	Respuesta frente a una excitación armónica incremental con modelo de histéresis Bouc-Wen. Comparación de: (a) desplazamientos; (b) histéresis. . . . .	24
3.13.	Módulo en Simulink para el modelo de histéresis Bouc-Wen extendido (considerando pinching y degradación). . . . .	25
3.14.	Comparación de respuestas para el caso con sistema elastoplástico perfecto. (a) Artículo de Goda et al. (2015). (b) Respuesta con el módulo de Simulink para Bouc-wen con pinching. . . . .	26
3.15.	Comparación de respuestas para el caso con sistema bilineal con pendiente suave. (a) Artículo de Goda et al. (2015). (b) Respuesta con el módulo de Simulink para Bouc-wen con pinching. . . . .	26
3.16.	Comparación de respuestas para el caso de sistema con degradación. (a) Artículo de Goda et al. (2015). (b) Respuesta con el módulo de Simulink para Bouc-wen con pinching. . . . .	27
3.17.	Comparación de respuestas para el sistema con degradación y pinching. (a) Artículo de Goda et al. (2015). (b) Respuesta con el módulo de Simulink para Bouc-wen con pinching. . . . .	27
3.18.	Módulo en Simulink para el modelo de fuerzas de impacto. . . . .	28
3.19.	Comparación de respuesta entre Ruaumoko y el módulo de Simulink para fuerzas de impacto. . . . .	29
3.20.	Módulo en Simulink para el modelo de disipador viscoso. . . . .	29
3.21.	Configuración del disipador viscoso en un grado de libertad. . . . .	30
3.22.	Comparación de respuestas obtenidas en Ruaumoko y en Simulink para el disipador viscoso. . . . .	30
3.23.	Comparación de respuestas con modelo numérico newmark y el módulo de Simulink para disipador friccional. (a) Comparación de histéresis; (b) Comparación de desplazamientos. . . . .	31
3.24.	Librería implementada en Simulink de los distintos elementos y sistemas comúnmente utilizados en el control de vibraciones de estructuras. . . . .	32
3.25.	Diagrama en Simulink para la determinación de la respuestas de un grado de libertad con un disipador viscoso. . . . .	34
3.26.	Comportamiento del disipador viscoso y respuesta en desplazamiento del sistema. . . . .	34
3.27.	Diagrama en Simulink para la determinación de la respuestas de un edificio lineal con fuerzas restitutivas bilineales. . . . .	35
3.28.	Comportamiento histerético de la columna del primer piso y respuesta en desplazamiento del primer piso. . . . .	36
4.1.	Estructura con base aislada e ilustraciones con varias características del modelo. Fuente: Taflanidis and Jia (2011). . . . .	38
4.2.	Típico edificio de 3 pisos con marcos resistentes a momento. Fuente: Ohtori et al. (2004). . . . .	39
4.3.	Desplazamientos en cada uno de los pisos de la superestructura. . . . .	41
4.4.	Deriva entre pisos de la superestructura. . . . .	41
4.5.	Desplazamiento de la base. . . . .	42
4.6.	Histéresis de los topes sísmicos. . . . .	42
4.7.	Histéresis de los aisladores de la base. . . . .	43
4.8.	Histéresis de los disipadores viscosos de la base. . . . .	43

4.9. Comparación de derivas en el piso 3 para una estructura con y sin aisladores en la base. . . . .	44
4.10. Deriva entre pisos de la superestructura (segundo caso). . . . .	45
4.11. Desplazamiento de la base (segundo caso). . . . .	45
4.12. Histéresis de los topes sísmicos (segundo caso). . . . .	46
4.13. Comparación de derivas en el piso 3 para una estructura con y sin aisladores en la base (segundo caso). . . . .	46
4.14. Puente con dos losas con base aislada. Fuente: Taflanidis (2011). . . . .	47
4.15. Modelo esquemático de un puente aislado en la base con dos losas. Fuente: Taflanidis (2011). . . . .	48
4.16. Desplazamiento de los distintos elementos que componen el puente. (a) Estribo izquierdo; (b) Losa izquierda; (c) Losa derecha; (d) Estribo derecho; (e) Columna central . . . . .	50
4.17. Respuesta de las distintas componentes del puente. (a) Fuerza-desplazamiento de la columna central; (b) Histéresis del aislador derecho de la losa izquierda; (c) Histéresis del tope central; (d) Fuerza-velocidad del disipador viscoso dispuesto en la losa derecha. . . . .	51
4.18. Respuesta no lineal de algunos componente para el segundo caso. (a) Tope lado derecho; (b) Aislador derecho de la losa izquierda; (c) Curva fuerza-desplazamiento de la columna central. . . . .	52
4.19. Propiedades geométricas de los elementos que componen la conexión. (a) Perfil caja (columna). (b) Perfil doble T (viga). . . . .	53
4.20. Configuración de la conexión. (a) Representación de las condiciones geométricas para el análisis de la conexión. (b) Elementos finitos de la conexión. Fuente (b): Nuñez (2016) . . . . .	54
4.21. Histéresis de alta fidelidad obtenida de ANSYS. . . . .	54
4.22. Comparación de la histéresis ajustada con inferencia bayesiana y la histéresis de alta fidelidad obtenida con un modelo de elementos finitos en ANSYS. . . . .	55
4.23. Comparación de las fuerzas y energías disipadas entre la histéresis ajustada y la histéresis de alta fidelidad. . . . .	56
4.24. Registro de desplazamiento del sismo ocurrido en Constitución el 27 de febrero del 2010. . . . .	57
4.25. Comparación de las histéresis modeladas en Simulink y ANSYS. . . . .	58
4.26. Comparación de las fuerzas obtenidas en la conexión. . . . .	58
4.27. Comparación de las energías disipadas por la conexión. . . . .	59
4.28. Modelamiento de una estructura de 2 pisos (3 gdl) incluyendo el comportamiento de la conexión. . . . .	61
4.29. Deriva en cada uno de los pisos del marco modelado. . . . .	62
4.30. Histéresis de una de las conexiones y la energía liberada por ambos en el tiempo. . . . .	62
4.31. Relación de magnitud y distancia epicentral de los 710 sismos utilizados. . . . .	63
4.32. Curvas de incertidumbre para la deriva del piso 1. . . . .	64
4.33. Curvas de incertidumbre para la deriva del piso 2. . . . .	64
4.34. Curvas de incertidumbre para la aceleración del piso 1. . . . .	65
4.35. Curvas de incertidumbre para la aceleración del piso 2. . . . .	65
4.36. Curvas de incertidumbre para la energía histerética de una de las conexiones. . . . .	66
A.1. Interfaz de Simulink. . . . .	73

A.2. Librerías de Simulink. . . . .	74
A.3. Suma en Simulink. . . . .	75
A.4. Multiplicación en Simulink. . . . .	76
A.5. Multiplicación de señales en Simulink. . . . .	76
A.6. Bloque de integración. . . . .	77
A.7. Bloque de funciones matemáticas. . . . .	78
A.8. Bloque de saturación. . . . .	78
A.9. Bloque de memoria. . . . .	79
A.10. Bloque para combinar señales. . . . .	79
A.11. Bloque para importar datos a Simulink desde el workspace. . . . .	80
A.12. Bloque para exportar datos de Simulink al workspace. . . . .	81
A.13. Bloque de importación o exportación de datos en un subsistema. . . . .	82
A.14. creación de un subsistema. . . . .	83
A.15. Funciones definidas por el usuario. Simulink. . . . .	84
A.16. Selección de los parámetros de simulación. . . . .	85
A.17. Modelo de edificio lineal en Simulink. . . . .	87
A.18. Modelo de histéresis bilineal en Simulink. . . . .	87
A.19. Modelo de histéresis Bouc-Wen en Simulink. . . . .	88
A.20. Subsistema B del modelo de Bouc-Wen de la Figura A.19. . . . .	88
A.21. Modelo de histéresis Bouc-Wen con Pinching en Simulink. . . . .	89
A.22. Subsistema epsilon_n del modelo de Bouc-wen con Pinching de la Figura A.21. . . . .	89
A.23. Subsistema h del modelo de Bouc-wen con Pinching de la Figura A.21. . . . .	89
A.24. Subsistema uzpunto del modelo de Bouc-wen con Pinching de la Figura A.21. . . . .	90
A.25. Modelo de fuerzas de impacto en Simulink. . . . .	90
A.26. Modelo de disipador viscoso en Simulink. . . . .	91