



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE DISIPADORES DE ANILLOS FRICCIONALES PARA PROTECCIÓN SÍSMICA DE EQUIPOS SENSIBLES A ACELERACIONES

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

FERNANDO ESTEBAN RUIZ SIEBALD

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO RETAMALES SAAVEDRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
CLAUDIO SEPÚLVEDA CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO
DE: Ingeniero Civil y Grado de Magíster en Ciencias
de la Ingeniería, Mención Ingeniería Estructural,
Sísmica y Geotécnica
POR: FERNANDO RUIZ S.
FECHA: ENERO 2019
PROF. GUÍA: RODRIGO RETAMALES S.

METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE DISIPADORES DE ANILLOS FRICCIONALES PARA PROTECCIÓN SÍSMICA DE EQUIPOS SENSIBLES A ACELERACIONES

Tras el terremoto magnitud M_w 8.8 del 27 de febrero de 2010, que afectó a la zona centro-sur de Chile, solo en la industria del país se generaron pérdidas económicas en un rango de \$6 a \$7 billones debido a daños de componentes y sistemas no estructurales, lo que corresponde aproximadamente al 20% de las pérdidas directas derivadas del terremoto. Dentro de los componentes que más recurrentemente presentaron daños se encuentran los tanques, silos de metal y generadores eléctricos de emergencia.

No solo la industria sufrió pérdidas económicas, de 130 hospitales ubicados en la zona afectada por el terremoto, el 62% tuvo daños en elementos no-estructurales, donde el 83% perdió total o parcialmente su capacidad de funcionamiento, aun cuando no presentaron daños estructurales. Es por ello, que este trabajo busca identificar los límites de las mejoras posibles en el desempeño sísmico de equipos eléctricos y mecánicos al incorporar disipadores de energía de anillos friccionales, dispuestos en forma vertical en los puntos de apoyo de los equipos. Para ello se efectúa un análisis paramétrico variando las propiedades físicas de los elementos no estructurales, tales como la frecuencia fundamental de vibrar y la esbeltez.

Los resultados son obtenidos utilizando la metodología de selección de disipadores de anillos friccionales desarrollada como parte de este trabajo, la cual se caracteriza por la implementación de algoritmos genéticos para determinar las propiedades de los disipadores que permiten alcanzar la máxima reducción posible de la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño de los equipos.

El estudio efectuado permite concluir que los disipadores de energía de anillos friccionales no son adecuados para proteger sísmicamente equipos flexibles con frecuencias fundamentales menores a 4 [Hz] y su óptima implementación es en equipos donde la relación entre su altura al centro de masa y la distancia promedio entre los apoyos es cercana a 1.5. No obstante, es factible obtener reducciones en la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño de los equipos superiores al 50% independientemente de la relación de esbeltez del equipo, por lo que el uso de estos disipadores no está limitado solo a equipos esbeltos.

*Mis sinceros agradecimientos
a Camila por su apoyo incondicional y contagiarme con su perseverancia,
a mi madre por todo su esfuerzo para que saliera adelante,
a mi padre por ayudarme a descubrir mi vocación,
al Gabo quién se convirtió en mi hermano,
a la Hildita por aguantar todos mis desordenes,
al profesor Rodrigo por su paciencia y esmero,
y a todos quienes han estado en mi etapa universitaria.*

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. CONTENIDOS DE LA TESIS	3
CAPITULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. PROTECCIÓN SÍSMICA DE EQUIPOS	5
2.2.1. CONTROL PASIVO DE RESPUESTA SÍSMICA DE EQUIPOS	5
2.2.2. CONTROL SEMI-ACTIVO.....	9
2.3. DISIPADORES DE ENERGÍA DE ANILLOS FRICCIONALES PARA PROTECCIÓN SISMICA	11
2.4. ALGORITMOS GENÉTICOS	13
CAPITULO 3 DISIPADORES DE ENERGIA DE ANILLOS FRICCIONALES	15
3.1. INTRODUCCIÓN	15
3.2. DESCRIPCIÓN DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO ANILLOS FRICCIONALES	15
3.3. MONTAJE ANILLOS FRICCIONALES.....	18
3.4. PRECOMPRESIÓN MÍNIMA REQUERIDA	19
3.5. ECUACIONES DE RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO HISTERÉTICO	20
3.6. DISPONIBILIDAD DE DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO ANILLO FRICCIONAL	23
CAPITULO 4 MODELO DINÁMICO NO-LINEAL.....	25
4.1. INTRODUCCIÓN	25
4.2. MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL	26
4.3. MATRIZ GEOMÉTRICA.....	33
4.4. EQUIPO INFINITAMENTE RÍGIDO VERTICALMENTE	38
4.5. INTEGRACIÓN NUMÉRICA	38
4.6. CONSERVACIÓN DE ENERGÍA	41
4.7. EFECTO DEL PASO DE INTEGRACIÓN EN EL MODELO NO-LINEAL	45
CAPITULO 5 ALGORITMO GENÉTICO PARA SELECCIÓN DE CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO ANILLO FRICCIONAL	47
5.1. INTRODUCCIÓN	47
5.2. PARÁMETROS ALGORITMO GENÉTICO BINARIO	48
5.3. FUNCIÓN SELECCIÓN	49
5.3.1. FUNCIÓN OBJETIVO.....	50

5.3.2.	FUNCIÓN COSTO DISIPADOR.....	50
5.3.3.	FUNCIÓN CRITERIOS DE DISEÑO	51
5.4.	POBLACIÓN INICIAL.....	53
5.5.	DECODIFICACIÓN	54
5.6.	COSTOS POR CROMOSOMA	55
5.7.	SELECCIÓN DE PAREJAS	60
5.8.	RECOMBINACIÓN.....	61
5.9.	MUTACIÓN	62
5.10.	CONVERGENCIA	62
5.11.	EFFECTO DEL TAMAÑO DEL PASO DE INTEGRACIÓN EN LAS CURVAS DE FRAGILIDAD	67
CAPITULO 6	SELECCIÓN DE REGISTROS	69
6.1.	INTRODUCCIÓN	69
6.2.	REGISTROS.....	69
CAPITULO 7	ANÁLISIS PARAMÉTRICO.....	75
7.1.	INTRODUCCIÓN	75
7.2.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y VARIABLES DE ANÁLISIS.....	75
7.3.	EFFECTO DE LA EXCENRICIDAD DE APOYOS Y ESBELTEZ	75
7.4.	EFFECTO DE LA FRECUENCIA Y ESBELTEZ	76
7.5.	PARÁMETROS ALGORITMO GENÉTICO	77
CAPITULO 8	SELECCIÓN EQUIPOS	78
8.1.	INTRODUCCIÓN	78
8.2.	BUSHING DE UN TRANSFORMADOR DE 230KV	78
8.3.	INTERRUPTOR DE CIRCUITOS DE 380KV	81
8.4.	CHILLER INDUSTRIAL PESADO	82
8.5.	CHILLER INDUSTRIAL LIVIANO.....	84
8.6.	PARÁMETROS ALGORITMO GENÉTICO	85
CAPITULO 9	RESULTADOS.....	86
9.1.	INTRODUCCIÓN	86
9.2.	RESULTADOS ANÁLISIS PARAMÉTRICO.....	86
9.2.1.	EFFECTO DE LA EXCENRICIDAD DE APOYOS Y ESBELTEZ.....	86
9.2.2.	EFFECTO DE LA FRECUENCIA Y ESBELTEZ.....	87
9.3.	RESULTADOS SELECCIÓN DE EQUIPOS	88
9.4.	ALGORITMO GENÉTICO	92
CAPITULO 10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
10.1.	CONCLUSIONES.....	94

10.2. RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS.....	95
CAPITULO 11 BIBLIOGRAFÍA.....	96

NOTACIONES

- $\%_{0_{ex}}$ = Porcentaje de desacople de resonancia.
- $\%_{0_{gMAX}}$ = Porcentaje de la gravedad máximo, para la cual los disipadores siempre actuarán en su rama elástica.
- $\%_{0_{gMIN}}$ = Porcentaje de la gravedad mínimo, tal que la fuerza de precompresión de cada disipador sea mayor o igual a la carga estática descargando sobre el apoyo.
- $\{a\}$ = Vector aceleraciones absolutas en el centro de masa del equipo, correspondiente al sistema resultante considerando el equipo y los disipadores de energía de anillos friccionales.
- $\{a_E\}$ = Vector aceleraciones absolutas en el centro de masa del equipo, considerando este empotrado a su base sin el efecto de disipadores de energía de anillos friccionales.
- a_f = Aceleración absoluta de diseño del equipo.
- A_i = Área sección anillo interno.
- A_o = Área sección anillo externo.
- $[C]$ = Matriz de amortiguamiento.
- c_1 = Coeficiente de posición regresión lineal del modelo de demanda de aceleraciones máximas en el centro de masa del equipo.
- c_2 = Pendiente regresión lineal del modelo de demanda de aceleraciones máximas en el centro de masa del equipo.
- CCD = Constante de importancia de la función criterios de diseño en la función de selección del algoritmo genético implementado.
- $CTDR$ = Constante de importancia de la función de costos en la función de selección del algoritmo genético implementado.
- E = Módulo de elasticidad material.
- e = Excentricidad de los apoyos.
- $\{F\}$ = Vector fuerzas en el centro de masa del equipo, correspondiente al sistema resultante considerando el equipo y los disipadores de energía de anillos friccionales.

$\{F_D\}$	=	Vector de fuerzas sobre los disipadores.
$\{f_{ex}\}$	=	Vector de frecuencias de excitaciones operacionales.
$\{f_P\}$	=	Vector de frecuencias del plano.
$\{F_P\}$	=	Vector de fuerzas ficticias del plano.
F_{PR}	=	Fuerza precompresión disipador.
F_U	=	Fuerza última disipador.
FB	=	Función seguridad o de prevención de bloqueo de disipadores.
FCD	=	Función criterios de diseño.
FHD	=	Función limitaciones de espacio.
FO	=	Función objetivo.
FPR	=	Función pretensión.
FR	=	Función resonancia.
$FSEL$	=	Función selección.
$FTDR$	=	Función costos monetarios disipador.
g	=	Aceleración de gravedad.
IM	=	Medida de intensidad curva de fragilidad (PGA).
IM_i	=	i-ésima Medida de intensidad.
k	=	Bits de cada partición del cromosoma.
$[K_\Delta]$	=	Matriz geométrica.
$[K_{\Delta E}]$	=	Matriz geométrica subsistema del equipo.
$[K_{\Delta P}]$	=	Matriz geométrica subsistema conformado por el plano de disipadores.
K_0	=	Rigidez elástica disipador.
K_1	=	Rigidez carga disipador.
K_2	=	Rigidez descarga disipador.
$[K_E]$	=	Rigidez equipo.

$[K_p]$	= Rigidez del plano de disipadores.
K_{p0}	= Rigidez perno pretensionador.
$[K_T]$	= Rigidez global del sistema sismorresistente.
$[\tilde{K}_T]$	= Rigidez global equivalente del sistema sismorresistente en método de integración numérica de aceleraciones promedio.
L	= Altura a centro de gravedad equipo respecto a su base.
$[M]$	= Matriz de masa.
m	= Masa traslacional equipo.
MAX_E	= Número máximo de elementos (superficies de contacto entre anillos) de un disipador de energía de anillos friccionales.
MIN_E	= Número mínimo de elementos (superficies de contacto entre anillos) de un disipador de energía de anillos friccionales.
N	= Fuerza normal a la superficie de contacto entre anillos de un disipador de energía de anillos friccionales.
n	= Número de disipadores.
N_{CK}	= Cantidad de hijos generados durante recombinación.
n_e	= Número de elementos (superficies de contacto entre anillos de un disipador de energía de anillo friccional).
n_i	= Número de anillos internos.
N_K	= Número de padres conservados durante selección de parejas.
n_o	= Número de anillos externos.
N_{SR}	= Cantidad de registros sísmicos.
NF	= Resolución de bits de las fuerzas últimas.
NP	= Resolución de bits de la pretensión.
NR	= Resolución de bits del número de elementos de un disipador.
p	= Particiones del cromosoma.
$P_{\%}$	= Pretensión [%].

- $P_{\%C}$ = Pretensión crítica [%].
- $P_{\%max}$ = Pretensión máxima [%].
- $P_{\%min}$ = Pretensión mínima [%].
- P_D = Probabilidad de excedencia de la capacidad de deformación máxima de los disipadores.
- P_f = Probabilidad de falla del algoritmo genético.
- P_{tot} = Tasa media anual de excedencia de la capacidad de diseño.
- $P_{tot,\Lambda}$ = Tasa media de excedencia de la capacidad de diseño para una ventana de tiempo Λ .
- P_{WD} = Probabilidad que la aceleración absoluta actuando en el centro de gravedad del equipo con disipadores supere la capacidad del equipo.
- P_{WOD} = Probabilidad que la aceleración absoluta actuando en el centro de gravedad del equipo sin disipadores supere la capacidad del equipo.
- r_i = Radio medio anillo interno.
- r_m = Radio medio $\left(\frac{r_i+r_o}{2}\right)$.
- r_o = Radio medio anillo externo.
- s = Recorrido disponible disipador.
- S_a = Espectro de aceleración [g].
- S_d = Modelo de demanda de aceleraciones máximas en el centro de masa del equipo.
- S_{tot} = Recorrido máximo disipador.
- T_K = Tasa de conservación.
- T_M = Tasa de mutación.
- T_R = Tasa de recombinación.
- T_x = Periodo equipo en la dirección horizontal X.
- T_y = Periodo equipo en la dirección horizontal Y.

- T_z = Periodo equipo en la dirección vertical Z.
- TP = Tamaño población del algoritmo genético.
- $\{u\}$ = Vector desplazamientos totales en el centro de masa del equipo, correspondiente al sistema resultante considerando el equipo y los disipadores de energía de anillos friccionales.
- $\{u_D\}$ = Vector deformaciones de disipadores en la dirección vertical Z.
- u_{Dj} = Deformación axial j-ésimo disipador en la dirección vertical Z.
- $\{u_E\}$ = Vector deformaciones en el centro de masa del equipo considerando empotramiento en su base y sin el efecto de los disipadores de energía de anillos friccionales.
- $\{u_p\}$ = Vector desplazamientos en el centro de masa del equipo por el efecto de la deformación del plano de disipadores.
- $\{v\}$ = Vector velocidad relativa en el centro de masa del equipo, correspondiente al sistema resultante considerando el equipo y los disipadores de energía de anillos friccionales.
- $\{v_E\}$ = Vector velocidad relativa en el centro de masa del equipo, considerando empotramiento en su base sin el efecto de disipadores de energía de anillos friccionales.
- x_j = Coordenada en la dirección horizontal X del j-ésimo disipador.
- y_j = Coordenada en la dirección horizontal Y del j-ésimo disipador.
- α = Ángulo inclinación superficie anillos.
- $[\alpha_E]$ = Matriz de correlación de desplazamientos del equipo.
- $[\alpha_p]$ = Matriz de correlación de desplazamientos del plano.
- β = Amortiguamiento histerético disipador.
- $\beta_{EDP|IM}$ = Dispersión del modelo de demanda.
- β_x = Amortiguamiento del equipo en la dirección horizontal X.
- β_y = Amortiguamiento del equipo en la dirección horizontal Y.
- β_z = Amortiguamiento del equipo en la dirección vertical Z.

- γ = Factor integración por tramos, correspondiente al coeficiente de modificación de las fuerzas para que el método de integración numérica integre justo hasta el cambio de rigidez de un disipador de energía de anillos friccionales.
- Δ = Deformación permanente de un disipador debido a la precompresión.
- Δ_E = Incremento de número de elementos de un disipador de energía de anillos friccionales.
- $\Delta_{P\%}$ = Incremento de la pretensión.
- $\{\Delta a\}$ = Vector aceleración incremental disipadores.
- $\{\Delta F\}$ = Vector fuerza incremental en la masa traslacional.
- $\{\Delta R\}$ = Vector fuerza incremental resultante en la integración numérica en el centro de masa del equipo, correspondiente al sistema que considera el equipo y los disipadores de energía de anillos friccionales.
- $\{\Delta u\}$ = Vector desplazamiento incremental en el centro de masa del equipo, correspondiente al sistema que considera el equipo y los disipadores de energía de anillos friccionales.
- $\{\Delta u_D\}$ = Vector desplazamiento incremental disipadores.
- Δu_{Dvj} = Incremento de deformación necesaria para producir cambio de rigidez en el j-ésimo disipador.
- $\{\Delta u_E\}$ = Vector desplazamiento incremental equipo.
- $\{\Delta u_P\}$ = Vector desplazamiento incremental plano.
- $\{\Delta v\}$ = Vector velocidad incremental disipadores.
- ε = Parámetro de nivel de confianza regresión lineal del modelo de demanda.
- ζ = Esbeltez promedio considerando la altura del equipo y la posición de los apoyos.
- $[\lambda]$ = Matriz de compatibilización de las deformaciones del plano de disipadores con las deformaciones del centro de masa del equipo.
- μ = Coeficiente de fricción.

- $\{N_{u_{Ex}}\}$ = Función de forma a lo alto del equipo debido a las deformaciones propias de este en la dirección horizontal X.
- $\{N_{u_{Ey}}\}$ = Función de forma a lo alto del equipo debido a las deformaciones propias de este en la dirección horizontal Y.
- $\{N_{u_{Ez}}\}$ = Función de forma a lo alto del equipo debido a las deformaciones propias de este en la dirección vertical Z.
- $\{N_{u_{px}}\}$ = Función de forma a lo alto del equipo debido a las deformaciones del plano de disipadores en la dirección horizontal X.
- $\{N_{u_{py}}\}$ = Función de forma a lo alto del equipo debido a las deformaciones del plano de disipadores en la dirección horizontal Y.
- $\{N_{u_{pz}}\}$ = Función de forma a lo alto del equipo debido a las deformaciones del plano de disipadores en la dirección vertical Z.
- ρ = Carga radial por unidad de longitud.
- σ_c = Esfuerzo de compresión de un anillo delgado.
- σ_t = Esfuerzo de tracción de un anillo delgado.
- Φ = Distribución normal estándar de probabilidad.
- $[X]$ = Matriz de interpolación del plano.

CAPITULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

El uso de tecnologías de protección sísmica, como el aislamiento sísmico y los dispositivos de disipación de energía, se ha masificado a lo largo del continente Americano con el propósito de proteger infraestructuras públicas, industriales, de salud, de oficinas y residenciales, entre otras. A pesar de los beneficios directos e indirectos que estas tecnologías proporcionan a componentes y sistemas no estructurales, actualmente existen limitadas aplicaciones orientadas a la protección de estos componentes. Además, aunque sistemas de aislamiento sísmico se encuentran disponibles para sistemas no estructurales de bajo peso, en la mayoría de los casos su aplicación no es factible debido a restricciones económicas, a las limitaciones físicas impuestas por la esbeltez del componente y/o al espacio limitado para acomodar el movimiento lateral del sistema de aislamiento. En estos casos, dispositivos de disipación de energía como los disipadores de anillos friccionales, configurados en una disposición vertical, surgen como una alternativa viable para aumentar tanto el período de cabeceo como el amortiguamiento del sistema protegido, a fin de reducir la demanda sísmica sobre el sistema.

Dadas las características de estos dispositivos se pueden obtener resultados uniformes, replicables y predecibles, con un alto nivel de amortiguamiento, en un amplio margen de temperaturas, e independiente de la frecuencia de la excitación. Más aún, estos disipadores pueden ser integrados como parte de los apoyos de los equipos, disminuyendo la necesidad de sistemas más complejos que interactúen a nivel equipamiento-estructura. Finalmente, estos dispositivos se caracterizan por poseer una gran durabilidad en el tiempo, pudiendo incluso soportar sin daños las altas temperaturas alcanzadas durante un incendio.

Esta estrategia de protección sísmica se ha utilizado ampliamente para proteger piezas de equipos eléctricos críticos de alta fragilidad, como transformadores de tensión y corriente en subestaciones eléctricas, las cuales han sido diseñadas utilizando modelos de análisis lineal equivalente. La eficacia de estos dispositivos ha sido probada durante los recientes terremotos del Maule de 2010 (M_w 8.8) y de Illapel de 2016 (M_w 8.3) ocurridos en Chile, donde el suministro de energía permaneció prácticamente operativo, con mínimas interrupciones.

No obstante, la utilización de modelos lineales equivalentes es solo una aproximación para efectuar diseños preliminares, por lo que persiste la necesidad de desarrollar modelos no-lineales para el análisis de respuesta en el tiempo que entreguen resultados más precisos y detallados. En la actualidad existen pocas herramientas que permitan modelar el comportamiento histerético no-lineal de estos tipos de disipadores. Un ejemplo de estas herramientas es el programa comercial de análisis estructural SAP2000®. No obstante, ninguna de estas herramientas incluye instrumentos para obtener curvas de fragilidad con las cuales estimar la susceptibilidad de pérdida por daño sísmico de los equipos, tornando compleja la obtención de un diseño óptimo de los disipadores de anillo friccional requeridos para proteger sísmicamente los equipos.

El proceso de optimización se reduce en estos casos a un procedimiento del tipo ensayo-error.

Dado lo anterior, la implementación de un programa dedicado al diseño de protección sísmica de equipos utilizando este tipo de disipadores de energía, contribuiría a la masificación y uso de estas tecnologías, por lo que este trabajo intenta establecer un método integral que abarque tanto la modelación no-lineal de respuesta en el tiempo, como también el algoritmo de optimización de la configuración de disipadores de anillos friccionales.

Este trabajo busca optimizar la respuesta sísmica del equipo a proteger, para lo cual se utilizan curvas de fragilidad cuya medida de intensidad es la aceleración máxima del suelo (PGA), para evaluar comparativamente los efectos de los sistemas de protección sísmica factibles de implementar. Se utilizan algoritmos genéticos para maximizar la reducción de probabilidad de alcanzar la capacidad del equipo en el caso con protección sísmica. El método implementado destaca por su simpleza y limitada necesidad de efectuar cálculos matemáticos, de los cuales ninguno es de gran complejidad. De esta forma, se busca expresar en forma tangible el beneficio de utilizar disipadores de anillos friccionales para la protección sísmica de componentes y sistemas no estructurales.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GENERALES

Los objetivos de la presente investigación son los siguientes:

- i. Desarrollar una metodología de selección de disipadores de energía de anillos friccionales para optimizar el nivel de seguridad sísmica de equipos relativamente esbeltos sensibles a aceleraciones.
- ii. Identificar los límites a las mejoras posibles en el desempeño sísmico que se puede lograr mediante el uso de disipadores de energía de anillos friccionales, en función de la esbeltez, periodo y otras propiedades del equipo protegido.

1.2.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- i. Definir modelo analítico que integre las propiedades físicas y geométricas de los equipos y disipadores, que permita efectuar el análisis no lineal de respuesta en el tiempo del sistema.
- ii. Desarrollar programa de análisis que integre la metodología de selección óptima de disipadores de anillos friccionales que minimicen la probabilidad de pérdida operacional del equipamiento.

- iii. Evaluar y comparar el desempeño sísmico de equipamiento con y sin sistemas de protección sísmica.

1.3. CONTENIDOS DE LA TESIS

Los alcances por capítulos son los siguientes:

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes generales existentes al momento de iniciar esta investigación, de modo de situar el contexto en que está enmarcado el estudio. Se plantean los objetivos generales y específicos a cumplir durante el desarrollo de la tesis y se resumen los contenidos de esta.

En el capítulo 2 se realiza una investigación bibliográfica sobre los sistemas y aplicaciones utilizados para proteger sísmicamente componentes y sistemas no estructurales, los estudios desarrollados a la fecha considerando disipadores de energía tipo anillos friccionales, y las aplicaciones de algoritmos genéticos en la resolución de problemas de ingeniería civil.

En el capítulo 3 se describen las características de los disipadores de anillos friccionales tales como la forma de estos dispositivos, sus propiedades físicas y geométricas, sus usos y beneficios, y finalmente el modelo histerético a utilizar para su estudio.

En el capítulo 4 se plantea el modelo para análisis dinámico no-lineal, considerando supuestos, variables y metodologías a utilizar.

En el capítulo 5 se define el método de selección para la configuración óptima de disipadores de energía de anillos friccionales para un equipo con propiedades particulares, siguiendo el procedimiento de algoritmos genéticos.

En el capítulo 6 se definen los registros sísmicos que se utilizarán en la evaluación del modelo dinámico no-lineal, considerando eventos sísmicos caracterizados por distintos mecanismos focales, tipos de suelo, distancias epicentrales y magnitudes.

En el capítulo 7 se detallan las propiedades físicas y geométricas de un modelo paramétrico y las variables consideradas en el análisis paramétrico.

En el capítulo 8 se presenta la selección de equipos a estudiar, se describen sus características y propiedades.

En el capítulo 9 se muestran los resultados obtenidos a través del algoritmo utilizado para todos los casos definidos en el capítulo 8 y análisis paramétricos considerando variables tales como la esbeltez del sistema sismorresistente, la frecuencia fundamental del equipo y excentricidad de los apoyos con respecto al centro de masa.

En el capítulo 10 se resume lo realizado durante el desarrollo de la investigación y el impacto de los resultados obtenidos. Se evalúa el cumplimiento de los objetivos planteados en el primer capítulo.

CAPITULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUCCIÓN

El diseño de estructuras en regiones de elevado peligro sísmico requiere la aplicación de técnicas de diseño sismorresistente con el objetivo de evitar pérdidas de vidas humanas, prevenir colapsos estructurales, minimizar las pérdidas económicas y/o alcanzar continuidad operacional, entre otros. Este capítulo describe varios métodos de diseño sismorresistente y examina aquellos aplicables a la protección sísmica de equipos y sistemas no estructurales. Se detallan los estudios y aplicaciones presentes en la literatura relativas a protección sísmica de estructuras utilizando disipadores de energía tipo anillos friccionales. Por último, se presenta un recuento sobre algoritmos genéticos aplicados para el diseño de estructuras.

2.2. PROTECCIÓN SÍSMICA DE EQUIPOS

En materia de protección sísmica de sistemas no estructurales se pueden encontrar sistemas pasivos o semi-activos para el control de respuestas. Dada la limitada posibilidad de modificar equipos, el diseño de sistemas de protección sísmica de estos componentes típicamente busca generar una base de apoyo donde se incorpore el dispositivo de aislación sísmica y sobre esta se monte el equipo.

2.2.1. CONTROL PASIVO DE RESPUESTA SÍSMICA DE EQUIPOS

En el control pasivo, los dispositivos de control de respuesta están incorporados al sistema estructural y no requieren suministros externos de energía. Estos responden directamente a la excitación sísmica y el comportamiento exhibido concuerda con sus propiedades físicas y mecánicas. El control de respuesta ocurre ya que estas tecnologías pueden almacenar o disipar energía. En materia de investigación e innovación en relación con estas aplicaciones se pueden citar los autores descritos a continuación.

Demetriades et al. (1992) estudiaron experimental y analíticamente los soportes antivibratorios de cable como el que se muestra en la Figura 2.1 para protección sísmica de equipos. Demetriades et al. observaron que estos elementos tienen un amortiguamiento histerético decreciente a medida que se incrementa la amplitud del movimiento. Por otro lado, demostraron que estos dispositivos logran un grado de protección sísmica de equipos mientras que permiten desplazamientos pequeños. Esto en favor del clásico enfoque de aislamiento donde se busca aumentar el periodo del sistema, lo que en el interior de edificios puede resultar impráctico puesto que los grandes desplazamientos podrían ser inaceptables para los equipos.

Se puede agregar además que Balaji (2015) concluyó que estos tipos de soportes antivibratorios de cables no-lineales pasivos proveen una mejor aislación que otros dispositivos convencionales y a la vez protegen en las 3 direcciones principales.



Figura 2.1: Soportes antivibratorios de cables, Balaji, P., 2015.

Murota et al. (2005) estudiaron analítica y experimentalmente el uso de sistemas de aisladores para equipos eléctricos de gran volumen, utilizando especialmente aisladores de goma. Un esquema de estos se puede observar en la Figura 2.2. La importancia de este estudio radica en la utilización de un simulador de terremotos tri-axial y análisis no-lineales de respuesta en el tiempo. Los autores concluyeron en primer lugar que los aisladores de goma son no recomendables para proteger sísmicamente estructuras livianas pues existe poca habilidad para aumentar el periodo principal del sistema en su conjunto. En segundo lugar, los autores observaron que si se ensayan estos tipos de aisladores en una o dos direcciones horizontales se logra reducir notoriamente las aceleraciones. Sin embargo, al incorporar la componente vertical de los terremotos se obtuvieron en algunos casos aceleraciones del equipo montado sobre aisladores de goma superiores comparados al caso sin aislación, debido a que el amortiguamiento de la goma (producto de la fricción entre las partículas de la goma) se ve afectada por la carga vertical del sistema, estimulando así los modos de alta frecuencia del equipo. Por lo tanto, dado que las frecuencias verticales dependen de la rigidez de compresión de los aisladores, se deben diseñar cuidadosamente para no inducir resonancia en las altas frecuencias.

En la misma línea de estudio Lemura et al. (2006) estudiaron en forma general aisladores sísmicos (friccionales y de goma) cuyos parámetros principales son el periodo del sistema y el coeficiente de fricción, mediante modelos analíticos validados experimentalmente simplificados de un grado de libertad. En este estudio se observó que a medida que los valores de aceleraciones máximas del suelo (PGA) aumentan, el periodo óptimo del sistema también aumenta. Además, se concluye que el periodo del sistema y el coeficiente de fricción de los aisladores dependen intrínsecamente de la reducción de aceleraciones requerida.

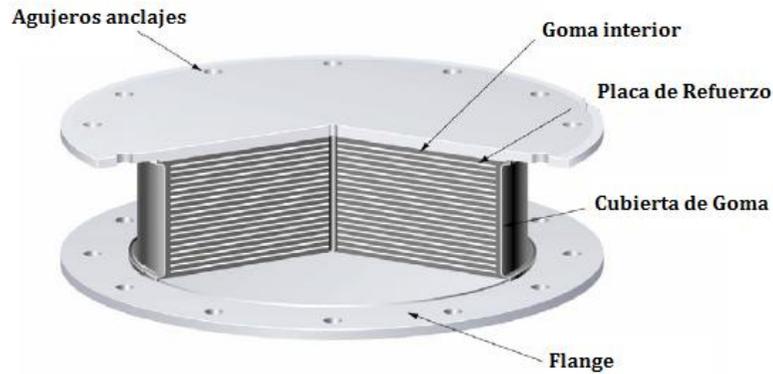


Figura 2.2: Aislador de goma, Murota, N., Feng, M., & Liu, G., 2005.

En adición a los aisladores de goma y péndulos friccionales típicamente encontrados en la protección sísmica de edificios, es posible encontrar otros tipos de aisladores de base para equipos. Por ejemplo, Wang et al. (2014) diseñaron un sistema consistente en multi-rodillos deslizantes en superficies en “V” para crear un aislador en las dos direcciones horizontales tal como se muestra en la Figura 2.3. Este dispositivo tiene como característica principal su nula rigidez post-fluencia, lo que facilita el diseño del sistema de protección sísmica dada la capacidad o máxima aceleración que pueden acomodar los equipos. Por otro lado, el dispositivo desarrollado tiene un modelo histerético sencillo que la mayoría de los programas comerciales de análisis estructural puede ejecutar y cuyos resultados concuerdan con los resultados obtenidos al considerar métodos numéricos más precisos y los resultados de ensayos en mesa vibradora.

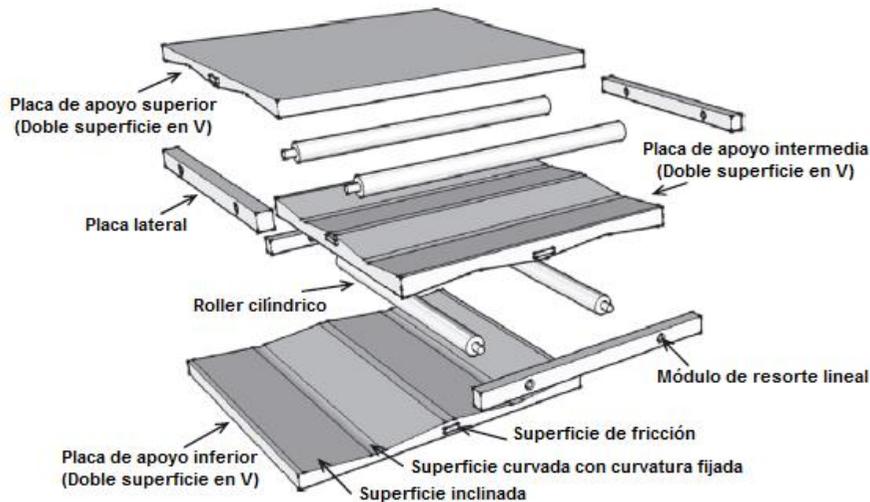


Figura 2.3: Esquema aislador multi-rodillos, Wang et al., 2014.

Otro ejemplo de aislador de base fue desarrollado por Kemeny (1997), que consiste en dos superficies cónicas de deslizamiento con vértices semiesféricos entre las que desliza una esfera elastomérica, como se muestra en la Figura 2.4. Este tipo de

aislador, al igual que el aislador multi-rodillos, tiene una histéresis bilineal donde la rigidez post-fluencia es cero. Harvey et al. (2013) desarrollaron un extensivo estudio sobre la amplitud de la deformación y periodo del aislador de superficies cónicas. El estudio demostró que en ausencia de impactos el sistema no se comporta caótico, excepto cuando ocurren amplitudes grandes o perturbaciones en baja frecuencia, casos en los cuales se observó comportamientos caóticos del sistema. Por lo tanto, se debe considerar en estos sistemas un aumento en la capacidad de deslizamiento o una reducción de la demanda de desplazamientos mediante el aumento de la fricción. Harvey & Gabin (2014) continuaron el estudio anterior realizando un modelo matemático validado experimentalmente, utilizando una configuración de doble nivel de aisladores de superficie cónica como se muestra en la Figura 2.5. Harvey & Gabin concluyeron que esta configuración permite mayores desplazamientos y disminuye la posibilidad de impactos y comportamientos caóticos. Por otro lado, Jeon et al. (2015) estudiaron aisladores simples de superficie cónica utilizando modelos numéricos validados mediante ensayos de laboratorio. Los estudios desarrollados permitieron concluir que, a mayor coeficiente de fricción entre las superficies cónicas y la esfera, menor es la reducción de aceleraciones. Para coeficientes de roce menores a 0.01, el incremento del rendimiento es despreciable.

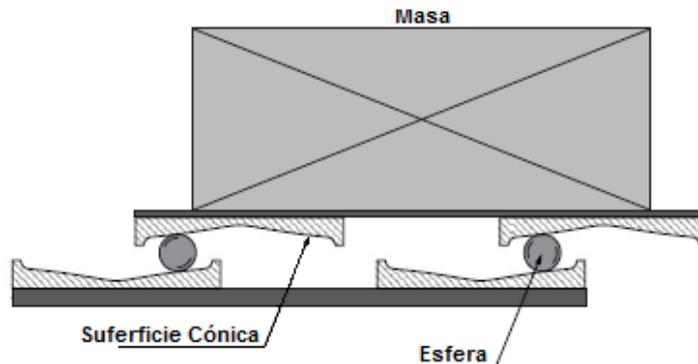


Figura 2.4: Esquema aislador esfera en cono, Harvey & Gabin, 2013.

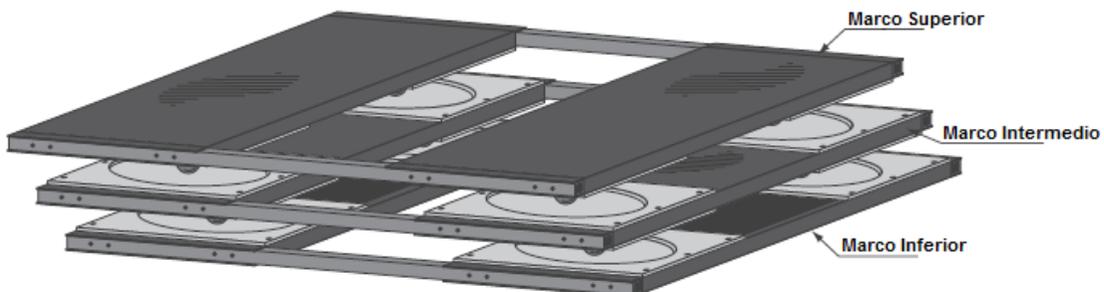


Figura 2.5: Esquema aislador doble de esfera en cono, Harvey, P., Wiebe, R., & Gabin, H., 2014.

Almazán et al. (2015) estudiaron un tipo aplicación que permite aislación sísmica tridimensional de equipos, consistente en un mecanismo hexagonal que se deforma uniaxialmente como se muestra en la Figura 2.6. Almazán et al. concluyeron que este sistema permite reducciones de respuesta comparables con sistemas de aislación convencionales, siendo atractivo utilizarlo en la protección sísmica de estanques y equipos pesados.

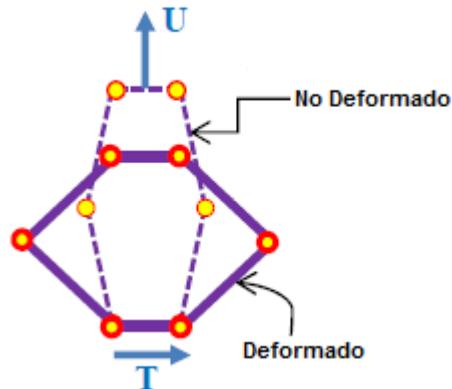


Figura 2.6: Esquema 2D de Aislador 3D, Almazán et al. 2015.

2.2.2. CONTROL SEMI-ACTIVO

Otro tipo de estrategia para protección sísmica de sistemas no estructurales corresponde a utilizar un enfoque semi-activo, que según Inaudi & Kelly (1993), consiste en utilizar un sistema pasivo que desacople los movimientos del suelo y del equipo e incorpore un actuador que provea un esquema resistente al movimiento absoluto. De esta forma, se logra una reducción superior de las aceleraciones absolutas, manteniendo parámetros del movimiento dentro de rangos aceptables, ya sean de desplazamiento o velocidad. En esta misma línea, Fan et al. (1998) utilizaron disipadores magnetorreológicos en un equipo liviano montado sobre una base deslizante en el primer piso de un edificio de marcos de acero de 3 pisos. Concluyeron que un diseño adecuado del algoritmo controlador sobre los actuadores puede reducir las aceleraciones máximas del equipo sin incurrir en grandes desplazamientos. Este tipo de actuador consiste, como se muestra en la Figura 2.7, en un sistema similar a los disipadores viscosos, pero a diferencia utiliza un fluido magnetorreológico que modifica sus propiedades de acuerdo con un campo magnético.

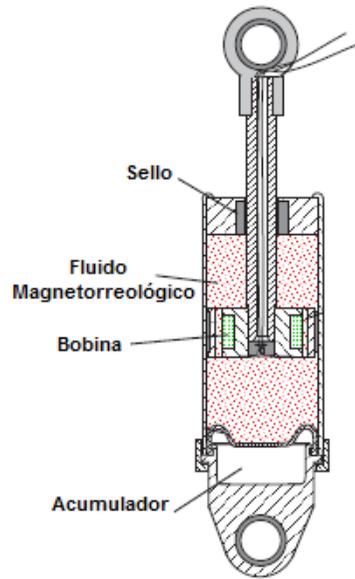


Figura 2.7: Esquema disipador magnetorreológico, Dyke et. al., 1998.

Por otro lado, Lu & Lin (2009) probaron otro tipo de actuador piezoeléctrico de fricción para equipos cercanos a fallas sísmicas. Este dispositivo genera una fricción ajustable sobre una barra, controlando así el movimiento del sistema como se muestra en la Figura 2.8. En su estudio compararon este tipo de actuador frente a un sistema pasivo convencional y otro sistema semi-activo consistente en un actuador magnetorreológico. Lu & Lin corroboraron que el sistema semi-activo posee una ventaja frente a la aislación convencional, pero entre sistemas semi-activos no difieren mucho en las máximas aceleraciones resultantes en los equipos. Por otro lado, el estudio de Lu & Lin concluyó que este tipo de sistema es beneficioso, sobre todo en caso de movimientos sísmicos cercanos a las fallas con componentes de periodos largos.

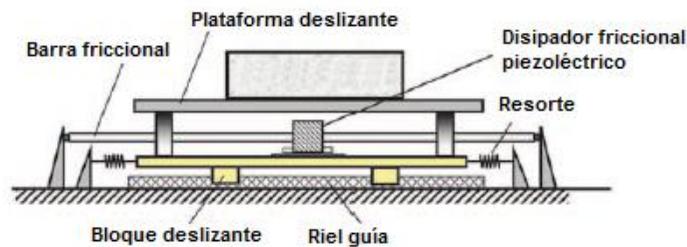


Figura 2.8: Esquema disipador friccional piezoeléctrico, Lu & Lin, 2009.

2.3. DISIPADORES DE ENERGÍA DE ANILLOS FRICCIONALES PARA PROTECCIÓN SISMICA

Particularmente, los disipadores de anillo friccional utilizados en este estudio, han sido aplicados en protección sísmica por Kar et al. (1996), donde obtuvieron las propiedades dinámicas de un interruptor de circuitos GFX 330kV SF6 montado sobre disipadores de energía y se compararon con el caso sin disipadores. Los ensayos ejecutados permitieron observar una reducción del 50% en los momentos de flexión. Un esquema del interruptor de circuitos con protección se muestra en la Figura 2.9.

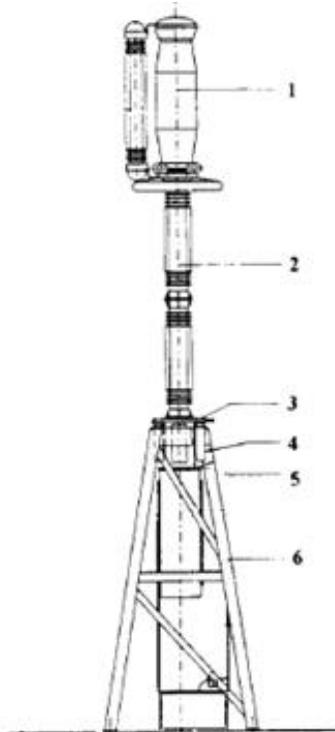


Figura 2.9: Esquema interruptor circuitos GFX 330kV SF6. 1.-Cámara del interruptor, 2.- Poste del interruptor de porcelana, 3.- Plato Base, 4.- Disipador de anillo friccional, 5.- Cilindro de gatillo hidráulico, 6.- Estructura de soporte, Kar, R., Rainer, J., & Lefrançois, 1996.

El uso de disipadores de energía de anillos friccionales para protección sísmica de equipos fue mencionado por Shepperd & Erasmus (1988), donde se identificó la capacidad de estos disipadores para actuar como protección sísmica de elementos esbeltos utilizando estos disipadores como apoyos de los equipos.

Hill (1995) estudió los requerimientos de diseño y las propiedades dinámicas de los disipadores de anillos friccionales. En base a sus estudios generó un sistema de aislación donde un equipo se balancea sobre un pivote, como se muestra en la Figura 2.10. El estudio de Hill mostró que este tipo de sistema logra reducir significativamente las cargas sísmicas sobre las estructuras, incluso llegando a factores entre 3 y 4, para

eventos sísmicos de alta frecuencia. Además, se observó que estos disipadores son capaces de absorber la mayor parte de la energía provista por un sismo. Por último, ratificó la ventaja de utilizar este tipo de disipadores para elementos esbeltos.

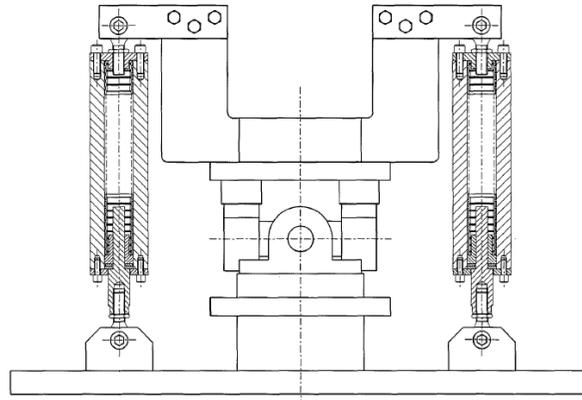


Figura 2.10: Esquema de aislación de balanceo sobre pivote, Hill, K., 1995.

Filiatrault et al. (2000) compararon el modelo analítico de los disipadores de anillos friccionales con respecto a los resultados de ensayos de laboratorio realizados, donde quedó demostrada la concordancia entre resultados experimentales y analíticos. Además, la investigación desarrollada permitió concluir respecto al comportamiento dinámico de los dispositivos, donde se observó que los ciclos histeréticos son repetibles, estables e idénticos tanto para sollicitaciones de tracción como de compresión. Los comportamientos observados en compresión y tracción resultaron prácticamente idénticos, independiente de la frecuencia de excitación y del registro sísmico considerado. Otra observación relevante del estudio de Filiatrault et al. es que los disipadores de energía presentan una mínima degradación en su histéresis.

En estructuras, este tipo de disipadores se ha implementado en las uniones deslizantes entre vigas y columnas de acero utilizadas en marcos resistentes a momentos. Estas uniones (con o sin disipadores) se caracterizan por alcanzar rotaciones del orden de 0.0375 radianes, provocando un daño mínimo a la estructura, a costa de una deformación plástica irre recuperable y derivas residuales. Khoo et al. (2012) realizaron un estudio para reducir los efectos adversos de estas uniones aprovechando las características auto-centrantes de los disipadores de energía de anillos friccionales, con el objeto de desarrollar una conexión deslizante auto-centrante. La Figura 2.11 muestra un esquema conceptual de estas conexiones deslizantes auto-centrantes. Los resultados analíticos de su investigación mostraron una mejora en términos de capacidad y resistencia residual de la conexión. Sin embargo, se mantienen los desafíos para su implementación, principalmente debido al costo y tamaño de los disipadores requeridos para alcanzar una capacidad de momento adecuada.

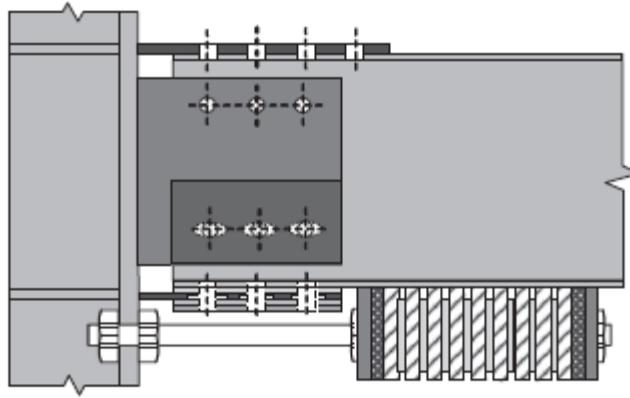


Figura 2.11: Esquema unión deslizante auto-centrante, Khoo et al., 2012.

2.4. ALGORITMOS GENÉTICOS

El presente estudio utiliza curvas de fragilidad, para evaluar el desempeño sísmico de los sistemas. No obstante, es necesario generar un algoritmo para seleccionar la configuración óptima de los disipadores de energía de anillos friccionales requeridos para proteger sísmicamente equipos sensibles a aceleraciones. Por lo que este trabajo utiliza algoritmos genéticos para obtener el diseño óptimo de los disipadores, fundamentalmente debido a su simpleza y a que pueden ser utilizados en la resolución de problemas discretos, a diferencia de algoritmos que requieren un gradiente para su resolución (Haupt et al., 2004). Además, dado que pueden existir restricciones de diseño, las cuales provocan que el dominio no sea convexo, se tiene que el espacio de soluciones no necesariamente es una superficie convexa. Por lo tanto, de acuerdo con Nocedal et al. (1999), no se cumpliría uno de los requerimientos básicos de los métodos con gradientes.

Los algoritmos genéticos han sido ampliamente utilizados para la resolución de problemas de ingeniería civil. Deb (1991) utilizó algoritmos genéticos para determinar el diseño óptimo de una viga en voladizo soldada en uno de sus extremos, como muestra la Figura 2.12. Deb destacó en su estudio que a pesar de que el problema era altamente no lineal, el método convergía rápidamente a una solución cercana al óptimo teórico y que la principal ventaja es la nula necesidad de gradientes u otras informaciones auxiliares adicionales, como por ejemplo en el caso del método geométrico de programación lineal donde se requiere la implementación de variables duales.

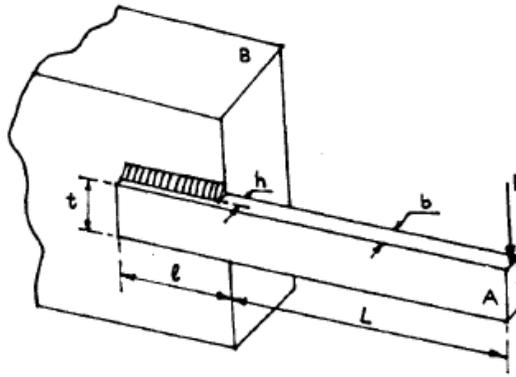


Figura 2.12: Esquema viga en voladizo soldada, Deb, 1991.

Sambrige & Drijkoningen (1992) aplicaron el algoritmo genético para la inversión de la forma de la onda sísmica, el cual es un procedimiento de ajuste de datos no lineal que tiene como objetivo obtener estimaciones detalladas de las propiedades del subsuelo a partir de datos sísmicos. Compararon los resultados obtenidos, bajo las mismas condiciones, mediante la aplicación del algoritmo genético y el método de Monte Carlo. Sus resultados sugieren que los algoritmos genéticos resuelven los problemas de manera más eficiente que el método de Monte Carlo.

Camp et al. (1998) estudiaron el diseño óptimo de varias estructuras de marcos planos utilizando algoritmos genéticos. Concluyeron que utilizando el método se puede satisfacer las especificaciones del estándar AISC-ASD, las restricciones de construcción (tales como materiales disponibles, presupuesto, etc.), y la vez, minimizar el peso del edificio.

Wongprasert & Symans (2004) obtuvieron la distribución de disipadores viscosos óptima para un edificio de referencia de 20 pisos utilizando algoritmos genéticos, reduciendo la demanda de ductilidad, la energía histerética disipada en elementos estructurales y rótulas plásticas del edificio en eventos sísmicos.

Azadpour et al. (2016) determinaron el diseño sísmico óptimo de un disipador de masa sintonizada para un edificio de 11 pisos utilizando algoritmos genéticos, considerando que el problema debía disminuir las deformaciones y velocidades máximas de la estructura. Azadpour et al. observaron que el diseño óptimo del disipador de masa sintonizada encontrado en su estudio presentaba un mejor desempeño, menor masa, rigidez y amortiguamiento comparado a otros diseños de disipadores de masa sintonizada de estudios similares.

CAPITULO 3 DISIPADORES DE ENERGIA DE ANILLOS FRICCIONALES

3.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo describe las características de los disipadores de energía de anillos friccionales. Se detallan las ecuaciones que rigen el comportamiento de estos dispositivos. Se describen los requerimientos de diseño para la implementación de estos dispositivos. Por último, se discute respecto al modelo a utilizar en este estudio.

3.2. DESCRIPCIÓN DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO ANILLOS FRICCIONALES

Los disipadores de energía del tipo anillos friccionales consisten en argollas de acero cerradas externas e internas con superficies de contacto cónicas. Se considera que un elemento del disipador consiste en una única superficie cónica coincidente, es decir, en una única superficie en contacto entre una argolla interior con una exterior. En consecuencia, la cantidad de elementos de un disipador de este tipo es siempre par. Como se puede observar en la Figura 3.1, cuando la columna de anillos se carga axialmente, las superficies cónicas se superponen causando que los anillos exteriores se expandan y que los anillos internos se contraigan. A diferencia de otros tipos de disipadores de energía basados en resortes, las tensiones a lo alto del dispositivo se distribuyen de manera casi uniforme, por lo que resultan más compactos. El recorrido total de los disipadores depende de la cantidad de anillos, mientras que su fuerza máxima no cambia.

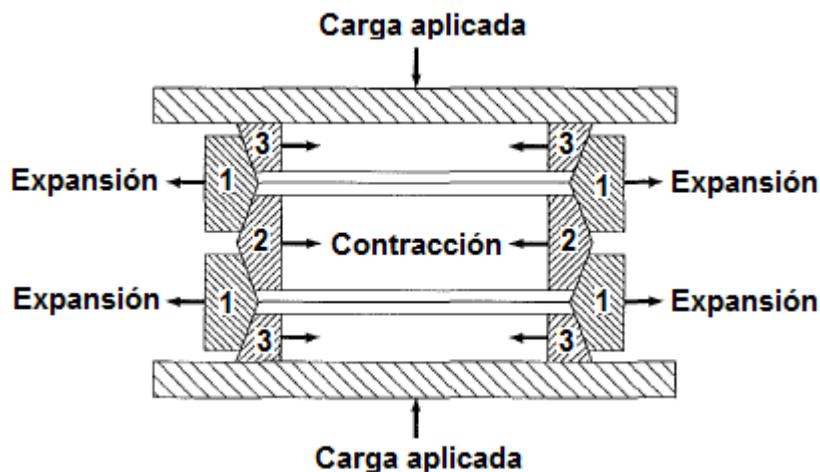


Figura 3.1: Esquema disipador de anillos friccionales. 1- Argolla exterior. 2- Argolla interior. 3- Media argolla interior, Hill, K., 1995.

De acuerdo con Filiatrault et al. (2000), el comportamiento histerético de estos disipadores, mostrado en la Figura 3.2, posee las siguientes características:

- i. Los ciclos histeréticos son repetibles, estables e idénticos tanto en tracción como en compresión. Las características de disipación de energía y recentrado de los disipadores se demuestra claramente. La capacidad de disipación de energía del disipador aumenta con la amplitud del desplazamiento aplicado.
- ii. El comportamiento de los disipadores es idéntico en un amplio rango de frecuencias testeadas (0.05 a 2.0 Hz) solo difiriendo en la rigidez inicial del dispositivo atribuido al error de precisión de medición. Además, la respuesta del dispositivo es prácticamente independiente del registro sísmico considerado. Todos los procesos de carga y descarga de los disipadores ocurren en un ciclo predecible, dentro de la curva histerética fuerza-deformación.
- iii. La degradación del amortiguamiento es mínima. En los ensayos cíclicos dinámicos se observó que entre el primer y veinteavo ciclo solo se observa un 4% de diferencia en el amortiguamiento del disipador.
- iv. Los ciclos histeréticos obtenidos experimentalmente concuerdan con los obtenidos numéricamente.

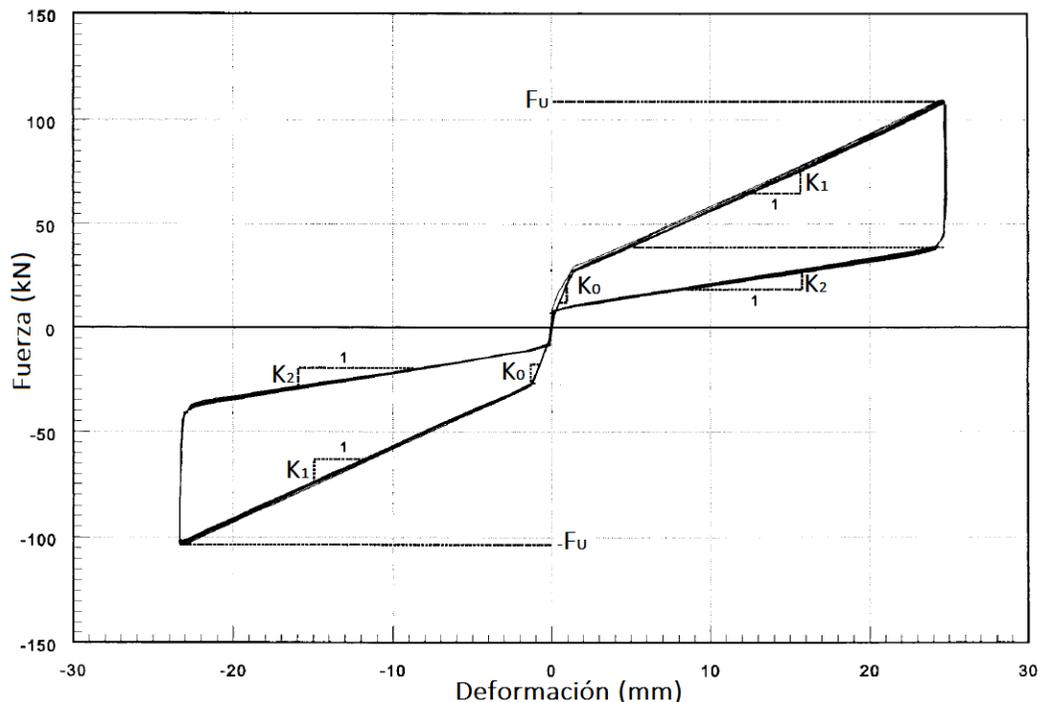


Figura 3.2: Histéresis disipadores de anillo friccional, Filiatrault et al., 2000.

El comportamiento histerético de los disipadores de anillos friccionales es posible debido a que, al someter el disipador a cargas cíclicas, la fricción entre las superficies de los elementos en compresión es aditiva a la fuerza radial actuando sobre los anillos del disipador, pero al descargarse, la fricción es contraria a la fuerza radial. Por lo tanto,

se obtiene una rigidez de carga mayor (K_1) y una rigidez de descarga (K_2) menor, en relación con la rigidez asociada al proceso de dilatación de los anillos. También se observa una rigidez elástica (K_0), mayor a la rigidez de carga y descarga, puesto que en la rama inicial se encuentra presente la acción del elemento que pre-comprime al dissipador, el cual aporta con su rigidez, hasta que este deja de estar traccionado. Mayor precompresión implica menor capacidad de deformación y fuerzas de fluencia mayores.

Existe un desplazamiento máximo para el cual el dispositivo se bloquea debido a un aumento exponencial de la rigidez (como se observa en la Figura 3.3), puesto que a esta deformación máxima no hay separación entre anillos externos o internos, provocando que el dissipador se comporte mecánicamente como un cilindro metálico. En la Figura 3.3 solo se muestra la mitad del comportamiento, puesto que en tracción es simétrico. Además, se puede observar que existe una fuerza máxima o última (F_U) asociada a la deformación máxima.

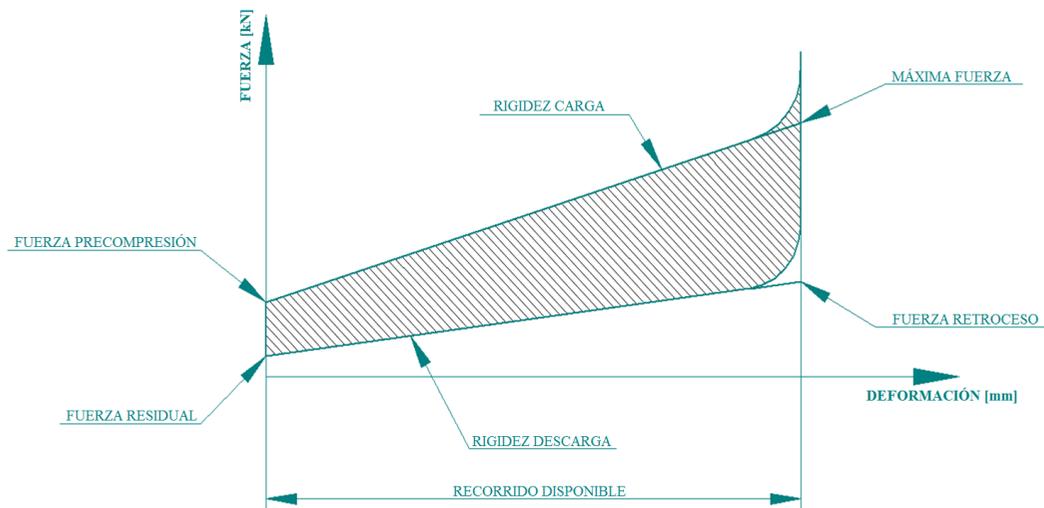


Figura 3.3: Comportamiento Histerético dispositivo de anillos friccionales.

Además de las características antes descritas, estos dissipadores se caracterizan por:

- v. Las propiedades de los dissipadores permanecen inalteradas en un rango de temperaturas entre -20 y 60 °C, pero este rango puede ser ampliado hasta un rango de operación entre -73 y 200 °C al modificar el tipo de lubricante utilizado.
- vi. Son diseñados para mantenerse sin daños durante su vida útil y no requieren mantención.
- vii. Existen dispositivos que permiten alcanzar amortiguamientos entre 35 y 66%, dependiendo del tipo de lubricante utilizado.
- viii. En caso de incendios, mientras no se supere la temperatura de templado del acero, los dissipadores no debieran presentar daños. No obstante, podrían requerir ser re-engrasados.

Por otro lado, programas de análisis estructural como SAP2000® (Versión 19.2.2; Computers and Structures Inc., 2019) utilizan la constitutiva descrita en la Figura 3.4 para modelar el comportamiento dinámico de estos disipadores, la cual es la misma a utilizar en esta investigación.

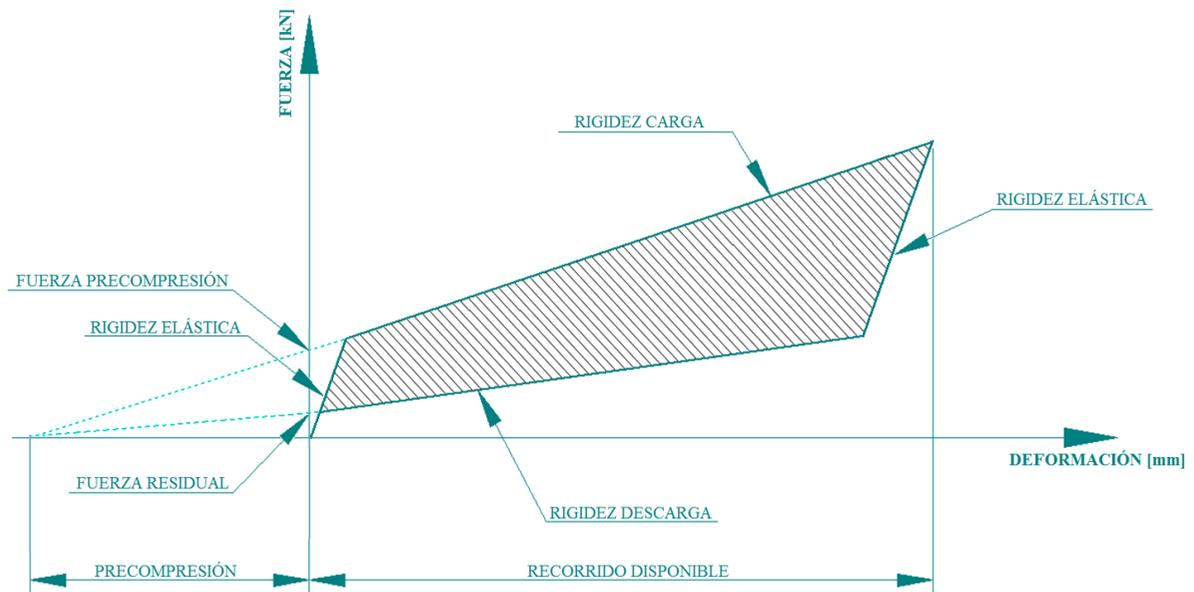


Figura 3.4: Comportamiento histerético utilizado en programas de análisis comerciales.

3.3. MONTAJE ANILLOS FRICCIONALES

Dado que los disipadores de energía tipo anillo friccional solo acomodan deformaciones axialmente, es necesario que el dispositivo tenga una guía interna o externa a los anillos para evitar el pandeo transversal de la pila de anillos. Esta guía debe proporcionar espacio radial suficiente para acomodar la contracción y dilatación de los anillos. Es preferible que la guía sea interna, como se muestra en la Figura 3.5, porque es posible verificar que la pila de anillos esté alineada axialmente.

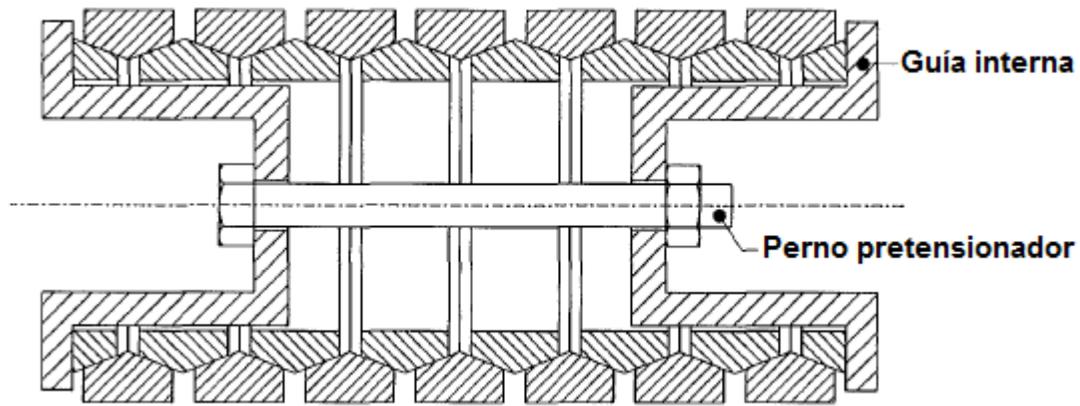


Figura 3.5: Montaje anillos friccionales. Hill, K., 1995.

3.4. PRECOMPRESIÓN MÍNIMA REQUERIDA

Si bien teóricamente se pueden materializar disipadores de anillos friccionales con fuerza de precompresión nula, en la práctica no es factible, puesto que los anillos pueden no estar perfectamente alineados ni en contacto en toda su superficie, por lo que para pequeñas deformaciones se observarían rigideces menores a las teóricas. Por esta razón, el sistema requiere una fuerza de precompresión mínima ($P_{\%MIN}$), tal que el disipador no presente variación en su rigidez de carga, como se muestra en la Figura 3.6, y se comporte de acuerdo con el modelo histerético planteado. La precompresión mínima se expresa en porcentaje con respecto a la fuerza última del disipador (F_U). Por otro lado, los fabricantes además limitan la pretensión máxima ($P_{\%MAX}$) para no dañar la película de lubricante en las superficies cónicas. La precompresión máxima se expresa en porcentaje con respecto a la fuerza última del disipador (F_U).

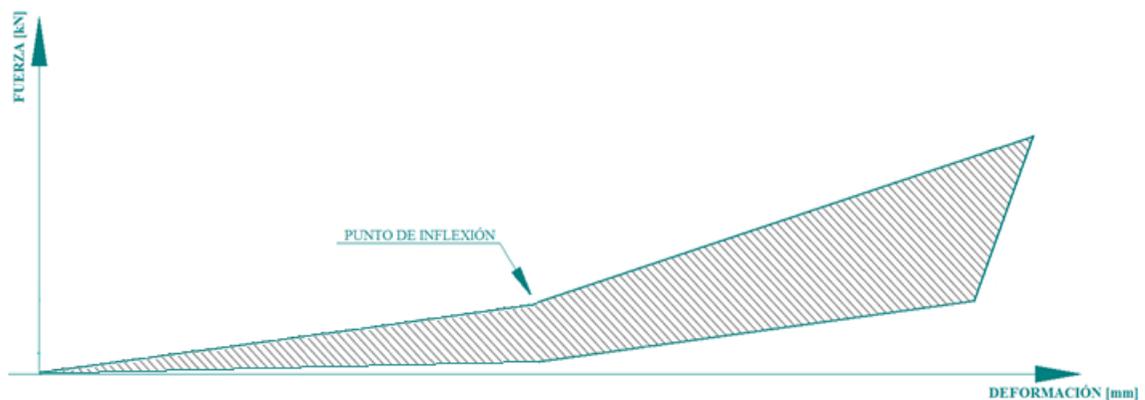


Figura 3.6: Variación en Rigidez Inicial por anillos sin pleno contacto.

3.5. ECUACIONES DE RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO HISTERÉTICO

En el caso de un incremento de cargas en compresión, las fuerzas actuando sobre un anillo interno corresponden a las mostradas en la Figura 3.7. La rigidez del anillo friccional se obtiene de la deducción realizada por Wahl (1963).

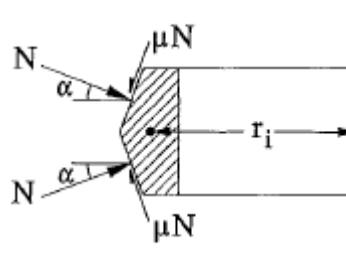


Figura 3.7: Fuerzas en anillo interno. Hill, K., 1995.

La fuerza total radial actuando sobre el anillo interno es igual a:

$$2(N \cos \alpha - \mu N \sin \alpha) \quad (3.1)$$

La carga radial por unidad de longitud (ρ) se obtiene al dividir la fuerza total radial por el perímetro del radio medio (r_i). Así:

$$\rho = \frac{N(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{\pi r_i} \quad (3.2)$$

Para un anillo delgado, el esfuerzo de compresión sobre el área de la sección transversal (área achurada Figura 3.7) del anillo interior (A_i) será:

$$\sigma_c = \frac{\rho r_i}{A_i} \quad (3.3)$$

Por otro lado, la carga axial sobre los anillos friccionales es igual a:

$$P = N(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \quad (3.4)$$

Reemplazando 3.2 y 3.4 en 3.3.

$$\sigma_c = \frac{P}{\pi A_i} \frac{1 - \mu \tan \alpha}{\tan \alpha + \mu} \quad (3.5)$$

Análogamente, el esfuerzo de tracción sobre el área de la sección transversal del anillo exterior (A_o) es:

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi A_o} \frac{1 - \mu \tan \alpha}{\tan \alpha + \mu} \quad (3.6)$$

La deformación axial total de los anillos internos se puede determinar, en forma aproximada, usando la ecuación (3.7), que depende del esfuerzo de compresión en los anillos, el módulo de elasticidad (E) del anillo interno y el radio medio (r_m) definido como el promedio entre el radio medio interno y externo. Esta expresión está amplificada por $2n_i$, ya que son 2 superficies de contacto por el total de anillos internos (n_i), y dividida por la tangente del ángulo de inclinación de las superficies para obtener la deformación axial.

$$\delta_i = \frac{2\sigma_c r_m n_i}{E \tan \alpha} \quad (3.7)$$

Similarmente, para las deformaciones axiales totales de los anillos externos es igual a:

$$\delta_o = \frac{2\sigma_t r_m n_o}{E \tan \alpha} \quad (3.8)$$

Sumando 3.7 y 3.8 se obtienen las deformaciones axiales totales. Por otro lado, dado que el número de anillos externos e internos es la misma, se puede reemplazar la expresión por el número de elementos (n_e), que corresponde al doble de la cantidad de anillos internos o externos.

$$\delta = \frac{r_m n_e}{E \tan \alpha} (\sigma_c + \sigma_t) \quad (3.9)$$

Reemplazando 3.5 y 3.6 en 3.9:

$$\delta = \frac{P r_m n_e}{\pi A_i E} \left(1 + \frac{A_i}{A_o}\right) \frac{1 - \mu \tan \mu}{\tan \alpha (\tan \alpha + \mu)} \quad (3.10)$$

Entonces se tiene que la rigidez axial en compresión de los anillos viene dada por:

$$K_1 = \frac{P}{\delta} = \frac{\pi E}{r_m n_e} \frac{A_i}{\left(1 + \frac{A_i}{A_o}\right)} \frac{\tan \alpha (\tan \alpha + \mu)}{1 - \mu \tan \mu} \quad (3.11)$$

Similarmente se obtiene la rigidez en descompresión de los anillos, salvo que el módulo de la fuerza de roce es contrario, así:

$$K_2 = \frac{\pi E}{r_m n_e} \frac{A_i}{\left(1 + \frac{A_i}{A_o}\right)} \frac{\tan \alpha (\tan \alpha - \mu)}{1 + \mu \tan \mu} \quad (3.12)$$

Dado que la noción de compresión y tracción del disipador no implica la misma acción para los anillos, se entiende como rigidez de carga del disipador (K_1) al caso cuando los anillos son sometidos a esfuerzos de compresión y rigidez de descarga (K_2) al caso cuando los anillos se descomprimen.

Dadas las alturas del anillo externo (h_o) e interno (h_i), es posible determinar la deformación máxima por cada elemento (s_e) y, por consiguiente, la deformación

máxima sin precomprimir el dissipador (s_{tot}). De acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 3.8, se tiene que:

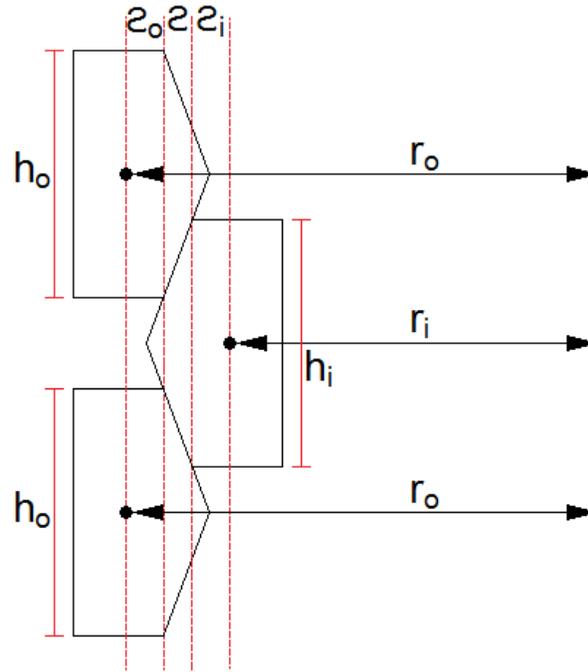


Figura 3.8: Esquema para obtener deformación máxima por elemento.

$$s_e = \frac{\min(h_o, h_i)}{2} - \frac{z}{\tan(\alpha)} \quad (3.13)$$

$$z = (r_o - r_i) - (z_o + z_i) \quad (3.14)$$

$$z_o = \frac{48A_o^2 - 24A_o h_o^2 \tan(\alpha) - h_o^2 \tan^2(\alpha)}{96A_o h_o} \quad (3.15)$$

$$z_i = \frac{48A_i^2 - 24A_i h_i^2 \tan(\alpha) - h_i^2 \tan^2(\alpha)}{96A_i h_i} \quad (3.16)$$

Por lo tanto, la deformación máxima sin precomprimir queda determinada por:

$$s_{tot} = s_e \cdot n_e \quad (3.17)$$

A su vez, es posible determinar la altura por elemento (h_e) y por el total de elementos (h_{tot}) sin precomprimir, según:

$$h_e = \frac{h_o + h_i}{2} - 2 \frac{z}{\tan(\alpha)} \quad (3.18)$$

$$h_{tot} = h_e \cdot n_e \quad (3.19)$$

Asumiendo conocidos el área transversal del perno precomprimidor (A_{PC}) y el módulo de elasticidad del perno (E_{PC}), se determina su rigidez (K_{P0}) de acuerdo con:

$$K_{P0} = \frac{E_{PC} \cdot A_{PC}}{h_{tot}} \quad (3.20)$$

Conocida la rigidez del perno precomprimidor (K_{P0}) se puede determinar la rigidez elástica del disipador según:

$$K_0 = K_1 + K_{P0} \quad (3.21)$$

De acuerdo con Hill (1995), el amortiguamiento histerético de un disipador de energía tipo anillo friccional viene dado por la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{(\tan \alpha - \mu)(1 - \mu \tan \alpha)}{(1 + \mu \tan \mu)(\tan \alpha + \mu)} \quad (3.22)$$

3.6. DISPONIBILIDAD DE DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO ANILLO FRICCIONAL

Para determinar las propiedades de los anillos friccionales se debe considerar las geometrías y materiales disponibles en el mercado. En particular, se requiere conocer 4 variables: el tipo de anillo, el amortiguamiento (nivel de fricción entre anillos), el número de elementos (cantidad total de superficies de contacto entre anillos) y la precompresión aplicada. El tipo de anillo queda definido por su geometría, incluido diámetro externo e interno, el ángulo de la superficie cónica (α) y el área de la sección transversal de cada anillo. De esta forma, los parámetros del modelo histerético que son dependientes del tipo de anillo son: las rigideces (K_0, K_1 y K_2), la fuerza última (F_U) y el recorrido total no precomprimido (s_{tot}). Similarmente, el amortiguamiento es otro parámetro del cual depende la rigidez y la fuerza última. Por otro lado, el número de elementos es parámetro de la rigidez y deformación máxima posible. Por último, la precompresión ($P_{\%}$) define la fuerza de precompresión (F_p), el recorrido precomprimido (Δ) y el recorrido disponible (s). La precompresión se expresa en porcentaje con respecto la porción que F_p es de F_U . Las propiedades que dependen de la precompresión se pueden obtener de las siguientes ecuaciones:

$$F_p = F_U \cdot P_{\%} \quad (3.23)$$

$$\Delta = s_{tot} \cdot (1 - P_{\%}) \quad (3.24)$$

$$s = s_{tot} \cdot P_{\%} \quad (3.25)$$

La Figura 3.9 muestra los parámetros antes descritos de los disipadores y su significado en el modelo histerético.

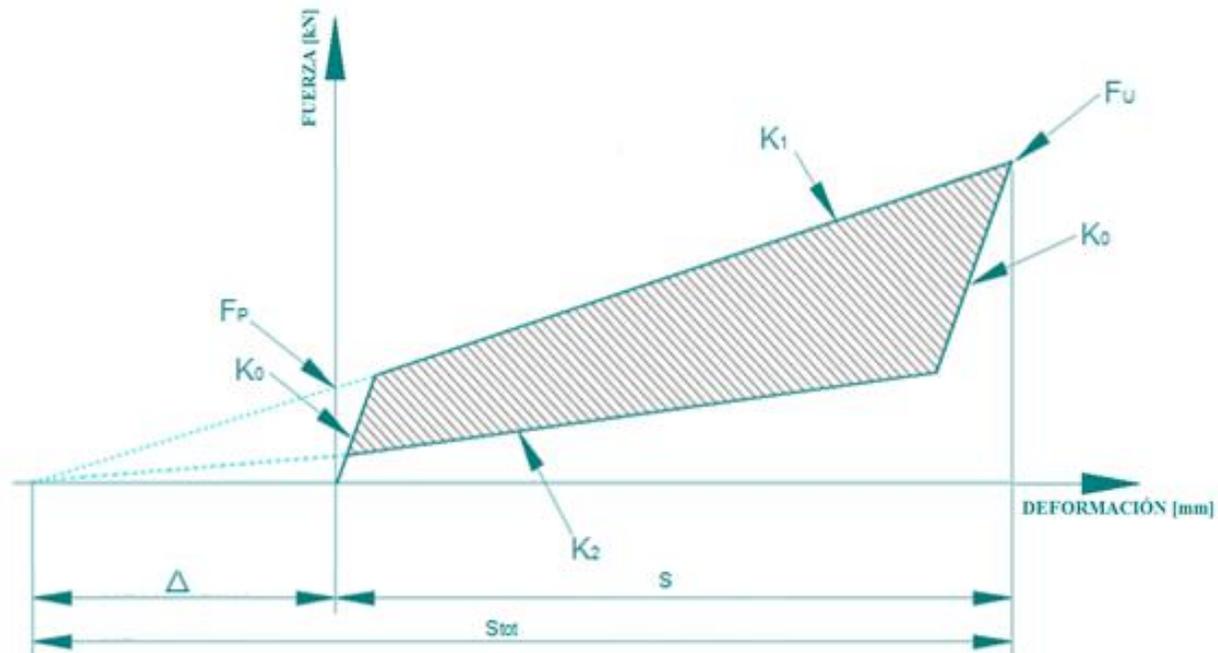


Figura 3.9: Modelo histerético y variables.

CAPITULO 4 MODELO DINÁMICO NO-LINEAL

4.1. INTRODUCCIÓN

Para definir la metodología de análisis y diseño de los disipadores de energía requeridos para la protección sísmica de los equipos estudiados, se asume que los equipos se pueden modelar como una columna cantiléver con su masa traslacional concentrada en su extremo superior no empotrado, concordante con la ubicación del centro de masa del equipo. Los disipadores de anillos friccionales considerados en esta investigación se utilizan además como parte de los apoyos para el equipo. Se asume que los disipadores de energía se deforman siguiendo el movimiento de un plano sin masa, infinitamente rígido, cuyo origen de sistema coordenado coincide con el punto de empotramiento de la columna cantiléver utilizada para modelar la flexibilidad del equipo. En el análisis se consideran los desplazamientos de traslación del centro de masas del equipo en las 3 direcciones principales. La Figura 4.1 muestra el sistema conformado por el equipo y los disipadores de energía.

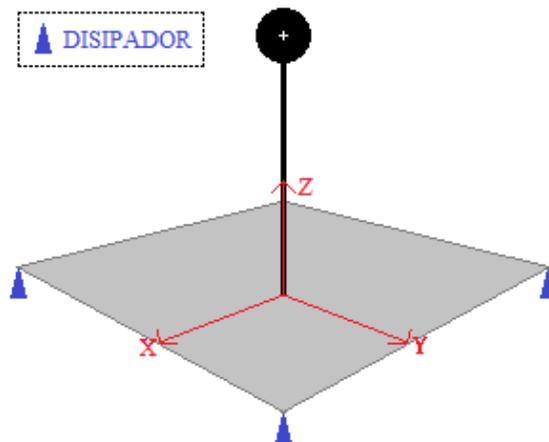


Figura 4.1: Modelo sistema equipo-disipadores.

Dado que un equipo puede ser muy rígido en la dirección vertical, con respecto a las dos direcciones horizontales principales, la presente metodología considera como alternativa la opción de asumir infinitamente rígida la componente vertical, para simplificar el estudio y prevenir problemas de convergencia numérica.

En este capítulo se desarrolla el planteamiento para resolver numéricamente las respuestas en el tiempo de un equipo genérico montado sobre disipadores de energía tipo anillo friccional de acuerdo con el modelo antes descrito.

4.2. MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL

Se definen los vectores $\{u\}$ y $\{u_D\}$ como los desplazamientos de los grados de libertad dinámicos y cinemáticos tanto en el centro de masa del equipo como en el extremo superior de los disipadores, respectivamente, tal como se muestra en la Figura 4.2. En particular, se tiene que el vector $\{u\}$ contiene los grados de libertad dinámicos del equipo.

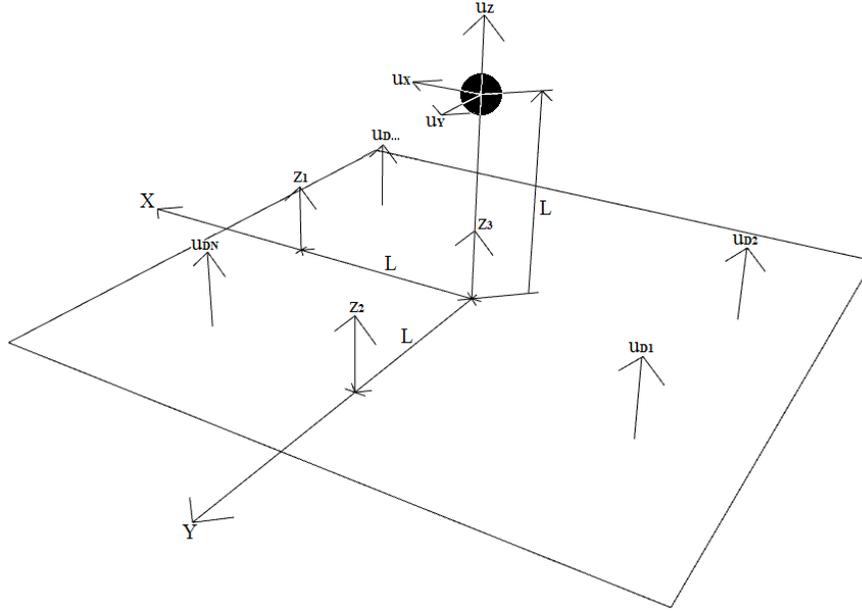


Figura 4.2: Modelo sistema equipo-disipadores y sus grados de libertad.

Las deformaciones de los disipadores se asumen ocurriendo dentro de un mismo plano, por lo que se puede conocer el vector de deformaciones $\{u_D\}$ de los disipadores a partir de los desplazamientos verticales de 3 puntos arbitrarios z_1 , z_2 y z_3 (ver Figura 4.2), ubicados en el plano localizado en la base del equipo, en coordenadas, también arbitrarias, $(L, 0)$, $(0, L)$ y $(0, 0)$, respectivamente, donde L corresponde a la altura del centro de masa del equipo.

La ecuación del plano correspondiente a 3 puntos arbitrarios escogidos para el j -ésimo disipador con coordenadas basales (x_j, y_j) y deformación u_{Dj} está dada por:

$$\begin{vmatrix} x_j & y_j & u_{Dj} - z_3 \\ L & 0 & z_1 - z_3 \\ 0 & L & z_2 - z_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (4.1)$$

La ecuación que se obtiene al resolver (4.1) es:

$$(u_{Dj} - z_3)L^2 - x_jL(z_1 - z_3) - y_jL(z_2 - z_3) = 0 \quad (4.2)$$

Entonces u_{Dj} se obtiene al despejar (4.2), así:

$$u_{Dj} = \frac{z_1 - z_3}{L} x_j + \frac{z_2 - z_3}{L} y_j + z_3 \quad (4.3)$$

Reordenando (4.3) se obtiene que:

$$u_{Dj} = \frac{x_j}{L} \cdot z_1 + \frac{y_j}{L} \cdot z_2 + \frac{L - x_j - y_j}{L} \cdot z_3 \quad (4.4)$$

Por lo tanto:

$$u_{Dj} = A_j \cdot z_1 + B_j \cdot z_2 + C_j \cdot z_3 \quad (4.5)$$

$$u_{Dj} = \{A_j \ B_j \ C_j\} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

Con:

$$A_j = \frac{x_j}{L} \quad (4.7)$$

$$B_j = \frac{y_j}{L} \quad (4.8)$$

$$C_j = \frac{L - x_j - y_j}{L} \quad (4.9)$$

Así el vector de deformación de disipadores queda determinado por:

$$\{u_D\} = [\aleph] \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

Se define la matriz de interpolación del plano para los n disipadores totales como:

$$[\aleph] = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n & B_n & C_n \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Se define la relación de esbeltez promedio del equipo con respecto a la distancia entre los apoyos como:

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{L}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}}{n} \quad (4.12)$$

Considerando que el centro de gravedad de la superficie conformada por los apoyos perimetrales se encuentra ubicado en las coordenadas (x_{CGS}, y_{CGS}) , se define la excentricidad de los apoyos como:

$$e = \frac{\sqrt{x_{CGS}^2 + y_{CGS}^2}}{L} \quad (4.13)$$

De acuerdo con la Figura 4.3 se pueden establecer los desplazamientos horizontales de la masa concentrada $\{u_p\}$ debido a las deformaciones del plano, determinados por los desplazamientos de referencia z_1 , z_2 y z_3 . Considerando pequeñas deformaciones en el plano donde trabajan los disipadores:

$$u_{px} = z_3 - z_1 \quad (4.14)$$

$$u_{py} = z_3 - z_2 \quad (4.15)$$

$$u_{pz} = z_3 \quad (4.16)$$

Ordenando (4.14), (4.15) y (4.16) matricialmente:

$$\begin{Bmatrix} u_{px} \\ u_{py} \\ u_{pz} \end{Bmatrix} = \{u_p\} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

Entonces, las deformaciones de los 3 puntos arbitrarios del plano, escogidos en función del vector de deformación del centro de masa del equipo debido a la deformación del plano de disipadores, equivalen a:

$$\begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \{u_p\} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \{u_p\} \quad (4.18)$$

Se define la matriz de compatibilización, la cual asocia las deformaciones del plano de disipadores con las deformaciones del centro de masa del equipo:

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

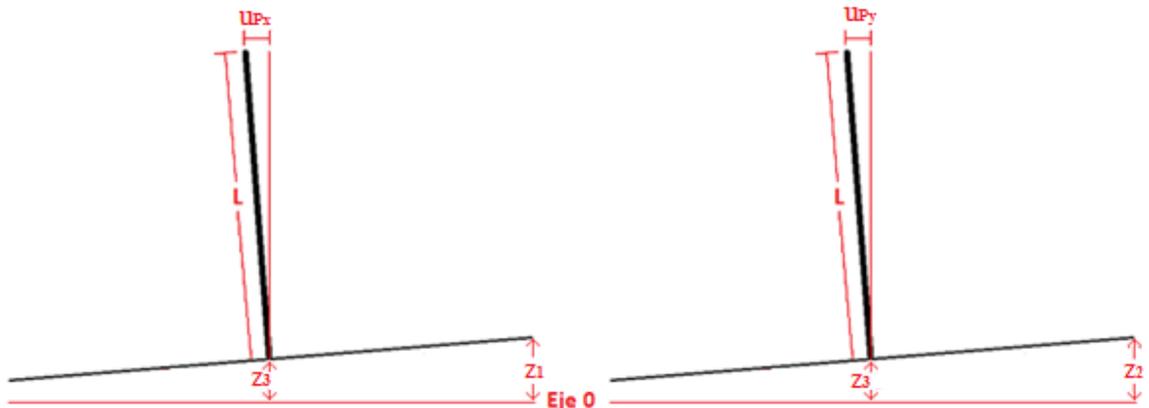


Figura 4.3: Desplazamiento de Centro de Masa de equipo debido a rotaciones del plano, de acuerdo con desplazamientos z_1 , z_2 y z_3 .

Entonces de (4.10), (4.11), (4.18) y (4.19):

$$\{u_D\} = [\mathbf{K}][\lambda]\{u_p\} \quad (4.20)$$

que es la expresión que relaciona el vector de deformaciones de los disipadores con el vector desplazamientos en el centro de masa del equipo por los desplazamientos del plano de disipadores.

Al igual que los desplazamientos de los disipadores, las fuerzas en los disipadores $\{F_D\}$ pueden ser expresadas a partir de un set de 3 fuerzas ficticias $\{F_P\}$ aplicadas en los 3 puntos de referencia que definieron el plano en la ecuación (4.1), relacionadas con las fuerzas externas actuando sobre el equipo. En la Figura 4.4 se muestran las fuerzas que generan momentos respecto al eje Y.

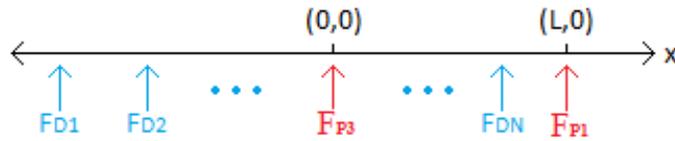


Figura 4.4: Fuerzas sobre plano XZ de los disipadores.

Realizando sumatoria de momentos sobre el origen se obtiene que:

$$F_{P1} \cdot L + \sum_{j=1}^N x_j \cdot F_{Dj} = 0 \quad (4.21)$$

$$F_{P1} = -\{A\}^T \cdot \{F_D\} \quad (4.22)$$

Cabe destacar que las fuerzas externas sobre el centro de gravedad del equipo generan momentos y fuerza vertical sobre el origen, pero no se consideran en el subsistema entre las fuerzas de los disipadores y las fuerzas ficticias sobre el plano, ya que están implícitos en las fuerzas de los disipadores. Por otro lado, si se resuelve de forma similar, pero esta vez realizando la sumatoria de momentos en torno al eje X, se tiene que:

$$F_{P2} = -\{B\}^T \cdot \{F_D\} \quad (4.23)$$

Realizando una sumatoria de fuerzas en la dirección Z:

$$\sum_{j=1}^N F_{Dj} + F_{P1} + F_{P2} + F_{P3} = 0 \quad (4.24)$$

$$F_{P3} = -(\{1\}^T \cdot \{F_D\} - \{A\}^T \cdot \{F_D\} - \{B\}^T \cdot \{F_D\}) = -\{C\}^T \cdot \{F_D\} \quad (4.25)$$

Se concluye entonces que:

$$\begin{Bmatrix} F_{P1} \\ F_{P2} \\ F_{P3} \end{Bmatrix} = \{F_P\} = -[N]^T \{F_D\} \quad (4.26)$$

Por otro lado, a partir de la Figura 4.5 se puede establecer la relación entre las resultantes de fuerzas en el plano $\{F_P\}$ y las fuerzas actuando sobre la masa $\{F\}$.

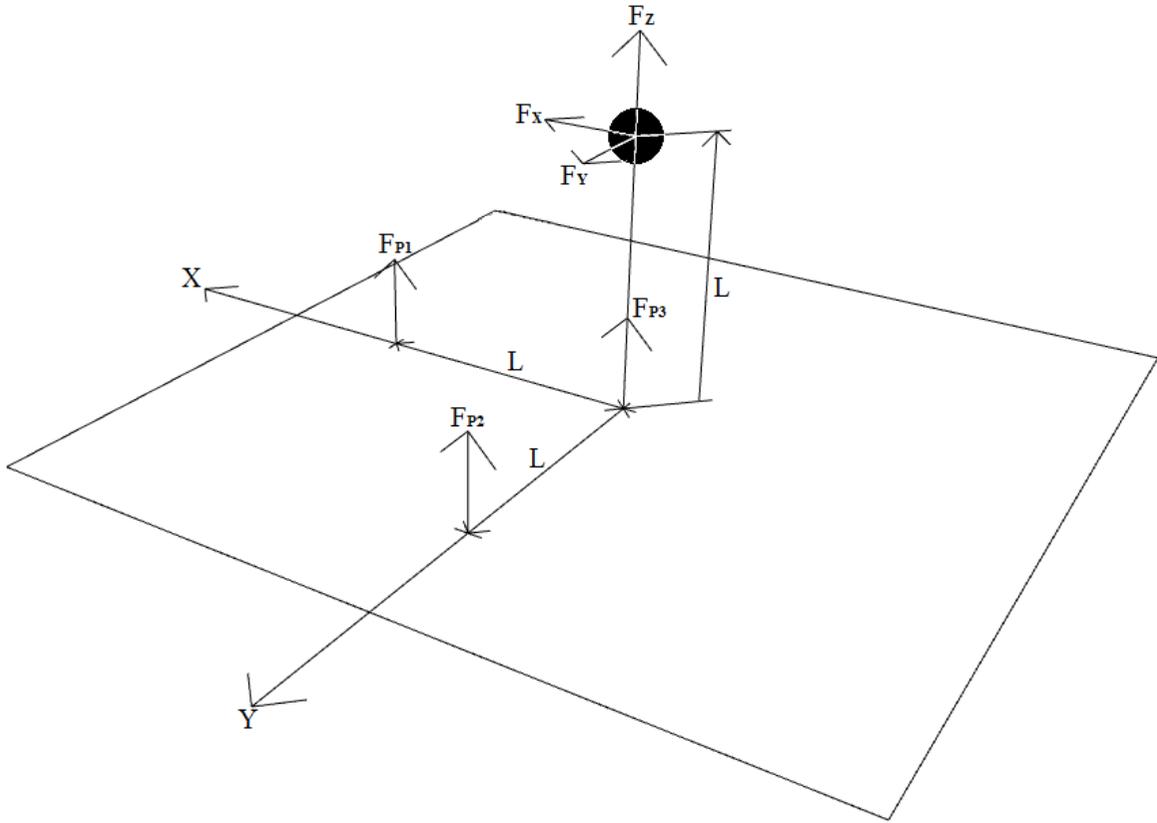


Figura 4.5: Relación fuerzas sobre la masa y fuerzas ficticias en el plano.

De la sumatoria de momentos respecto al eje Y se tiene que:

$$F_{P1} = F_x \quad (4.27)$$

Análogamente, efectuando sumatoria de momentos respecto al eje X:

$$F_{P2} = F_y \quad (4.28)$$

Realizando una sumatoria de fuerzas en la dirección Z:

$$F_z + F_{P1} + F_{P2} + F_{P3} = 0 \quad (4.29)$$

$$F_z = -(F_{P1} + F_{P2} + F_{P3}) \quad (4.30)$$

$$\{F\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{P1} \\ F_{P2} \\ F_{P3} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{P1} \\ F_{P2} \\ F_{P3} \end{Bmatrix} \quad (4.31)$$

$$\{F\} = -[\lambda]^T \{F_p\} \quad (4.32)$$

La Figura 4.6 muestra el comportamiento histerético de un disipador de anillo friccional descrito en el capítulo 3.

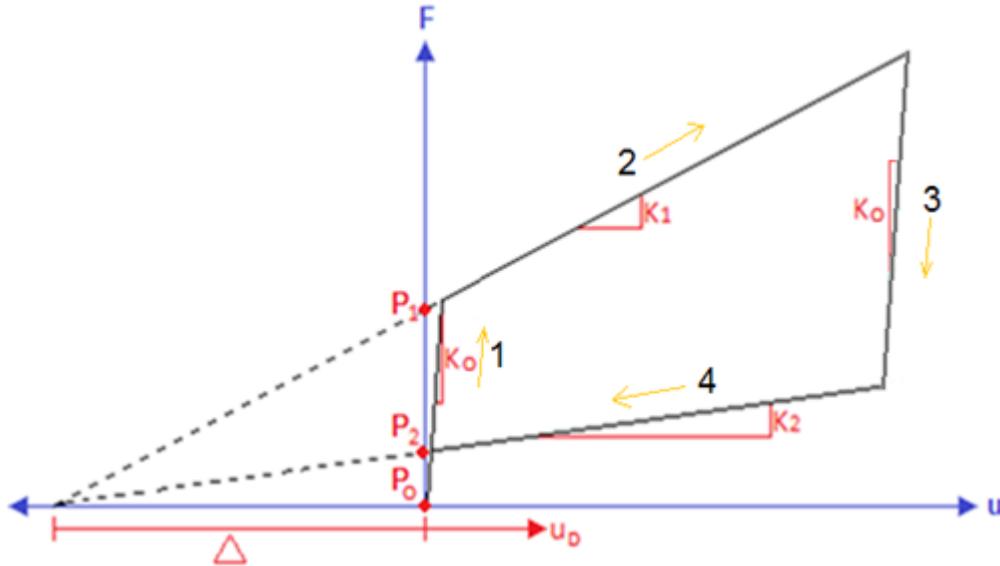


Figura 4.6: Comportamiento histerético en compresión del disipador.

De acuerdo con la Figura anterior, la fuerza en el j -ésimo disipador está dada por la deformación del disipador y la rigidez en cada rama de la histéresis K_j , más una fuerza resultante de la proyección de cada rama de la histéresis sobre el eje de las ordenadas. No obstante, si se considera el incremental de la fuerza ΔF_{D_j} y el incremental de la deformación Δu_{D_j} del j -ésimo disipador la relación es lineal, y, por lo tanto:

$$\Delta F_{D_j} = K_j \cdot \Delta u_{D_j} \quad (4.33)$$

Entonces, el vector incremental de fuerzas de los disipadores está dado por:

$$\{\Delta F_D\} = [K_g] \{\Delta u_D\} \quad (4.34)$$

donde $[K_g]$ es una matriz que en su diagonal contiene la rigidez en cada rama de la histéresis de cada disipador.

Utilizando (4.20) en (4.34) y luego pre-multiplicando por $[\lambda]^T [\mathfrak{N}]^T$:

$$[\lambda]^T [N]^T \{\Delta F_D\} = [\lambda]^T [\mathfrak{N}]^T [K_g] [\mathfrak{N}] [\lambda] \{\Delta u_p\} \quad (4.35)$$

Más aún, las relaciones de (4.26) y (4.32) son válidas para incrementales, entonces utilizando estas dos relaciones en (4.35):

$$\{\Delta F\} = [K_p] \{\Delta u_p\} \quad (4.36)$$

Definiendo como rigidez global del plano ($[K_p]$) a:

$$[K_p] = [\lambda]^T [\mathfrak{N}]^T [K_g] [\mathfrak{N}] [\lambda] \quad (4.37)$$

Realizando la multiplicación matricial se puede verificar que la rigidez vertical del plano es igual a la suma de las rigideces de todos los disipadores.

Denominando $\{\Delta u_E\}$ a los desplazamientos del centro de masas debido a la deformación del equipo, $[K_E]$ a la matriz de rigidez del equipo y $\{\Delta u\}$ al vector incremental de desplazamientos totales de la masa, se tiene que:

$$\{\Delta u_E\} = \begin{Bmatrix} \Delta u_{xE} \\ \Delta u_{yE} \\ \Delta u_{zE} \end{Bmatrix} \quad (4.38)$$

$$\{\Delta u\} = \{\Delta u_E\} + \{\Delta u_P\} \quad (4.39)$$

$$[K_E] = 4\pi^2 m \begin{bmatrix} \frac{1}{T_x^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_y^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_z^2} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

$$\{\Delta F\} = [K_E]\{\Delta u_E\} \quad (4.41)$$

Las variables T_x , T_y y T_z corresponden a los periodos de vibrar del equipo en las componentes principales X, Y y Z, respectivamente.

Utilizando (4.39) y las relaciones inversas de (4.36) y (4.41) se obtiene que:

$$\{\Delta u\} = [K_E]^{-1}\{\Delta F\} + [K_p]^{-1}\{\Delta F\} = \left([K_E]^{-1} + [K_p]^{-1}\right)\{\Delta F\} \quad (4.42)$$

Se define entonces como rigidez global a:

$$[K_T] = \left([K_E]^{-1} + [K_p]^{-1}\right)^{-1} \quad (4.43)$$

Utilizando la relación (4.35) en (4.41) se tiene que:

$$\{\Delta u\} = [K_T]^{-1}[K_p]\{\Delta u_P\} \quad (4.44)$$

$$\{\Delta u_P\} = [K_p]^{-1}[K_T]\{\Delta u\} = [\alpha_p]\{\Delta u\} \quad (4.45)$$

Análogamente:

$$\{\Delta u_E\} = [K_E]^{-1}[K_T]\{\Delta u\} = [\alpha_E]\{\Delta u\} \quad (4.46)$$

Se define entonces como matriz de correlación de desplazamientos del equipo ($[\alpha_E]$) y matriz de correlación de desplazamientos del plano ($[\alpha_p]$) como:

$$[\alpha_p] = [K_p]^{-1}[K_T] \quad (4.47)$$

$$[\alpha_E] = [K_E]^{-1}[K_T] \quad (4.48)$$

4.3. MATRIZ GEOMÉTRICA

Dado que en muchos casos es necesario considerar efectos de segundo orden debido a la esbeltez de los equipos, es preciso incorporar una matriz complementaria a la de rigidez denominada matriz geométrica ($[K_\Delta]$), la cual induce un nuevo equilibrio de fuerzas, pero esta vez diferencial (McGuire, 2000):

$$([K_T] + [K_\Delta])\{du\} = \{dF\} \quad (4.49)$$

Para pequeños incrementos se puede asumir:

$$([K_T] + [K_\Delta])\{\Delta u\} = \{\Delta F\} \quad (4.50)$$

La validez de la solución encontrada mediante (4.50) depende del tamaño del intervalo, ya que como se muestra en la Figura 4.7, la solución real de (4.49) y la calculada mediante (4.50) tendrá un error asociado. Este error disminuye a medida que los intervalos de tiempo considerados son más pequeños.

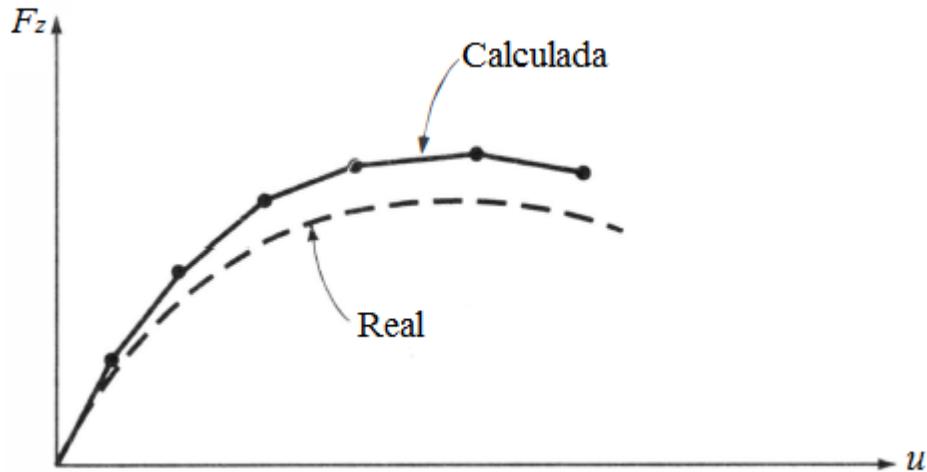


Figura 4.7: Comparación entre solución aproximada y real para ecuación de segundo orden, McGuire (2000).

La matriz geométrica viene dada por la siguiente integral (McGuire, 2000):

$$[K_\Delta] = F_\xi \int_0^L \left(\frac{d\delta u_x}{d\xi} \cdot \frac{du_x}{d\xi} + \frac{d\delta u_y}{d\xi} \cdot \frac{du_y}{d\xi} + \frac{d\delta u_z}{d\xi} \cdot \frac{du_z}{d\xi} \right) d\xi \quad (4.51)$$

donde F_ξ es la fuerza axial a lo largo del elemento, la cual para una columna empotrada corresponde a la fuerza vertical (F_z).

Si se utilizan funciones de forma ($\{N_u\}$), la expresión anterior se puede reescribir como:

$$[K_\Delta] = F_z \int_0^L \left(\left\{ \frac{dN_{u_x}}{d\xi} \right\}^T \left\{ \frac{dN_{u_x}}{d\xi} \right\} + \left\{ \frac{dN_{u_y}}{d\xi} \right\}^T \left\{ \frac{dN_{u_y}}{d\xi} \right\} + \left\{ \frac{dN_{u_z}}{d\xi} \right\}^T \left\{ \frac{dN_{u_z}}{d\xi} \right\} \right) d\xi \quad (4.52)$$

Por lo tanto, es necesario establecer funciones de forma, como la mostrada en la Figura 4.8, donde se muestran las deformaciones asociadas a los desplazamientos del plano (corrimientos de una barra infinitamente rígida) más las deformaciones del equipo. No obstante, en esta última se considera que las deformaciones son análogas a una estructura de corte, dada la simplicidad de obtener las constantes de las funciones de forma.

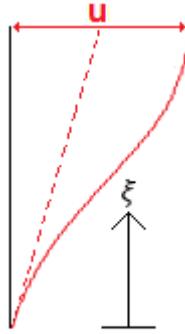


Figura 4.8: Deformadas con respecto a la altura.

El problema de este planteamiento es que la función de forma depende de las deformaciones del plano y del equipo independientemente, por lo que no es trivial combinar los desplazamientos totales del centro de masa del equipo en una sola variable. Este problema se puede resolver separando el sistema en 2 subsistemas de segundo orden, que en su conjunto forman el sistema total. De esta forma, se tienen 2 nuevas ecuaciones diferenciales de equilibrio (sistema con resortes en serie), con dos matrices geométricas nuevas, una para las deformaciones del plano ($[K_{\Delta P}]$) y la otra para las deformaciones del equipo ($[K_{\Delta E}]$):

$$([K_E] + [K_{\Delta E}])\{\Delta u_E\} = \{\Delta F\} \quad (4.53)$$

$$([K_P] + [K_{\Delta P}])\{\Delta u_P\} = \{\Delta F\} \quad (4.54)$$

Las deformaciones utilizadas para las nuevas funciones de forma se muestran en la Figura 4.9.

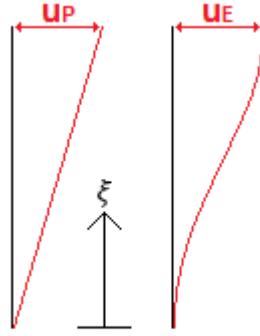


Figura 4.9: Deformadas con respecto a la altura según el Plano y Equipo.

Las funciones de forma para los desplazamientos del plano son:

$$u_{p_x}(\xi) = a \cdot \xi + b \quad (4.55)$$

$$u_{p_x}(0) = b = 0 \quad (4.56)$$

$$u_{p_x}(L) = u_{p_x} = aL \quad (4.57)$$

$$u_{p_x}(\xi) = \frac{u_{p_x}}{L} \xi \quad (4.58)$$

$$u_{p_x}(\xi) = \begin{Bmatrix} \xi \\ L \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{p_x} \\ u_{p_y} \\ u_{p_z} \end{Bmatrix} = \{N_{u_{p_x}}\} \begin{Bmatrix} u_{p_x} \\ u_{p_y} \\ u_{p_z} \end{Bmatrix} \quad (4.59)$$

Análogamente se tiene que:

$$u_{p_y}(\xi) = \begin{Bmatrix} 0 \\ \xi \\ L \\ 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{p_x} \\ u_{p_y} \\ u_{p_z} \end{Bmatrix} = \{N_{u_{p_y}}\} \begin{Bmatrix} u_{p_x} \\ u_{p_y} \\ u_{p_z} \end{Bmatrix} \quad (4.60)$$

Por otro lado:

$$u_{p_z}(\xi) = a \cdot \xi + b \quad (4.61)$$

$$u_{p_z}(0) = b = u_{p_z} \quad (4.62)$$

$$u_{p_z}(L) = u_{p_z} = aL + u_{p_z} \quad (4.63)$$

$$u_{p_z}(\xi) = u_{p_z} \quad (4.64)$$

$$u_{p_z}(\xi) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{p_x} \\ u_{p_y} \\ u_{p_z} \end{Bmatrix} = \{N_{u_{p_z}}\} \begin{Bmatrix} u_{p_x} \\ u_{p_y} \\ u_{p_z} \end{Bmatrix} \quad (4.65)$$

Las funciones de forma para las deformaciones del plano son:

$$\{N_{u_{px}}(\xi)\} = \left\{ \frac{\xi}{L} \quad 0 \quad 0 \right\} \quad (4.66)$$

$$\{N_{u_{py}}(\xi)\} = \left\{ 0 \quad \frac{\xi}{L} \quad 0 \right\} \quad (4.67)$$

$$\{N_{u_{pz}}(\xi)\} = \{0 \quad 0 \quad 1\} \quad (4.68)$$

Utilizando (4.52) con las funciones de forma en (4.66), (4.67) y (4.68), se tiene que:

$$[K_{\Delta P}] = F_z \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

Ahora bien, con respecto a los desplazamientos del equipo, se tiene que:

$$u_{E_x}(\xi) = a \cdot \xi^3 + b \cdot \xi^2 + c \cdot \xi + d \quad (4.70)$$

$$u_{E_x}(0) = d = 0 \quad (4.71)$$

donde el giro a lo largo del elemento está dado por:

$$u'_{E_x}(\xi) = 3a \cdot \xi^2 + 2b \cdot \xi + c \quad (4.72)$$

Dado el supuesto de una función de forma similar a las estructuras de corte, se obtiene un giro nulo en los extremos, así:

$$u'_E(0) = c = 0 \quad (4.73)$$

$$u'_{E_x}(L) = 3a \cdot L^2 + 2b \cdot L = 0 \quad (4.74)$$

$$b = -\frac{3a \cdot L}{2} \quad (4.75)$$

$$u_{E_x}(L) = a \cdot L^3 + -\frac{3a \cdot L}{2} \cdot L^2 = u_{E_x} \quad (4.76)$$

$$a = -\frac{2u_{E_x}}{L^3} \quad (4.77)$$

$$u_{E_x}(\xi) = -\frac{2u_{E_x}}{L^3} \cdot \xi^3 + \frac{3u_{E_x}}{L^2} \cdot \xi^2 \quad (4.78)$$

$$u_{E_x}(\xi) = \left\{ -\frac{2\xi^3}{L^3} + \frac{3\xi^2}{L^2} \quad 0 \quad 0 \right\} \begin{Bmatrix} u_{E_x} \\ u_{E_y} \\ u_{E_z} \end{Bmatrix} = \{N_{u_{E_x}}\} \begin{Bmatrix} u_{E_x} \\ u_{E_y} \\ u_{E_z} \end{Bmatrix} \quad (4.79)$$

Análogamente,

$$u_{E_y}(\xi) = \begin{Bmatrix} 0 & -\frac{2\xi^3}{L^3} + \frac{3\xi^2}{L^2} & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{E_x} \\ u_{E_y} \\ u_{E_z} \end{Bmatrix} = \{N_{u_{E_y}}\} \begin{Bmatrix} u_{E_x} \\ u_{E_y} \\ u_{E_z} \end{Bmatrix} \quad (4.80)$$

Por último, axialmente se tratar de una deformación lineal, de modo que:

$$u_{E_z}(\xi) = a \cdot \xi + b \quad (4.81)$$

$$u_{E_z}(0) = b = 0 \quad (4.82)$$

$$u_{E_z}(L) = u_{E_z} = aL \quad (4.83)$$

$$u_{E_z}(\xi) = \frac{u_{E_z}}{L} \xi \quad (4.84)$$

$$u_{E_z}(\xi) = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & \frac{\xi}{L} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{E_x} \\ u_{E_y} \\ u_{E_z} \end{Bmatrix} = \{N_u\} \begin{Bmatrix} u_{E_x} \\ u_{E_y} \\ u_{E_z} \end{Bmatrix} \quad (4.85)$$

Las funciones de forma para las deformaciones del equipo son:

$$\{N_{u_{p_x}}(\xi)\} = \begin{Bmatrix} -\frac{2\xi^3}{L^3} + \frac{3\xi^2}{L^2} & 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad (4.86)$$

$$\{N_{u_{p_y}}(\xi)\} = \begin{Bmatrix} 0 & -\frac{2\xi^3}{L^3} + \frac{3\xi^2}{L^2} & 0 \end{Bmatrix} \quad (4.87)$$

$$\{N_{u_{p_z}}(\xi)\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & \frac{\xi}{L} \end{Bmatrix} \quad (4.88)$$

Utilizando (4.52) con las funciones de forma en (4.86), (4.87) y (4.88), se tiene que:

$$[K_{\Delta E}] = F_z \begin{bmatrix} \frac{6}{5L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (4.89)$$

Utilizando la relación inversa de (4.53) y (4.54) en (4.40) se tiene que:

$$\{\Delta u\} = ([K_E] + [K_{\Delta E}])^{-1} \{\Delta F\} + ([K_P] + [K_{\Delta P}])^{-1} \{\Delta F\} \quad (4.90)$$

$$\{\Delta u\} = (([K_P] + [K_{\Delta P}])^{-1} + ([K_E] + [K_{\Delta E}])^{-1}) \{\Delta F\} \quad (4.91)$$

Por lo que se obtiene una matriz de rigidez global que incorpora los efectos de segundo orden:

$$[K_T] = (([K_P] + [K_{\Delta P}])^{-1} + ([K_E] + [K_{\Delta E}])^{-1})^{-1} \quad (4.92)$$

Utilizando la matriz de rigidez global de la ecuación (4.92) se redefinen (4.47) y (4.48) para incorporar los efectos de segundo orden:

$$[\alpha_p] = ([K_p] + [K_{\Delta p}])^{-1}[K_T] \quad (4.93)$$

$$[\alpha_E] = ([K_E] + [K_{\Delta E}])^{-1}[K_T] \quad (4.94)$$

4.4. EQUIPO INFINITAMENTE RÍGIDO VERTICALMENTE

En algunas condiciones particulares se puede asumir que la rigidez del equipo es infinita en su componente vertical, con lo que se puede considerar que:

$$[K_E] = \begin{bmatrix} \frac{4\pi^2 M}{T_x^2} & 0 \\ 0 & \frac{4\pi^2 M}{T_y^2} \end{bmatrix} \quad (4.95)$$

$$[K_{\Delta E}] = F_z \begin{bmatrix} \frac{6}{5L} & 0 \\ 0 & \frac{6}{5L} \end{bmatrix} \quad (4.96)$$

Pese a que el equipo se considere flexible solo en las direcciones X e Y, el conjunto que incluye a los disipadores tiene flexibilidad en las 3 direcciones ya que los disipadores están configurados verticalmente.

4.5. INTEGRACIÓN NUMÉRICA

En este estudio se utiliza el método de Newmark de aceleración constante, que presenta una estabilidad incondicional (Oller, 2014; Bathe & Wilson, 1973). En este método de integración numérica el incremento de velocidad relativa ($\{\Delta v_i\}$) y el incremento de aceleración absoluta ($\{\Delta a_i\}$) para el instante $t_{i+1} = t_i + \Delta t$, están dados por:

$$\Delta v_i = 2 \frac{\Delta u_i}{\Delta t} - 2v_i \quad (4.97)$$

$$\Delta a_i = 4 \frac{\Delta u_i}{\Delta t^2} - 4 \frac{v_i}{\Delta t} - 2a_i \quad (4.98)$$

Dado que se consideran efectos de segundo orden, es necesario utilizar la ecuación dinámica incremental, por lo que:

$$[M]\{\Delta a_i\} + [C]\{\Delta v_i\} + [K_T]\{\Delta u_i\} = \{\Delta F_i\} \quad (4.99)$$

Se consideran las siguientes condiciones iniciales:

$$\{u_0\} = \{0\} \quad (4.100)$$

$$\{v_0\} = \{0\} \quad (4.101)$$

$$\{a_0\} = \{0\} \quad (4.102)$$

Definiendo:

$$\Delta R a_i = 4 \frac{v_i}{\Delta t} + 2a_i \quad (4.103)$$

$$\Delta R v_i = 2v_i \quad (4.104)$$

Remplazando (4.97), (4.98), (4.100) y (4.101) en (4.99):

$$[M] \left\{ \frac{4}{\Delta t^2} \Delta u_i - R a_i \right\} + [C] \left\{ \frac{2}{\Delta t} \Delta u_i - R v_i \right\} + [K_T] \{\Delta u_i\} = \{\Delta F_i\} \quad (4.105)$$

La matriz de amortiguamiento $[C]$ es dependiente de la velocidad relativa del equipo (sin considerar la velocidad relativa del plano). No obstante, se asume válida la utilización de velocidad relativa del centro de masa, ya que los amortiguamientos se consideran pequeños y las respuestas en el tiempo no presentan grandes variaciones. Conocidos los amortiguamientos en las 3 direcciones principales del equipo (β_x, β_y y β_z) se tiene que:

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{4\pi m \beta_x}{T_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4\pi m \beta_y}{T_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4\pi m \beta_z}{T_z} \end{bmatrix} \quad (4.106)$$

La matriz de masa $[M]$ del sistema viene dada por:

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad (4.107)$$

Por otro lado, el incremental de fuerza $\{\Delta F_i\}$ para el instante $i + 1$ se determina a partir de la matriz de masa y la diferencia de aceleraciones del suelo $\{\Delta a_{gi}\}$ con respecto al instante anterior:

$$\{\Delta F_i\} = -[M]\{\Delta a_{gi}\} \quad (4.108)$$

Para el cálculo de la rigidez global se necesita conocer la fuerza vertical en el instante i (F_{z_i}), la cual se utiliza para obtener la matriz geométrica de rigidez inicial.

$$F_{z_i} = m (g - a_{g_{i_z}}) \quad (4.109)$$

Reordenando, se tiene que:

$$\left([K_T]_i + \frac{4}{\Delta t^2} [M] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \{\Delta u_i\} = \{\Delta F_i\} + \{Rv_i\} + \{Ra_i\} \quad (4.110)$$

Se define así:

$$\{\Delta R_i\} = \{\Delta F_i\} + \{Rv_i\} + \{Ra_i\} \quad (4.111)$$

$$[\tilde{K}_T]_i = [K_T]_i + \frac{4}{\Delta t^2} [M] + \frac{2}{\Delta t} [C] \quad (4.112)$$

Por lo que:

$$\{\Delta u_i\} = [\tilde{K}_T]_i^{-1} \{\Delta R_i\} \quad (4.113)$$

Dada la característica de tipo bilineal de la histéresis y su abrupto cambio de rigidez entre las ramas elásticas y de compresión, se requiere aplicar métodos de convergencia, tal como el Newton-Raphson (Chopra, 2014), que no siempre son convergentes en las transiciones entre las ramas del lazo histerético. Para prevenir este inconveniente, se puede aprovechar la forma de la histéresis del problema, que son tramos de líneas rectas, de tal forma de establecer un coeficiente γ (factor integración por tramos), tal que la integración se efectúe justo hasta el cambio de rigidez para luego seguir integrando.

Se definen $\Delta u_{Dv_j}^k$ como la deformación necesaria del j -ésimo disipador hasta un punto de cambio de rigidez, y $\Delta u_{D_j}^k$ como la deformación total del j -ésimo disipador en la k -ésima iteración. Si se cumple que:

$$\left| \Delta u_{Dv_j}^k \right| < \left| \Delta u_{D_j}^k \right| \quad (4.114)$$

entonces

$$\gamma^k = \text{MIN}_j \left(\frac{\Delta u_{Dv_j}^k}{\Delta u_{D_j}^k} \right) \quad (4.115)$$

Dada la característica de este planteamiento, habrá una iteración η donde la inecuación antes mencionada en (4.114) no se cumple para ningún disipador, por lo que se lograría la convergencia. De esta forma se tiene que:

$$\{\Delta u_i\} = \left([\tilde{K}_T]_i^{-1} \right)^\eta \{\Delta R_i\}^\eta + \sum_{k=1}^{\eta-1} \gamma^k \left([\tilde{K}_T]_i^{-1} \right)^k \{\Delta R_i\}^k \quad (4.116)$$

$$\{\Delta R_i\}^k = (1 - \gamma^k)\{\Delta R_i\}^{k-1} \quad (4.117)$$

donde:

$$\{\Delta R_i\}^0 = \{\Delta P_i\} + Rv_i + Ra_i \quad (4.118)$$

Finalmente, la aceleración del equipo ($\{a_E\}$) en el instante i está dada por:

$$\{a_{E_i}\} = [\alpha_E]_i \{a_i\} \quad (4.119)$$

Análogamente, la velocidad del equipo ($\{v_E\}$) está determinada por.

$$\{v_{E_i}\} = [\alpha_E]_i \{v_i\} \quad (4.120)$$

Para calcular la respuesta en el tiempo del equipo sin disipadores de energía se ocupa la siguiente rigidez equivalente:

$$[\tilde{K}_T]_i = [K_E] + [K_{\Delta E}]_i + \frac{4}{\Delta t^2} [M] + \frac{2}{\Delta t} [C] \quad (4.121)$$

La fuerza vertical utilizada en el cálculo de la matriz geométrica de rigidez inicial cuando el equipo no es infinitamente rígido verticalmente se calcula como:

$$F_{z_i} = F_{z_{i-1}} - ([K_E] + [K_{\Delta E}]_{i-1})\{\Delta u_{i-1}\} \quad (4.122)$$

$$F_{z_0} = -m \cdot g \quad (4.123)$$

Por último, en caso de un equipo infinitamente rígido verticalmente se utiliza la siguiente fuerza vertical para el cálculo de la respuesta en el tiempo sin disipadores:

$$F_{z_i} = m \cdot (a_{gi} - g) \quad (4.124)$$

4.6. CONSERVACIÓN DE ENERGÍA

Es necesario verificar que el método de integración numérica descrito en la sección (4.5) cumpla con la conservación de energía de acuerdo con Filiatrault & Tinawi (1992). Para esto se propone un equipo de masa 380 [kg], 355 [mm] de altura al centro de masa y 2 [%] de amortiguamiento para cada dirección principal. Las coordenadas de los apoyos se encuentran en la Tabla 4.1. Se analiza asumiendo frecuencias iguales en las 3 direcciones y para 3 valores de frecuencias, respectivamente 20, 30 y 40 [Hz]. La comprobación de la convergencia para estas frecuencias implica que para frecuencias menores se asegura de igual forma la convergencia.

Tabla 4.1: Coordenadas disipadores.

N° Disipador	X [mm]	Y [mm]
1	267	0
2	0	267
3	-267	0
4	0	-267

Se utiliza para cada punto de apoyo un mismo tipo de disipador con las propiedades descritas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Propiedades Disipadores.

Propiedad	Valor
K ₀	12.5 [kN]
K ₁	125.0 [N]
K ₂	42.5 [N]
n _e	100 [-]
P%	21 [%]
Stot	40 [mm]

Se simula 2 eventos sísmicos (descritos en la Tabla 4.3) para cada frecuencia considerada anteriormente.

Tabla 4.3: Registros análisis convergencia energética.

Estación	Fecha	M _w	Prof.	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA H [g]	PGA V [g]	MPS
CONCEPCION CENTRO ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.40	0.40	200
V02A ⁽²⁾	24-04-17	6.9	24	-33.09	-72.09	0.40	0.10	200

⁽¹⁾ Recuperado de <http://terremotos.ing.uchile.cl>

⁽²⁾ Recuperado de <http://evtdb.csn.uchile.cl>

Las Figuras 4.10 a 4.15 muestran la energía cinética, viscosa e histerética de los disipadores, para todas las frecuencias y eventos sísmicos considerados.

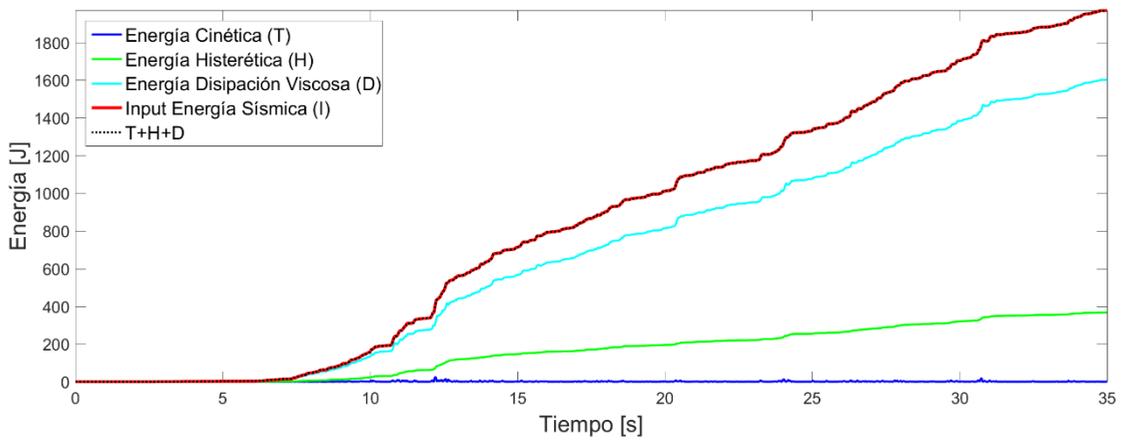


Figura 4.10: Conservación energía para equipo con periodos de 20 [Hz] y registro 27/02/10.

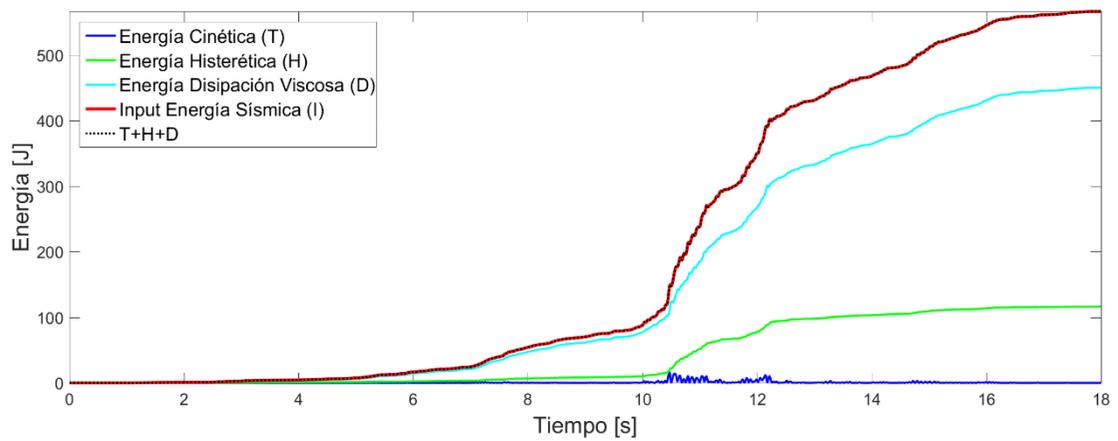


Figura 4.11: Conservación energía para equipo con periodos de 20 [Hz] y registro 24/04/17.

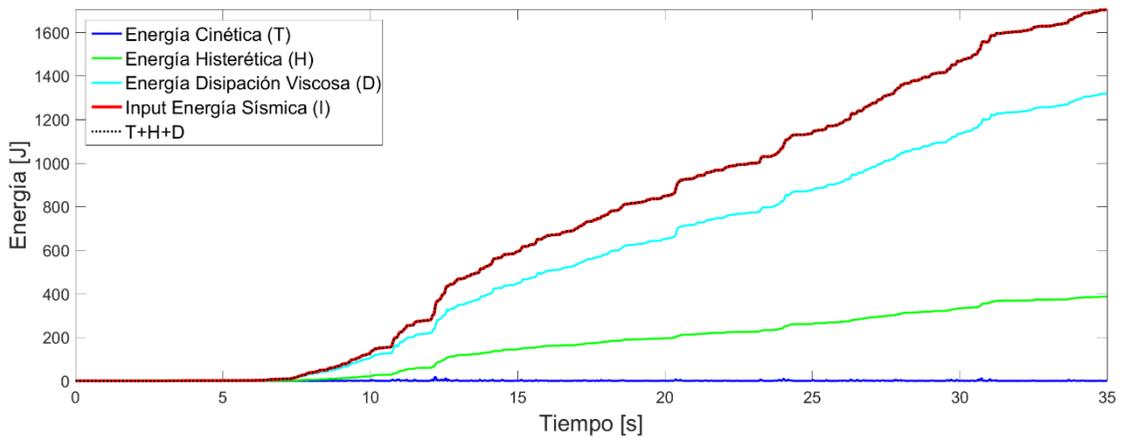


Figura 4.12: Conservación energía para equipo con periodos de 30 [Hz] y registro 27/02/10.

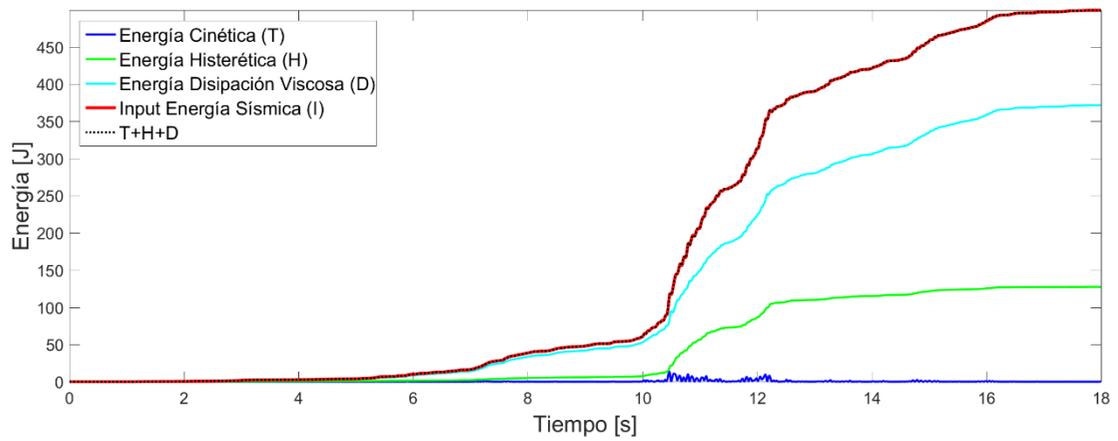


Figura 4.13: Conservación energía para equipo con periodos de 30 [Hz] y registro 24/04/17.

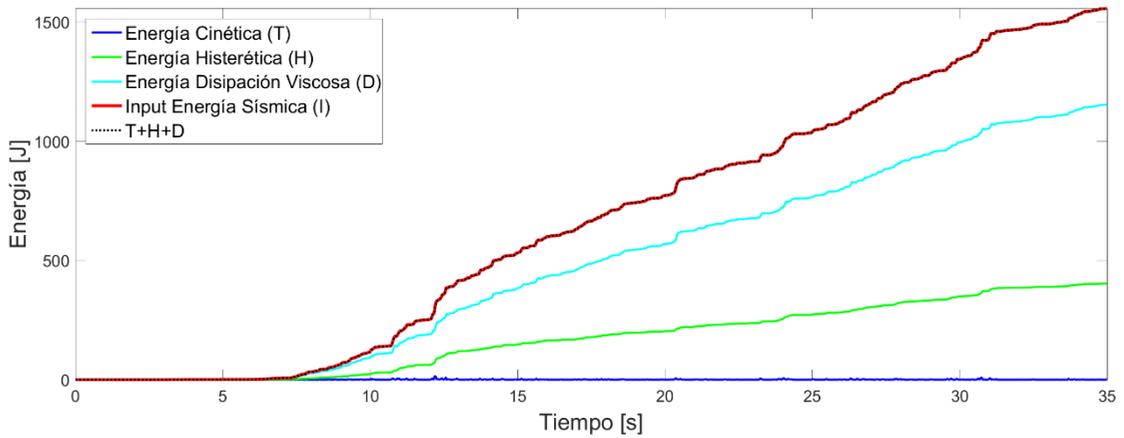


Figura 4.14: Conservación energía para equipo con periodos de 40 [Hz] y registro 27/02/10.

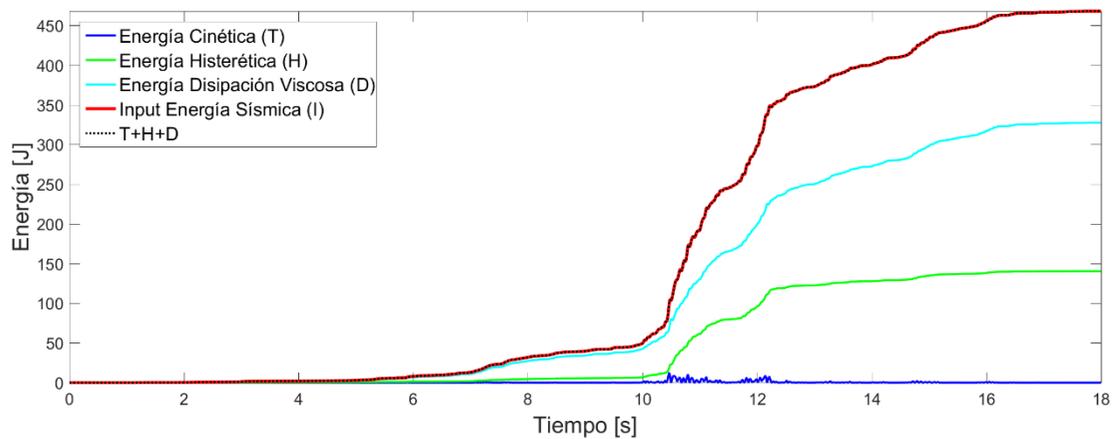


Figura 4.15: Conservación energía para equipo con periodos de 40 [Hz] y registro 24/04/17.

Se demuestra así que el método de integración numérica implementado converge en cuanto a la conservación de energía de forma exacta ya que la suma de la energía cinética, viscosa e histerética concuerda con el input de energía entregado por los eventos sísmicos.

4.7. EFECTO DEL PASO DE INTEGRACIÓN EN EL MODELO NO-LINEAL

En esta sección se analizan los efectos del tamaño del paso de integración requerido para que el error del proceso de integración numérica, considerando efectos de segundo orden, sea menor que un valor objetivo preestablecido. La Figura 4.16 muestra el error porcentual de la máxima aceleración absoluta al considerar simulaciones del modelo no-lineal con frecuencias de muestreo de 200, 400, 1000 y 2000 puntos por segundo con respecto a simulaciones del modelo no-lineal con frecuencias de muestreo de 4000 puntos por segundo. Para las simulaciones del modelo no-lineal se utiliza uno de los equipos descritos en la sección (4.6), con frecuencia natural de 20 [Hz] y 120 registros sísmicos. Los registros sísmicos originales considerados poseen una tasa de muestreo de 200 muestras por segundo (ver Capítulo 6). Los registros sísmicos originales fueron resampleados aumentando la tasa de muestreo por factores iguales a 2, 5, 10 y 20. Los nuevos valores de aceleraciones se obtienen mediante interpolación lineal entre los valores originales de aceleración.

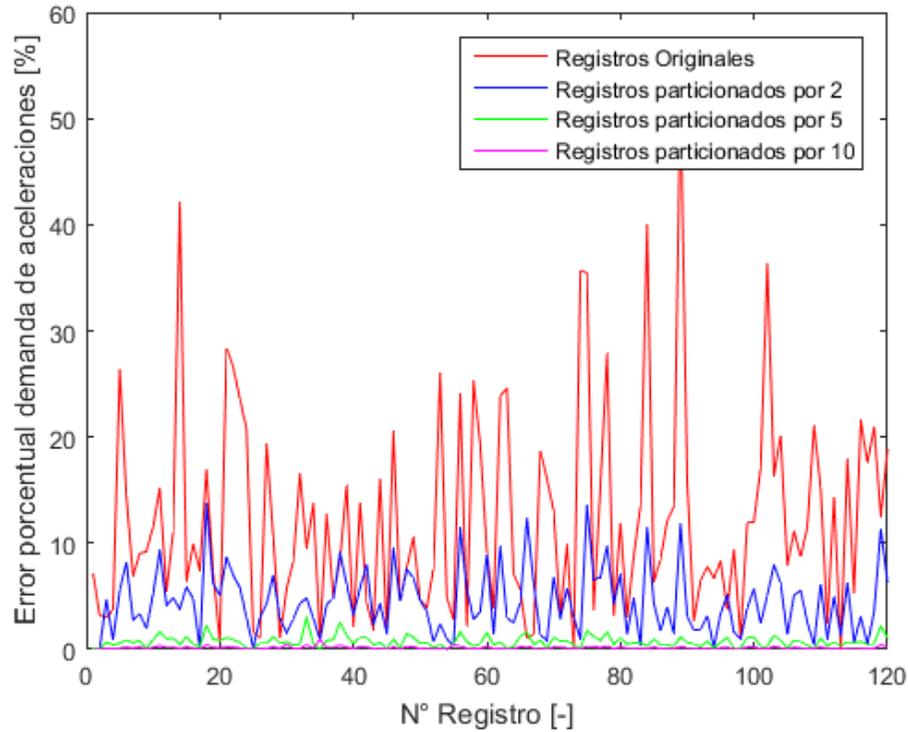


Figura 4.16: Error porcentual demanda de aceleración en el centro de masa traslacional.

Del análisis anterior se concluye que el error porcentual promedio de la estimación de la demanda de aceleraciones absolutas sobre los equipos, para los registros con la tasa de muestreo original, es igual a 12.2 [%]. Para los registros con tasa de muestreo amplificada por un factor 2 es igual a 4.5 [%], para los registros con tasa de muestreo amplificada por un factor 5 es igual a 0.7 [%] y por último un error promedio del 0.2 [%] para una tasa de muestreo amplificada por un factor 10. De esta forma, aumentando la tasa de muestreo por un factor 5 se consigue minimizar el error en la respuesta del equipo, sin aumentar considerablemente los costos computacionales.

CAPITULO 5 ALGORITMO GENÉTICO PARA SELECCIÓN DE CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO ANILLO FRICCIONAL

5.1. INTRODUCCIÓN

Un algoritmo genético es una analogía a la evolución biológica llevada al campo de la optimización (Haupt, 2004). Un esquema de este tipo de algoritmos se presenta en la Figura 5.1.

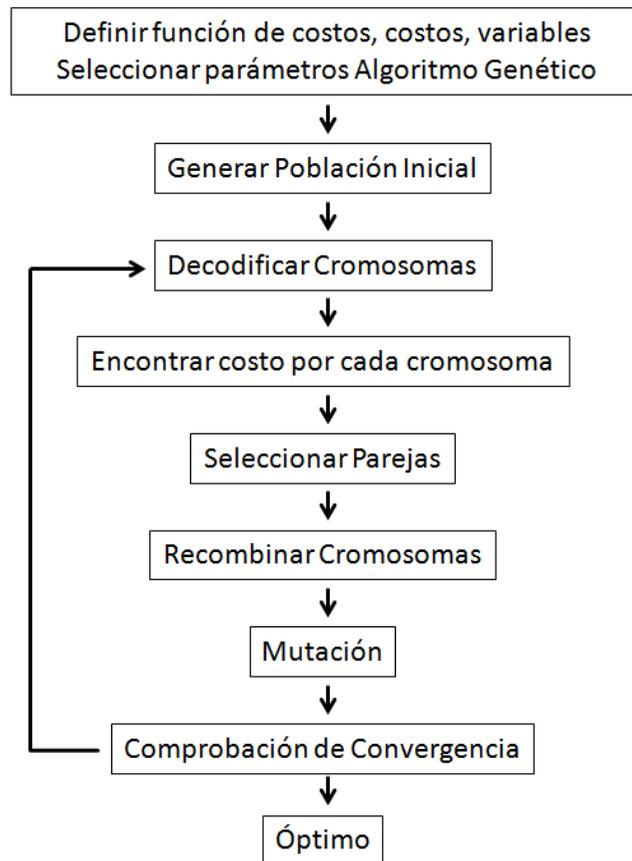


Figura 5.1: Esquema Algoritmo Genético, Haupt et al. (2004).

Dado que en un problema de optimización generalmente existen muchos óptimos locales, la mayoría de las técnicas convencionales de optimización tienen dificultad de convergencia, a menos que se encuentren en la vecindad cercana al óptimo. Más aún, los métodos que requieren un gradiente no son aptos para datos discretos, lo que no es inconveniente para los algoritmos genéticos (Haupt et al., 2004). Por lo tanto, dado que escoger un tipo de disipador de anillos friccionales corresponde a un problema de optimización con variables discretas, es conveniente recurrir a algoritmos genéticos.

Este capítulo describe y plantea el algoritmo genético para la obtención del diseño óptimo de disipadores de energía de anillos friccionales para proteger sísmicamente componentes y sistemas no estructurales.

5.2. PARÁMETROS ALGORITMO GENÉTICO BINARIO

En primer lugar, se impone que las soluciones factibles deben considerar el mismo tipo de disipador de anillos friccionales, con iguales propiedades en todos los apoyos.

Por otro lado, dado que los disipadores se pueden parametrizar de acuerdo con 4 variables (tipo de anillo, amortiguamiento, cantidad de anillos y precompresión) descritas en la sección 3.6, es necesario que el cromosoma de cada población en el algoritmo genético contenga la información de estas 4 variables discretas.

Es conveniente transformar los valores de cada variable en números binarios dado que se simplifica el planteamiento de la recombinación y mutación. Para estos efectos se considera lo siguiente:

- i. El mínimo valor equivale al 0 binario.
- ii. El máximo valor equivale al mayor número representado por una resolución de bits dada.
- iii. La resolución de bits se obtiene a partir de la mínima cantidad de bits necesarios tal que contenga el total de los distintos valores a representar, para lo cual se tiene que cumplir lo siguiente:

$$\frac{MAX(VARIABLE) - MIN(VARIABLE)}{INCREMENTO VARIABLE} \leq 2^{BITS} - 1, \quad BITS \in \mathbb{N} \quad (5.1)$$

Es conveniente establecer que los disipadores permanezcan en su rama elástica durante la operación de los equipos para prolongar la vida útil de los disipadores. De esta forma, se establece un porcentaje de la aceleración de gravedad mínimo ($\%g_{MIN}$) tal que la fuerza de precompresión (F_{PR}) de cada disipador sea mayor o igual al peso estático (peso más el porcentaje $\%g_{MIN}$ de esta). Además, se puede establecer un porcentaje de la aceleración de gravedad máximo ($\%g_{MAX}$) para la cual los disipadores siempre actuarán en su rama elástica, por lo cual no generan un beneficio para el equipo, obteniendo así un valor máximo para F_{PR} . La fuerza de precompresión en cada disipador debe cumplir:

$$\frac{\left(1 + \frac{\%g_{MIN}}{100}\right) m \cdot g}{n} \leq F_{PR} \leq \frac{\left(1 + \frac{\%g_{MAX}}{100}\right) m \cdot g}{n} \quad (5.2)$$

Cada tipo de disipador tiene una precompresión mínima ($P_{\%min}$) y máxima ($P_{\%max}$) aceptada, además de una fuerza máxima (última) que el disipador puede desarrollar (F_U), que solo depende del tipo de anillo y amortiguamiento.

Utilizando la inecuación (5.2) y reemplazando la fuerza de precompresión por la fuerza última (F_U) de acuerdo con la ecuación (3.15), se tiene que:

$$\frac{\left(1 + \frac{\%g_{MIN}}{100}\right) m \cdot g}{n \cdot P_{\%max}} \leq F_U \leq \frac{\left(1 + \frac{\%g_{MAX}}{100}\right) m \cdot g}{n \cdot P_{\%min}} \quad (5.3)$$

Dado que se limita F_U , no todos los amortiguamientos de un tipo de disipador pueden cumplir con estas restricciones, por lo que es conveniente incorporar al cromosoma el parámetro F_U en vez del tipo de anillo y amortiguamiento del disipador.

Considerando la mínima resolución de bits necesarios para las fuerzas últimas (NF), la mínima resolución de bits necesarios para la cantidad de elementos (NR) y la mínima resolución de bits necesarios para la precompresión (NP), el cromosoma de cada población será:

$$Cromosoma = \left\{ \underbrace{B_1 \cdots B_{NF}}_{F_U} \quad \underbrace{B_{NF+1} \cdots B_{NF+NR}}_{ANILLOS} \quad \underbrace{B_{NF+NR} \cdots B_{NF+NR+NP}}_{PRECOMPRESIÓN} \right\} \quad (5.4)$$

No obstante, si el equipo a proteger posee alguna excitación constante durante su operación, se debe controlar que estas no generen resonancia en el plano de disipadores, los cuales se encuentran en su rama elástica. Esta condición se trata en secciones posteriores.

5.3. FUNCIÓN SELECCIÓN

La función selección es la encargada de determinar el máximo beneficio de cada solución sujeta a todas las consideraciones de diseño, es decir, es la función por maximizar. Esta función contempla tanto el aumento en la probabilidad de no excedencia de valores específicos de aceleraciones límite (definida por la capacidad o nivel de calificación sísmica del equipo) al utilizar los disipadores de anillos friccionales, como los costos, limitaciones (de espacio u otros) y temas de seguridad, ya sean producto de la resonancia del sistema de disipadores con la frecuencia de operación del equipo o que los disipadores alcancen su capacidad de deformación antes que el equipo alcance la aceleración de diseño en su centro de masa durante un evento sísmico. De esta forma, la función de costos ($FSEL$) es caracterizada por:

$$FSEL = FO + CTDR \cdot FTDR + CCD \cdot FCD \quad (5.5)$$

donde:

FO : Función objetivo de acuerdo con (5.3.1).

$CTDR$: Constante importancia de $FTDR$.

$FTDR$: Función costo disipador de acuerdo con (5.3.2).

CCD : Constante importancia de FCD .

FCD : Función criterios de diseño de acuerdo con (5.3.3).

5.3.1. FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo (FO) es la que considera la modificación en la probabilidad de alcanzar la capacidad del equipo con y sin disipadores de energía de anillo friccional, y queda descrita por:

$$FO = \frac{P_{WOD} - P_{WD}}{P_{WOD}} \quad (5.6)$$

donde:

P_{WOD} : Probabilidad que la aceleración absoluta actuando en el centro de gravedad del equipo supere la capacidad del equipo en el caso sin disipadores.

P_{WD} : Probabilidad que la aceleración absoluta actuando en el centro de gravedad del equipo supere la capacidad del equipo en el caso con disipadores.

La probabilidad de excedencia de la capacidad del equipo es dependiente tanto de la amenaza sísmica en el sitio de emplazamiento del equipo y de la ventana de tiempo de exposición del equipo a la amenaza sísmica. La probabilidad de excedencia de la capacidad del equipo aumenta si se consideran ventanas de tiempo mayores.

El cálculo de P_{WOD} y P_{WD} se presenta en la sección de costos por cromosomas de este capítulo.

5.3.2. FUNCIÓN COSTO DISIPADOR

La función de costo del disipador corresponde al costo pecuniario directo de cada disipador de energía, según su tipo de anillo, amortiguamiento y cantidad de anillos. Dado que el costo de cada disipador depende de decisiones de cada fabricante, no es

posible establecer una expresión matemática que incluya todos los costos de los disipadores a considerar. Por lo tanto, se debe tener tabulado el valor de cada disipador según las variables antes descritas.

5.3.3. FUNCIÓN CRITERIOS DE DISEÑO

La función criterios de diseño evalúa el cumplimiento de los siguientes puntos:

- i. La precompresión mínima requerida, tal que los disipadores permanezcan en su rama elástica mientras el equipo se encuentra en operación.
- ii. Las limitaciones de espacio, en caso de que sea una limitante el diámetro máximo externo o altura máxima de los disipadores.
- iii. Los disipadores no superen su deformación máxima antes que los equipos alcancen su capacidad de diseño durante un evento sísmico (a fin de que los disipadores cumplan su función de proteger sísmicamente).
- iv. Las excitaciones durante la operación del equipo no entren en resonancia con el plano de disipadores.

Se define entonces la función criterios de diseño (FCD) de la siguiente manera:

$$FCD = \frac{(1 + FPR)(1 + FHD)(1 + FB)(1 + FR) - 8}{8} \quad (5.7)$$

donde:

FPR : Función precompresión.

FHD : Función limitaciones de espacio.

FB : Función seguridad o de no bloqueo de disipadores.

FR : Función resonancia.

De esta forma, se obtiene que:

$$FCD = \begin{cases} 1, & \text{se cumple todo} \\ -1, & \text{no se cumple todo} \end{cases} \quad (5.8)$$

Para lo anterior es necesario que FHD , FB , FPR y FR tomen valores $\{-1,1\}$.

5.3.3.1. FUNCIÓN PRECOMPRESIÓN

Pese a que se ha limitado el valor de fuerzas máximas de los disipadores (F_U), puede que exista un porcentaje de precompresión crítico ($P_{\%C}$), dentro de los valores posibles, donde no se cumpla la inecuación (5.2), por lo que es necesario establecer una función que entregue un costo si la precompresión es menor a $P_{\%C}$. Así:

$$P_{\%C} = \frac{\left(1 + \frac{\%g_{MIN}}{100}\right) m \cdot g}{n \cdot F_U} \quad (5.9)$$

$$FPR = \begin{cases} 1, & P_{\%} \geq P_{\%C} \\ -1, & P_{\%} < P_{\%C} \end{cases} \quad (5.10)$$

5.3.3.2. FUNCIÓN LIMITACIÓN DE ESPACIO

La función limitación de espacio introduce un costo asociado a las limitaciones de espacio, ya sea de altura total (H) o diámetro (D) del disipador, por ende:

$$FHD = \begin{cases} 1, & H \text{ cumple} \wedge D \text{ cumple} \\ -1, & H \text{ no cumple} \vee D \text{ no cumple} \end{cases} \quad (5.11)$$

5.3.3.3. FUNCIÓN DE SEGURIDAD

La función de seguridad introduce un costo o un beneficio de tal forma que:

- i. Si ningún disipador supera su capacidad de deformación máxima antes que un equipo supere la aceleración absoluta de diseño del equipo, pasa a ser un beneficio.
- ii. En caso contrario, se transforma en un costo.

$$FB = \begin{cases} -1, & \text{Si un disipador se bloquea} \\ 1, & \text{En caso contrario} \end{cases} \quad (5.12)$$

Se define P_D como la probabilidad de exceder la deformación máxima posible de los disipadores (s) y ε como el valor máximo aceptado para P_D .

$$FB = \begin{cases} -1, & P_D < \varepsilon \\ 1, & \text{Lo contrario} \end{cases} \quad (5.13)$$

El procedimiento de cálculo de P_D se presenta en la sección de costos por cromosomas de este capítulo.

5.3.3.4. FUNCIÓN DE RESONANCIA

La función de resonancia introduce un costo tal de prevenir problemas de resonancia que induzcan oscilaciones verticales o cabeceo en el equipo durante su operación. Por lo tanto, las frecuencias de vibrar del sistema de disipación de energía ($\{f_p\}$) deben ser un porcentaje ($\%_{ex}$) mayor o menor que todas las frecuencias que exciten al equipo durante su operación ($\{f_{ex}\}$). Se definirá tal porcentaje como porcentaje de desacople de frecuencias a fin de prevenir resonancia.

Se define el vector de frecuencias de vibrar del plano como:

$$\{f_p\} = \frac{1}{2\pi} EIGENVAL([M]^{-1}[K_p]) \quad (5.14)$$

Entonces:

$$FR = \begin{cases} -1, & \exists \left| \frac{f_p - f_{ex}}{f_p} \right| \cdot 100 < \%_{ex} \\ 1, & \text{Lo contrario} \end{cases} \quad (5.15)$$

5.4. POBLACIÓN INICIAL

De acuerdo con Cantú-Paz (2011), el tamaño de la población (TP) de un algoritmo genético con un cromosoma binario viene dado por la siguiente expresión:

$$TP = -2^{k-1} \ln(P_f) \frac{\sqrt{\pi(p-1)}}{4} \quad (5.16)$$

donde:

P_f : Probabilidad de falla del algoritmo genético.

p : Particiones del cromosoma.

k : Bits máximos de las particiones del cromosoma.

Al considerar una probabilidad de falla del algoritmo genético del 2%, asociada a que el algoritmo converja a un máximo local y no global, además dado que existen 3 particiones en el cromosoma, se tiene que la expresión anterior se puede aproximar a:

$$TP = 2.5 \cdot 2^{k-1} \quad (5.17)$$

Para obtener la población inicial se debe determinar la cantidad de bits máxima de todas las variables (fuerzas últimas, cantidad de elementos y precompresión), a partir de lo cual se obtiene el tamaño de población necesaria.

En este estudio se genera la población inicial de forma aleatoria, como se utiliza en la práctica (Haup, 2004).

5.5. DECODIFICACIÓN

Dado un cromosoma cualquiera que cumpla (5.4), la resolución de bits de las fuerzas últimas (NF), la resolución de bits del número de elementos de un disipador (NR) y la resolución de bits de la precompresión (NP) vienen dadas por:

$$Q_F = CANTIDAD_{F_u} - 1 \quad (5.18)$$

$$Q_R = \frac{MAX_E - MIN_E}{\Delta_E} \quad (5.19)$$

$$Q_P = \frac{P_{\%MAX} - P_{\%MIN}}{\Delta_{P\%}} \quad (5.20)$$

$$NF = \min(k) \mid Q_F \leq 2^k - 1, \quad k \in \mathbb{N} \quad (5.21)$$

$$NR = \min(k) \mid Q_R \leq 2^k - 1, \quad k \in \mathbb{N} \quad (5.22)$$

$$NP = \min(k) \mid Q_P \leq 2^k - 1, \quad k \in \mathbb{N} \quad (5.23)$$

donde:

MAX_E : Número máximo de elementos de un disipador de energía de anillos friccionales.

MIN_E : Número mínimo de elementos de un disipador de energía de anillos friccionales.

Δ_E : Incremento de número de elementos de un disipador de energía de anillos friccionales.

$\Delta_{P\%}$: Incremento de la precompresión.

Para obtener la conversión de número binario con resolución k a un número entero se realiza lo siguiente:

$$NÚMERO\ ENTERO = \sum_{i=1}^k BIT_i \cdot 2^{k-i} \quad (5.24)$$

Sin embargo, el máximo número posible por cada número binario no necesariamente será igual a la cantidad de valores máxima menos 1 (Q_{MAX}). Entonces:

$$NÚMERO\ ENTERO = ENTERO \left(\frac{Q_{MAX}}{2^k - 1} \sum_{i=1}^k BIT_i \cdot 2^{k-i} \right) \quad (5.25)$$

De esta forma, el índice de la j -ésima fuerza última (j), el número de elementos (n_e) y la precompresión quedan determinados por:

$$j = ENTERO \left(\frac{Q_F}{2^{NF} - 1} \sum_{i=1}^{NF} BIT_i \cdot 2^{NF-i} \right) \quad (5.26)$$

$$n_e = MIN_E + \Delta_E \cdot ENTERO \left(\frac{Q_R}{2^{NR} - 1} \sum_{i=NF}^{NF+NR} BIT_i \cdot 2^{NF+NR-i} \right) \quad (5.27)$$

$$P_{\%} = P_{\%MIN} + \Delta_{P_{\%}} \cdot ENTERO \left(\frac{Q_P}{2^{NP} - 1} \sum_{i=NF+N}^{NF+NR+NP} BIT_i \cdot 2^{NF+NR+NP-i} \right) \quad (5.28)$$

Dado que la j -ésima fuerza última está asociada a un tipo de anillo y amortiguamiento, se conocen por lo tanto las 4 variables que caracterizan el disipador de anillos friccionales.

5.6. COSTOS POR CROMOSOMA

Para obtener la probabilidad de excedencia de la capacidad del equipo con y sin disipadores de energía (P_{WD} y P_{WOD}), en primera instancia este estudio consideró calcular las curvas de fragilidad de acuerdo con el procedimiento propuesto por Baker (2015), donde la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de daño se determina a partir de una distribución lognormal dada por:

$$P(IM) = \Phi \left(\frac{\ln(IM/\hat{\theta})}{\hat{\beta}} \right) \quad (5.29)$$

$$\ln(\hat{\theta}) = \frac{1}{N_{SR}} \sum_{i=1}^{N_{SR}} \ln(IM_i) \quad (5.30)$$

$$\hat{\beta} = \sqrt{\frac{1}{N_{SR} - 1} \sum_{i=1}^{N_{SR}} (\ln(IM_i/\hat{\theta}))^2} \quad (5.31)$$

En este caso IM_i corresponde al PGA de un determinado registro sísmico donde la aceleración absoluta sobre el equipo sobrepasó la capacidad del equipo (a_f). N_{SR} corresponde a la cantidad de registros sísmicos utilizados y Φ corresponde a la función de distribución acumulada normal. Por ello se requiere realizar un análisis dinámico incremental no lineal de respuesta en el tiempo donde se incrementa gradualmente la aceleración máxima de los registros sísmicos, hasta que se supere la capacidad del equipo. Se utilizan interpolaciones lineales para encontrar el IM_i correspondiente a una aceleración a_f dada, como se muestra en la Figura 5.2. En la Figura 5.3 se muestra un ejemplo de curva de fragilidad donde la distribución acumulativa empírica es obtenida a partir de los IM_i encontrados en la Figura 5.2. Se muestra, además la curva de fragilidad ajustada a una distribución Lognormal.

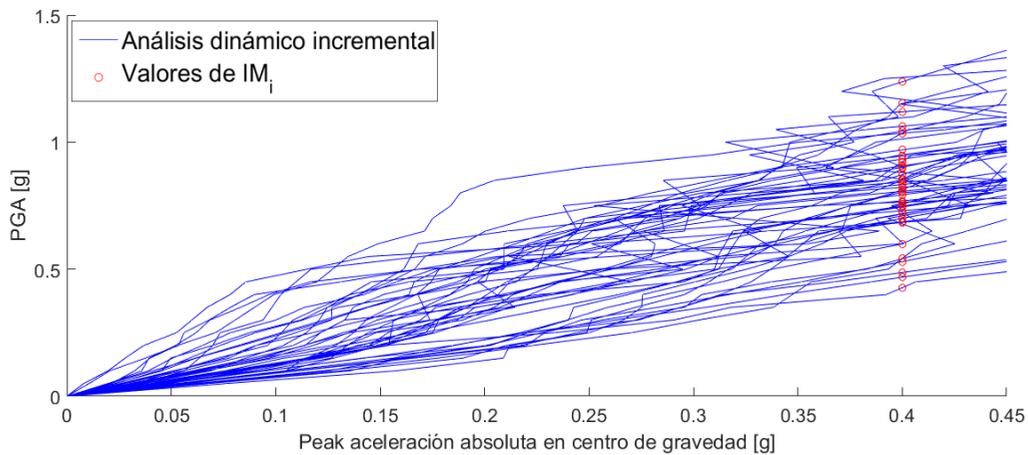


Figura 5.2: Ejemplo análisis dinámico incremental para identificar parámetro IM_i asociado a la aceleración absoluta de diseño del equipo en su centro de gravedad para cada registro sísmico utilizado.

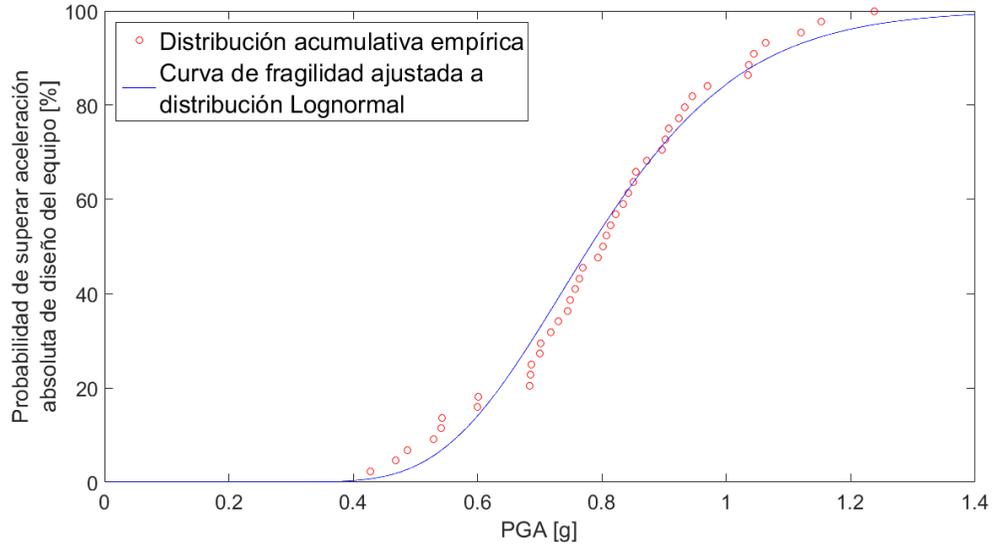


Figura 5.3: Ejemplo curva de fragilidad.

Cabe destacar que la cantidad de registros sísmicos utilizados en los análisis dinámicos incrementales, tanto en investigaciones como en la industria, consiste en alrededor de 40, puesto que el beneficio en términos de reducción de incertidumbre en la probabilidad calculada es marginal al seguir incrementando el número de registros (Baker, 2015). Para utilizar el análisis dinámico incremental se requiere normalizar los registros sísmicos con respecto a la medida de intensidad de las curvas de fragilidad (IM), lo cual resulta trivial para análisis en solo una dirección principal (regularmente una dirección horizontal), pues basta con normalizar solo en la dirección de interés de los registros sísmicos con respecto a la medida de intensidad (en este caso el PGA).

No obstante, dada la configuración en vertical de los disipadores de energía de anillos friccionales, no se puede considerar el análisis en solo una dirección horizontal, pues las componentes ortogonales horizontal y vertical de los registros sísmicos influyen en gran medida en el comportamiento de los disipadores. Por esta razón, este estudio adopta la metodología descrita por Jeon et al. (2015) para el cálculo de las curvas de fragilidad, donde se prescinde del análisis dinámico incremental, pues se obtiene un modelo de la demanda (S_d) de acuerdo con la medida de intensidad, la cual sigue la siguiente expresión:

$$S_d = c_1 \cdot IM^{c_2} \quad (5.32)$$

Los parámetros c_1 y c_2 de la ecuación (5.32) se obtienen al realizar una regresión lineal en escala logarítmica de los pares demanda (edp_i) – medida de intensidad (IM_i) para la i -ésima simulación. Entonces:

$$c_2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{SR}} \ln(edp_i) \cdot \sum_{i=1}^{N_{SR}} \ln(IM_i) - N_{SR} \sum_{i=1}^{N_{SR}} \ln(edp_i) \cdot \ln(IM_i)}{(\sum_{i=1}^{N_{SR}} \ln(IM_i))^2 - N_{SR} \sum_{i=1}^{N_{SR}} \ln(IM_i)^2} \quad (5.33)$$

$$\ln(c_1) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{SR}} \ln(edp_i) - c_2 \sum_{i=1}^{N_{SR}} \ln(IM_i)}{N_{SR}} \quad (5.34)$$

Además, la dispersión de la demanda dada la medida de intensidad ($\beta_{EDP|IM}$) se calcula como:

$$\beta_{EDP|IM} = \sqrt{\frac{1}{N_{SR} - 2} \sum_{i=1}^{N_{SR}} (\ln(edp_i) - \overline{\ln(edp_i)})^2} \quad (5.35)$$

La Figura 5.4 muestra un ejemplo de puntos obtenidos de simulaciones, junto a la regresión lineal y dispersión correspondiente.

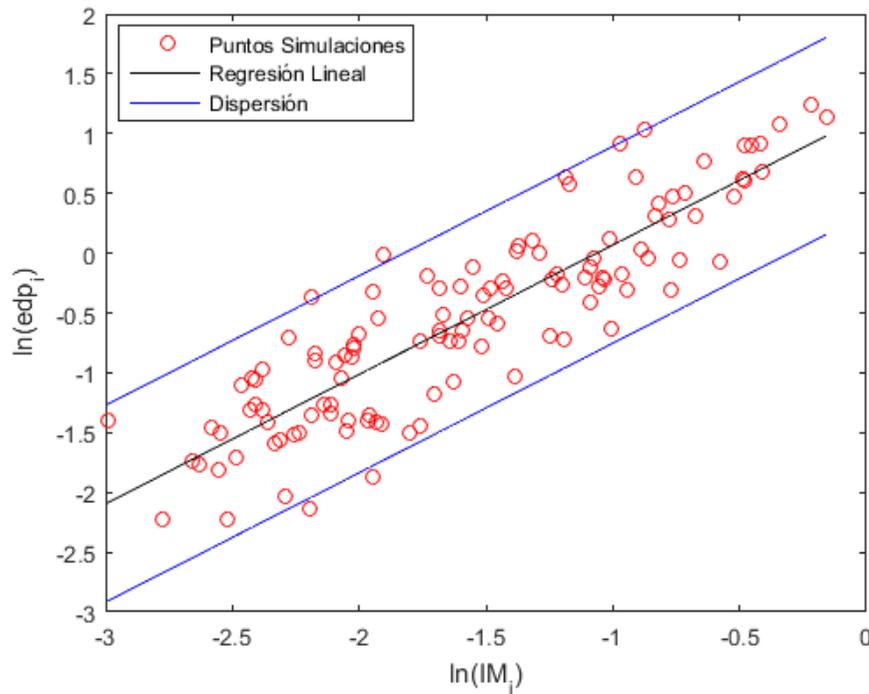


Figura 5.4: Ejemplo regresión lineal para resultados de simulaciones.

Por lo tanto, la probabilidad de excedencia de la capacidad viene dada por:

$$P(S_d(IM) \geq a_f) = \Phi \left(\frac{\ln(S_d/a_f)}{\sqrt{\beta_{EDP|IM}^2 + \beta_c^2}} \right) \quad (5.36)$$

donde a_f y β_c son la capacidad media y la dispersión de la capacidad del equipo o los disipadores de energía. En este estudio se asume una capacidad de diseño a_f para el

equipo y deformaciones máximas s para los disipadores de energía, las cuales se asumen con dispersiones nulas. Por lo tanto:

$$P(S_d(IM) \geq a_f) = \Phi\left(\frac{\ln(S_d/a_f)}{\beta_{EDP|IM}}\right) \quad (5.37)$$

De acuerdo con Zentner et al. (2017), quién realiza una revisión de las aplicaciones de los métodos enfocados en fragilidad, la tasa media excedencia de la capacidad viene dada por la densidad de la curva del peligro sísmico ($H(IM)$), entonces:

$$P_{tot} = \int_0^{\infty} P(S_d(IM) \geq a_f) \cdot p(IM) \cdot dIM \quad (5.38)$$

$$p(IM) = \frac{d}{dIM}(1 - H(IM)) \quad (5.39)$$

Las curvas de peligro sísmico representan la tasa media anual de excedencia de un determinado parámetro de movimiento del suelo (magnitud de momento, PGA, etc.). En general las curvas de peligro están normalizadas a un periodo de tiempo de un año. Un caso de curvas de peligro sísmico se observa en el estudio de Petersen et al. (2018), donde se establecen las curvas de peligro sísmico para Caracas, Lima, Natal, Quito y Santiago, las cuales se muestran en la Figura 5.5.

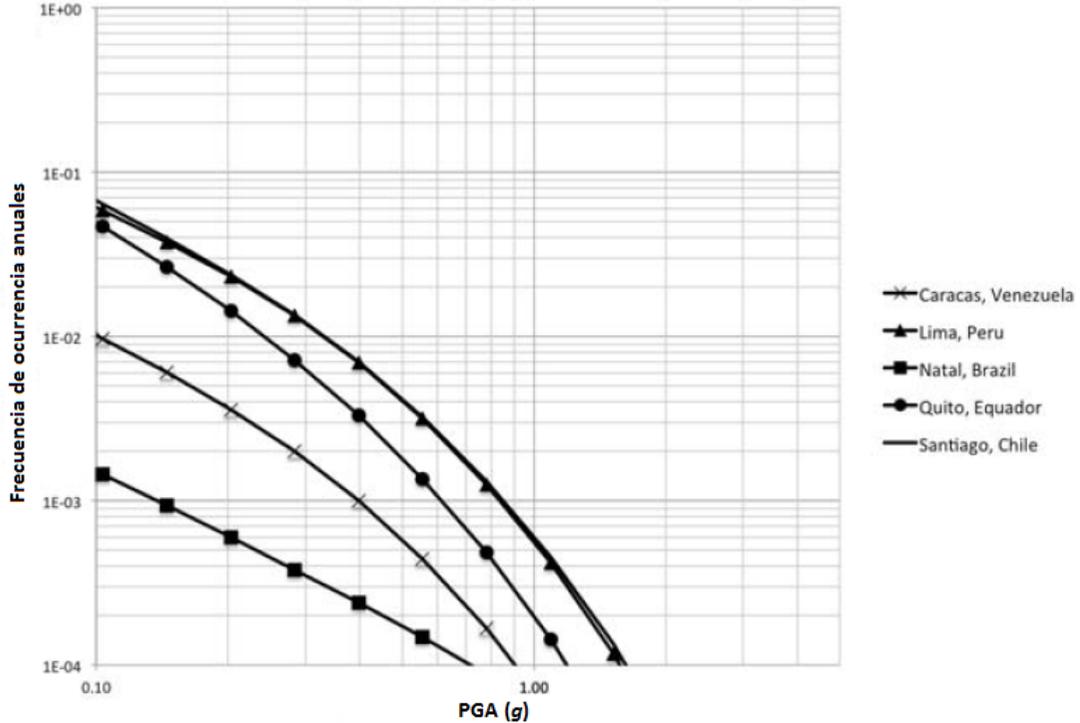


Figura 5.5: Curvas de peligro sísmico de Caracas, Lima, Natal, Quito y Santiago. Petersen et al. (2018).

Dado que P_{tot} expresa la tasa media de excedencia para un año, es posible determinar la tasa media de excedencia para una cantidad de años arbitraria ($P_{tot,\Lambda}$). Considerando Λ la ventana de años a evaluar y un proceso de Poisson independiente, entonces la probabilidad se calcula como:

$$P_{tot,\Lambda} = 1 - e^{-\Lambda \cdot P_{tot}} \quad (5.40)$$

La utilización del PGA como medida de intensidad para la metodología utilizada se apoya en el estudio de Padgett et al. (2008), quienes estudiaron la incertidumbre de las curvas de fragilidad para puentes bajo 10 distintas medidas de intensidad las cuales consideran, la aceleración espectral, intensidad de Arias, PGV, PGD, PGA, entre otras. Concluyeron que, al incluir curvas de peligro sísmico en el análisis, el PGA disminuye las incertidumbres en el modelo. A su vez, dado que la función objetivo representa una tasa de reducción de la probabilidad de excedencia entre el caso sin y con protección sísmica, se estima que se obtendrían valores de reducción similares en caso de considerar otros parámetros de intensidad en el análisis.

5.7. SELECCIÓN DE PAREJAS

El primer paso es conservar en cada iteración los N_K mejores padres, de acuerdo con una tasa de conservación (T_K) definida por el usuario, donde normalmente se utiliza un valor en el rango $[0.3, 0.5]$. Se tiene que:

$$N_K = (INT)TP \cdot T_K \quad (5.41)$$

$$N_{CK} = TP - N_K \quad (5.42)$$

Se utiliza el método de la ruleta para escoger los N_{CK} restantes que estarán sujetos a recombinación. Este método asigna una probabilidad de escoger a cada padre según el peso de la función de selección de cada padre ($FSEL_j$) en el total de la población. En caso de encontrar padres con valores negativos en su función de selección, se debe sumar una constante de modo que todos los valores sean mayores o iguales a cero, así:

$$Si \exists FSEL_j < 0 \rightarrow \forall j \quad FSEL_j = FSEL_j + |MIN(\{FSEL\})| \quad (5.43)$$

La probabilidad de seleccionar al j-ésimo padre (P_{SEL_j}) queda descrita entonces por:

$$P_{SEL_j} = \frac{FSEL_j}{\overline{FSEL}} \quad (5.44)$$

donde \overline{FSEL} corresponde al promedio de todos los valores de la función selección en cada iteración, los cuales deben respetar (5.43). Luego se ordenan los valores y se realiza una ruleta, como se muestra en la Figura 5.6.

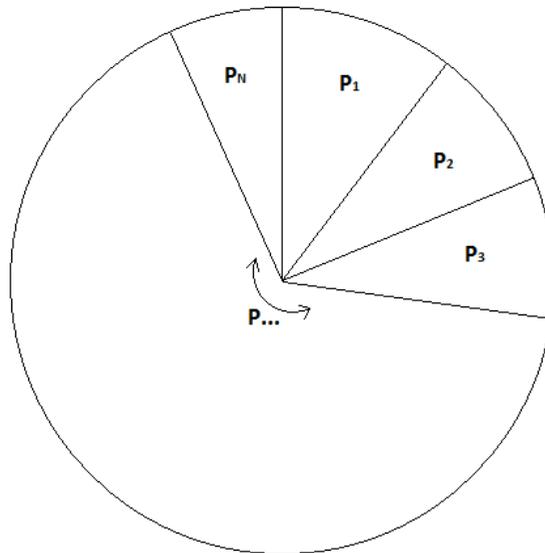


Figura 5.6: Método de la Ruleta.

Utilizando este método se obtienen N_{CK} números al azar en el rango (0,1) y se seleccionan los padres que en la ruleta estén dentro de esos números aleatorios.

5.8. RECOMBINACIÓN

Para recombinar los N_{CK} padres que se escogieron bajo el método de la ruleta, se seleccionan las parejas en el orden del sorteo y se intercambian los segmentos de cada cromosoma de la pareja en un BIT aleatorio de los cromosomas, como se muestra en la Figura 5.7, siempre y cuando un número escogido al azar en el rango (0,1) sea menor a la tasa de recombinación (T_R) definida por el usuario. Normalmente la tasa de recombinación se encuentra en el rango [0.9, 0.95].

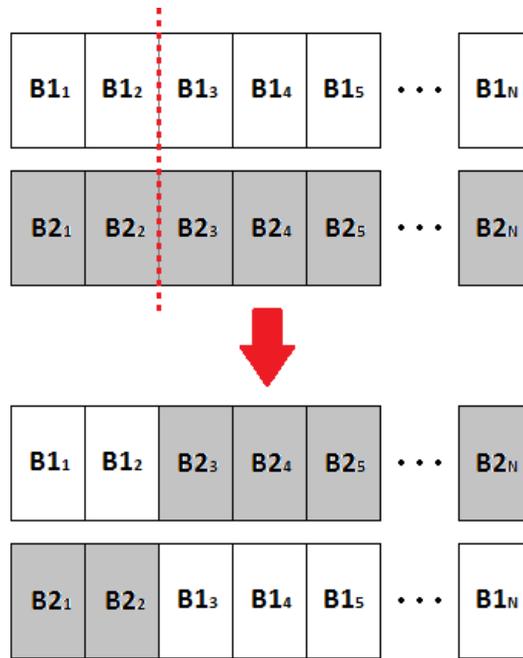


Figura 5.7: Recombinación.

5.9. MUTACIÓN

La mutación consiste en modificar aleatoriamente el j -ésimo BIT por su valor contrario cuando al generar un número al azar en el rango $(0,1)$ se obtiene un valor menor a la tasa de mutación (T_M) definida por el usuario. Una tasa de mutación usualmente utilizada en la mayoría de los estudios es de 0.05.

Además, en este estudio se opta por mutar todos los hijos iguales al mejor padre de cada iteración, por los valores más próximos de precompresión y números de elementos, siempre que exista un valor de la vecindad que no haya aparecido. Esta medida es necesaria dado que en la vecindad existen padres con menor probabilidad de ser escogidos, ya que el número mayor binario que contiene cada variable del algoritmo genético siempre es mayor o igual a estas, por lo que al transformar de número binario a entero puede que existan 2 números binarios con igual valor al ser transformados. No obstante 2 números enteros consecutivos nunca serán representados por 2 números binarios distintos cada uno.

5.10. CONVERGENCIA

La convergencia se logra cuando todos los padres de una iteración tienen el mismo cromosoma.

Un ejemplo del historial de convergencia se desarrolla en las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10 en donde se muestra el total de iteraciones. Se consideró solo un tipo de disipador y amortiguamiento para lograr una pronta convergencia. Además, la cantidad máxima de precompresiones ($P_{\%}$) y números de elementos (n_e) se limitó en 8 posibles valores, para que de acuerdo con la ecuación (5.16), el tamaño de población sea igual a 10 padres. Se contempla además los padres que se conservaron en cada iteración y los nuevos hijos, los cuales tienen señalados el par de padres de donde fueron recombinados de acuerdo con el índice de estos (j). Por último, se observa los casos donde ocurrieron mutaciones, ya sean por un bit mutado o por probar en la vecindad del mejor padre.

La Figura 5.11 muestra la convergencia de las reducciones máximas posibles de las probabilidades de excedencia de la capacidad de diseño, para los casos de estudio entablados en el capítulo 8, exceptuando el equipo de la sección 8.3 (se excluye por su nula reducción máxima posible).

ITERACIÓN 1 - POBLACIÓN INICIAL										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	88	92	88	92	100	90	98	96	96	100
P _%	25	30	29	29	27	31	30	27	28	32
P _{SEL}	2.4%	6.6%	12.9%	12.9%	21.2%	1.7%	6.4%	20.3%	17.2%	0.0%

ITERACIÓN 2										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	96	96	98	96	92	96	98	92	88
P _%	27	27	28	26	27	30	28	29	30	29
P _{SEL}	16.5%	15.8%	13.0%	13.0%	15.8%	3.7%	13.0%	9.1%	3.7%	9.3%
PADRES	5	8	9	5-8	5-8	9-2	9-2	7-4	7-4	6-3

PADRES
CONSERVADOS

↑
VECINDAD

HIJOS

ITERACIÓN 3										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	96	96	88	96	98	92	96	96	96
P _%	27	27	27	29	27	29	30	28	28	27
P _{SEL}	13.7%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	6.4%	1.0%	10.2%	10.2%	13.0%
PADRES	1	2	5	5-10	5-10	6-8	6-8	3-7	3-7	1-2

ITERACIÓN 4										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	96	96	94	98	96	98	96	96	88
P _%	27	27	27	27	30	29	27	27	27	32
P _{SEL}	12.9%	12.4%	12.4%	12.4%	4.9%	8.4%	12.2%	12.4%	12.4%	0.0%
PADRES	1	2	3	7-1	7-1	10-6	10-6	2-3	2-3	9-4

Figura 5.8: Ejemplo del historial de convergencia, parte 1.

ITERACIÓN 5										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	96	96	96	96	100	94	96	98	98
P _%	27	27	27	27	27	26	27	27	27	28
P _{SEL}	11.9%	11.3%	11.3%	11.3%	11.3%	0.0%	10.7%	11.3%	11.1%	9.6%
PADRES	1	2	3	9-2	9-2	1-4	1-4	3-7	3-7	5-8

↑
VECINDAD

↑
VECINDAD

ITERACIÓN 6										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	96	96	100	96	98	96	96	96	96
P _%	27	27	27	28	27	27	28	27	27	27
P _{SEL}	11.0%	10.4%	10.4%	10.4%	10.4%	10.1%	8.2%	10.4%	10.4%	10.4%
PADRES	1	2	3	3-1	3-1	10-8	10-8	5-4	5-4	2-9

↑
VECINDAD

ITERACIÓN 7										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	96	96	96	100	96	96	98	96	96
P _%	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
P _{SEL}	10.5%	9.9%	9.9%	9.9%	10.5%	9.9%	9.9%	9.7%	9.9%	9.9%
PADRES	1	2	3	5-1	5-1	9-8	9-8	2-6	2-6	10-3

ITERACIÓN 8										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	100	96	96	100	96	96	96	96	98
P _%	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
P _{SEL}	10.4%	10.4%	9.9%	9.9%	10.4%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.6%
PADRES	1	5	2	3-5	3-5	6-2	6-2	4-7	4-7	1-8

Figura 5.9: Ejemplo del historial de convergencia, parte 2.

ITERACIÓN 9										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	100	100	100	96	96	96	98	100	96
P _%	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
P _{SEL}	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	9.7%	9.7%	9.7%	9.5%	10.3%	9.7%
PADRES	1	2	5	6-1	6-1	8-9	8-9	10-2	10-2	7-4

ITERACIÓN 10										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	100	100	98	96	100	100	100	96	100
P _%	27	27	27	27	31	27	27	27	27	27
P _{SEL}	11.2%	11.2%	11.2%	11.2%	0.0%	11.2%	11.2%	11.2%	10.8%	11.2%
PADRES	1	2	3	8-5	8-5	2-9	2-9	4-7	4-7	6-1

↑
BIT
MUTADO

ITERACIÓN 11										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	100	100	100	96	100	100	100	100	100
P _%	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
P _{SEL}	10.1%	10.1%	10.1%	10.1%	9.5%	10.1%	10.1%	10.1%	10.1%	10.1%
PADRES	1	2	3	8-9	8-9	6-3	6-3	10-7	10-7	3-1

ITERACIÓN 12										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	100	100	100	100	96	100	100	100	100
P _%	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
P _{SEL}	10.1%	10.1%	10.1%	10.1%	10.1%	9.5%	10.1%	10.1%	10.1%	10.1%
PADRES	1	2	3	7-9	7-9	3-5	3-5	1-6	1-6	8-4

ITERACIÓN 13										
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n _e	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
P _%	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
P _{SEL}	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%
PADRES	1	2	3	7-3	7-3	8-2	8-2	5-10	5-10	6-4

Figura 5.10: Ejemplo del historial de convergencia, parte 3.

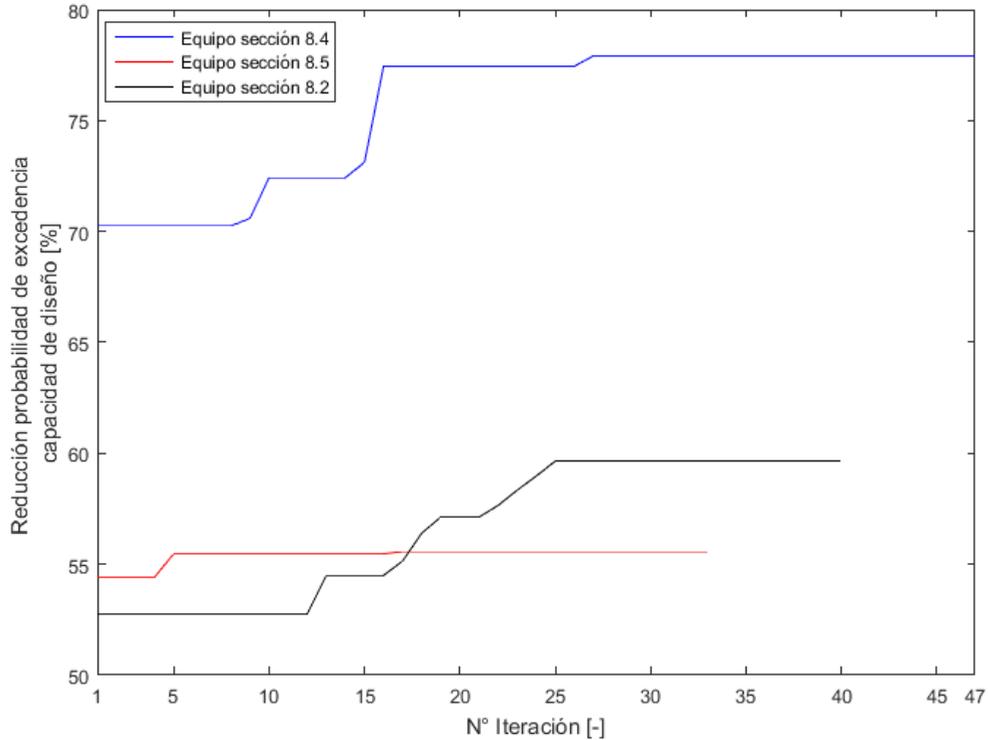


Figura 5.11: Convergencia algoritmo genético para casos en estudio.

5.11. EFECTO DEL TAMAÑO DEL PASO DE INTEGRACIÓN EN LAS CURVAS DE FRAGILIDAD

En la sección (4.7) de este estudio se observó el efecto del tamaño del paso de integración en la respuesta del modelo no-lineal de análisis. No obstante, se debe extender el análisis para evaluar el efecto sobre la probabilidad de excedencia de la capacidad del equipo. De esta forma, la Figura 5.12 muestra las curvas de fragilidad de las simulaciones obtenidas en la sección (4.7) para los distintos pasos de integración. En esta se observa que un paso de integración de 0.001 [s] permite obtener un error despreciable en el cálculo de las curvas de fragilidad. Más aún, se tiene un resultado más conservador.

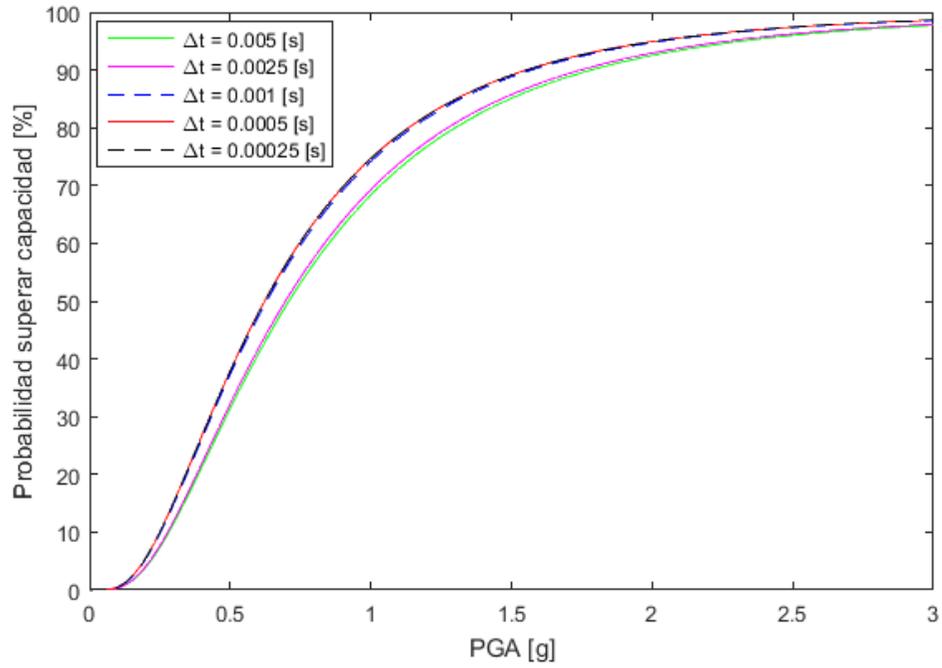


Figura 5.12: Efecto del tamaño del paso de integración en curvas de fragilidad.

CAPITULO 6 SELECCIÓN DE REGISTROS

6.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo muestra las características de los registros sísmicos utilizados en el análisis.

6.2. REGISTROS

La Tabla 6.1 resume los 120 registros sísmicos utilizados en este estudio, los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de Chile, con diferentes magnitudes (sobre M_w 6.0), distancias epicentrales (no superiores a 200 [km]), zonas sísmicas (I, II y III) y mecanismos de falla (fallas de interplacas, intraplacas y superficiales). Nielson & DesRoches (2007), Gulerce et al. (2012) y Jeon et al. (2015) utilizan un set de 114 registros sísmicos de fuente cercana, con magnitudes M_w superiores a 5.0 y con distancias epicentrales menores a 30 [km]. No obstante, los mecanismos sismogénicos de los terremotos chilenos difieren con la base seleccionada por los autores anteriores, ya que, en general, no corresponden a sismos superficiales y las distancias epicentrales suelen ser mayores que 30 [km]. Dado esto, se utilizan registros sísmicos con mayores magnitudes y PGA a fin de que los espectros de respuesta contengan energía para un amplio rango de frecuencias. La Tabla 6.1 muestra la estación de medición del registro sísmico, la fecha, la magnitud de momento (M_w), la profundidad al hipocentro, la latitud y longitud del epicentro, y el PGA en la dirección NS (PGA Y), en la dirección EO (PGA X), en la resultante vectorial de las componentes horizontales (PGA H) y en la componente vertical (PGA V).

Los registros sísmicos considerados fueron obtenidos de la base de registros sísmicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (<http://terremotos.ing.uchile.cl>) y de la base de registros sísmicos del Centro Sismológico Nacional (<http://evtdb.csn.uchile.cl>). De acuerdo con Carreño et. al. (1999) se debe, en primer lugar, corregir la línea base cuando los registros se encuentran desplazados respecto a la línea cero de aceleración y luego, filtrar el ruido tanto de alta frecuencia, como de baja frecuencia. Para corregir la línea base se utiliza el método descrito por Wang et. al. (2011) donde se aproxima una curva cuadrática a los desplazamientos para un periodo de tiempo donde se haya desarrollado un 90 % o más de la energía del registro sísmico. Esta curva obtenida se deriva 2 veces con respecto al tiempo y se obtiene el desplazamiento de la línea base el cual se resta al registro original. Los registros sísmicos son filtrados para frecuencias hasta 80 [Hz] y superiores a 0.1 [Hz], puesto que este estudio contempla analizar estructuras hasta 40 [Hz] en su modo fundamental de vibrar.

Tabla 6.1: Registros sísmicos considerados para análisis incremental. Valores de PGA originales (no normalizados).

Estación	Fecha	Mw	Prof. [Km]	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA X [g]	PGA Y [g]	PGA H [g]	PGA V [g]
LA SERENA ⁽¹⁾	18-06-02	6.3	53	-30.83	-70.34	0.15	0.13	0.15	0.07
ARICA CEMENTERIO ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.19	0.16	0.19	0.16
ARICA CERRO LA CRUZ ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.17	0.20	0.21	0.12
CUYA ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.43	0.45	0.46	0.25
IQUIQUE ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.25	0.25	0.29	0.25
IQUIQUE IDIEM ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.21	0.20	0.22	0.11
IQUIQUE PLAZA ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.24	0.27	0.31	0.16
PICA ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.73	0.56	0.73	0.81
PISAGUA ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.32	0.47	0.47	0.29
POCONCHILE ETNA ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.33	0.39	0.49	0.23
PUTRE ⁽¹⁾	13-06-05	7.9	108	-19.59	-69.12	0.09	0.10	0.12	0.07
PUENTE AMOLANAS ⁽¹⁾	20-11-06	6.2	48	-17.75	-70.55	0.14	0.11	0.18	0.06
ANTOFAGASTA UCN ⁽¹⁾	14-11-07	7.7	40	-22.19	-69.84	0.13	0.10	0.13	0.06
CALAMA ⁽¹⁾	14-11-07	7.7	40	-22.2	-69.84	0.09	0.09	0.09	0.09
EL LOA ⁽¹⁾	14-11-07	7.7	40	-22.2	-69.84	0.28	0.34	0.41	0.16
IQUIQUE E. CHIPANA ⁽¹⁾	14-11-07	7.7	40	-22.2	-69.84	0.08	0.11	0.13	0.06
MEJILLONES ⁽¹⁾	14-11-07	7.7	40	-22.19	-69.84	0.40	0.42	0.42	0.37
PICA ⁽¹⁾	14-11-07	7.7	40	-22.19	-69.84	0.20	0.18	0.23	0.11
TOCOPILLA ⁽¹⁾	14-11-07	7.7	40	-22.2	-69.84	0.50	0.70	0.80	0.59
TOCOPILLA PUERTO ⁽¹⁾	14-11-07	7.7	40	-22.2	-69.84	0.43	0.40	0.43	0.30
MEJILLONES ⁽¹⁾	15-11-07	6.8	39	-22.96	-70.52	0.12	0.08	0.13	0.07
MEJILLONES ⁽¹⁾	16-12-07	6.7	42	-22.95	-70.18	0.13	0.07	0.14	0.15
MEJILLONES CENTRAL ⁽¹⁾	16-12-07	6.7	42	-22.95	-70.18	0.18	0.10	0.20	0.18
MEJILLONES PUERTO ⁽¹⁾	16-12-07	6.7	42	-22.95	-70.18	0.40	0.48	0.48	0.24
MICHILLA ⁽¹⁾	16-12-07	6.7	42	-22.95	-70.18	0.17	0.17	0.18	0.09
IQUIQUE E. CHIPANA ⁽¹⁾	04-02-08	6.3	46	-20.27	-70.27	0.14	0.25	0.27	0.17
PICA ⁽¹⁾	24-03-08	6.2	124	-20.20	-69.36	0.29	0.25	0.29	0.16
FUERTE BAQUEDANO ⁽¹⁾	10-09-08	6.0	34	-20.45	-69.49	0.10	0.15	0.15	0.08
IQUIQUE E. CHIPANA ⁽¹⁾	10-09-08	6.0	34	-20.45	-69.49	0.14	0.25	0.27	0.17
PICA ⁽¹⁾	10-09-08	6.0	34	-20.45	-69.49	0.58	0.63	0.76	0.44
CUYA ⁽¹⁾	13-11-09	6.4	38	-19.51	-70.52	0.13	0.13	0.14	0.06
HUARA ⁽¹⁾	13-11-09	6.4	38	-19.51	-70.52	0.11	0.12	0.14	0.10
PISAGUA ⁽¹⁾	13-11-09	6.4	38	-19.51	-70.52	0.13	0.15	0.18	0.07
CONCEPCION CENTRO ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.40	0.29	0.40	0.40
CONTITUCION ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.55	0.64	0.76	0.35
FLORIDA ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.13	0.19	0.20	0.10
HUALAÑE ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.39	0.46	0.54	0.39
LLOLLEO ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.32	0.56	0.58	0.71
MATANZAS ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.34	0.31	0.35	0.23
PAPUDO ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.29	0.42	0.48	0.15

Estación	Fecha	Mw	Prof. [Km]	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA X [g]	PGA Y [g]	PGA H [g]	PGA V [g]
SANTIAGO CENTRO ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.31	0.22	0.37	0.18
TALCA ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.48	0.42	0.51	0.23
VALPARAISO UTFSM ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.14	0.08	0.14	0.31
VIÑA DEL MAR EL SALTO ⁽¹⁾	27-02-10	8.8	30	-35.91	-72.73	0.34	0.35	0.44	0.26
C100 ⁽²⁾	31-10-13	6.5	52	-30.73	-71.50	0.08	0.06	0.08	0.05
C110 ⁽²⁾	31-10-13	6.5	52	-30.73	-71.50	0.08	0.06	0.08	0.05
C130 ⁽²⁾	31-10-13	6.5	52	-30.73	-71.50	0.11	0.09	0.12	0.06
T03A ⁽²⁾	01-04-14	8.2	38	-19.57	-70.91	0.57	0.60	0.80	0.22
T05A ⁽²⁾	01-04-14	8.2	38	-19.57	-70.91	0.31	0.27	0.41	0.24
T06A ⁽²⁾	01-04-14	8.2	38	-19.57	-70.91	0.27	0.22	0.30	0.16
T07A ⁽²⁾	01-04-14	8.2	38	-19.57	-70.91	0.51	0.61	0.64	0.33
T08A ⁽²⁾	01-04-14	8.2	38	-19.57	-70.91	0.45	0.39	0.51	0.32
T09A ⁽²⁾	01-04-14	8.2	38	-19.57	-70.91	0.40	0.57	0.58	0.31
T10A ⁽²⁾	01-04-14	8.2	38	-19.6	-70.91	0.65	0.78	0.83	1.02
T13A ⁽²⁾	01-04-14	8.2	38	-19.6	-70.91	0.27	0.34	0.38	0.23
T08A ⁽²⁾	03-04-14	6.3	25	-20.3	-70.61	0.08	0.06	0.08	0.06
T03A ⁽²⁾	03-04-14	7.6	27	-20.52	-70.44	0.29	0.23	0.33	0.11
T05A ⁽²⁾	03-04-14	7.6	27	-20.52	-70.44	0.19	0.18	0.22	0.16
T07A ⁽²⁾	03-04-14	7.6	27	-20.5	-70.44	0.54	0.35	0.62	0.31
T08A ⁽²⁾	03-04-14	7.6	27	-20.5	-70.44	0.33	0.46	0.51	0.24
T09A ⁽²⁾	03-04-14	7.6	27	-20.52	-70.44	0.20	0.19	0.22	0.10
T10A ⁽²⁾	03-04-14	7.6	27	-20.52	-70.44	0.59	0.62	0.62	0.44
T12A ⁽²⁾	03-04-14	7.6	27	-20.52	-70.44	0.12	0.15	0.17	0.07
T13A ⁽²⁾	03-04-14	7.6	27	-20.52	-70.44	0.38	0.37	0.46	0.28
V03A ⁽²⁾	23-08-14	6.4	40	-32.74	-71.50	0.19	0.22	0.23	0.11
V09A ⁽²⁾	23-08-14	6.4	40	-32.74	-71.50	0.20	0.19	0.24	0.12
V11A ⁽²⁾	23-08-14	6.4	40	-32.74	-71.50	0.10	0.10	0.12	0.07
V16A ⁽²⁾	23-08-14	6.4	40	-32.74	-71.50	0.10	0.10	0.12	0.04
V18A ⁽²⁾	23-08-14	6.4	40	-32.74	-71.50	0.37	0.38	0.39	0.21
T11A ⁽²⁾	23-03-15	6.3	121	-18.42	-69.27	0.09	0.07	0.10	0.05
A05F ⁽²⁾	10-06-15	6.0	130	-22.43	-68.58	0.09	0.15	0.16	0.10
C010 ⁽²⁾	23-08-15	6.0	50	-29.72	-71.25	0.09	0.12	0.14	0.06
C330 ⁽²⁾	23-08-15	6.0	50	-29.72	-71.25	0.10	0.07	0.10	0.03
C110 ⁽²⁾	16-09-15	7.6	16	-31.59	-71.79	0.18	0.23	0.23	0.08
C140 ⁽²⁾	16-09-15	7.6	16	-31.59	-71.79	0.07	0.09	0.09	0.04
ROC1 ⁽²⁾	16-09-15	7.6	16	-31.59	-71.79	0.04	0.08	0.08	0.03
V15A ⁽²⁾	16-09-15	7.6	16	-31.59	-71.79	0.12	0.09	0.12	0.03
C110 ⁽²⁾	16-09-15	8.4	11	-31.55	-71.86	0.82	0.71	0.82	0.46
C140 ⁽²⁾	16-09-15	8.4	11	-31.55	-71.86	0.30	0.18	0.30	0.16
C180 ⁽²⁾	16-09-15	8.4	11	-31.55	-71.86	0.48	0.51	0.65	0.23

Estación	Fecha	Mw	Prof. [Km]	Lat. [°]	Lon. [°]	PGA X [g]	PGA Y [g]	PGA H [g]	PGA V [g]
C200 ⁽²⁾	16-09-15	8.4	11	-31.55	-71.86	0.25	0.25	0.30	0.18
C260 ⁽²⁾	16-09-15	8.4	11	-31.55	-71.86	0.36	0.24	0.37	0.14
C110 ⁽²⁾	17-09-15	6.6	40	-31.54	-71.75	0.12	0.09	0.13	0.07
C110 ⁽²⁾	22-09-15	6.2	63	-31.45	-71.13	0.12	0.14	0.15	0.07
C110 ⁽²⁾	26-09-15	6.3	40	-30.79	-71.42	0.27	0.30	0.36	0.15
C180 ⁽²⁾	26-09-15	6.3	40	-30.79	-71.42	0.41	0.64	0.65	0.25
C200 ⁽²⁾	03-10-15	6.0	33	-30.37	-71.37	0.15	0.15	0.19	0.07
C260 ⁽²⁾	03-10-15	6.0	33	-30.37	-71.37	0.10	0.13	0.13	0.07
A23C ⁽²⁾	07-11-15	6.8	47	-30.87	-71.43	0.07	0.06	0.07	0.03
A24C ⁽²⁾	07-11-15	6.8	47	-30.87	-71.43	0.05	0.05	0.06	0.02
C070 ⁽²⁾	07-11-15	6.8	47	-30.87	-71.43	0.19	0.25	0.25	0.09
C100 ⁽²⁾	07-11-15	6.8	47	-30.87	-71.43	0.11	0.15	0.17	0.08
C180 ⁽²⁾	07-11-15	6.8	47	-30.87	-71.43	0.20	0.19	0.20	0.08
C260 ⁽²⁾	07-11-15	6.8	47	-30.9	-71.43	0.11	0.13	0.14	0.09
A10F ⁽²⁾	27-11-15	6.3	37	-24.8	-70.55	0.06	0.07	0.07	0.02
C180 ⁽²⁾	19-12-15	6.0	49	-30.6	-71.31	0.14	0.22	0.22	0.08
A14C ⁽²⁾	25-07-16	6.0	60	-26.11	-70.48	0.22	0.25	0.28	0.11
A15C ⁽²⁾	25-07-16	6.0	60	-26.11	-70.48	0.43	0.41	0.44	0.42
A16C ⁽²⁾	25-07-16	6.0	60	-26.1	-70.48	0.27	0.24	0.29	0.10
A17C ⁽²⁾	25-07-16	6.0	60	-26.1	-70.48	0.30	0.38	0.39	0.21
M02L ⁽²⁾	04-11-16	6.4	95	-35.06	-71.00	0.08	0.09	0.10	0.05
A07Y ⁽²⁾	25-12-16	7.6	30	-43.52	-74.39	0.09	0.08	0.09	0.05
A08Y ⁽²⁾	25-12-16	7.6	30	-43.52	-74.39	0.08	0.07	0.08	0.04
V02A ⁽²⁾	23-04-17	6.0	23	-33.02	-72.12	0.06	0.08	0.09	0.03
R12M ⁽²⁾	24-04-17	6.9	24	-33.09	-72.09	0.11	0.13	0.13	0.07
R13M ⁽²⁾	24-04-17	6.9	24	-33.09	-72.09	0.07	0.09	0.11	0.04
R20M ⁽²⁾	24-04-17	6.9	24	-33.09	-72.09	0.10	0.08	0.11	0.03
V02A ⁽²⁾	24-04-17	6.9	24	-33.09	-72.09	0.37	0.34	0.40	0.10
V05A ⁽²⁾	24-04-17	6.9	24	-33.09	-72.09	0.20	0.25	0.26	0.22
V07A ⁽²⁾	24-04-17	6.9	24	-33.09	-72.09	0.14	0.19	0.22	0.08
A04P ⁽²⁾	10-10-17	6.3	99	-18.49	-69.74	0.14	0.13	0.16	0.05
A05P ⁽²⁾	10-10-17	6.3	99	-18.49	-69.74	0.13	0.19	0.20	0.11
A06P ⁽²⁾	10-10-17	6.3	99	-18.49	-69.74	0.11	0.09	0.12	0.07
A12P ⁽²⁾	10-10-17	6.3	99	-18.49	-69.74	0.13	0.13	0.14	0.07
A13P ⁽²⁾	10-10-17	6.3	99	-18.49	-69.74	0.12	0.15	0.15	0.09
A16P ⁽²⁾	10-10-17	6.3	99	-18.49	-69.74	0.09	0.10	0.11	0.05
A04P ⁽²⁾	21-01-18	6.2	129	-18.88	-69.61	0.15	0.17	0.17	0.06
A05P ⁽²⁾	21-01-18	6.2	129	-18.88	-69.61	0.12	0.08	0.12	0.07
A13P ⁽²⁾	21-01-18	6.2	129	-18.88	-69.61	0.20	0.10	0.20	0.08
A16P ⁽²⁾	21-01-18	6.2	129	-18.88	-69.61	0.22	0.19	0.24	0.10

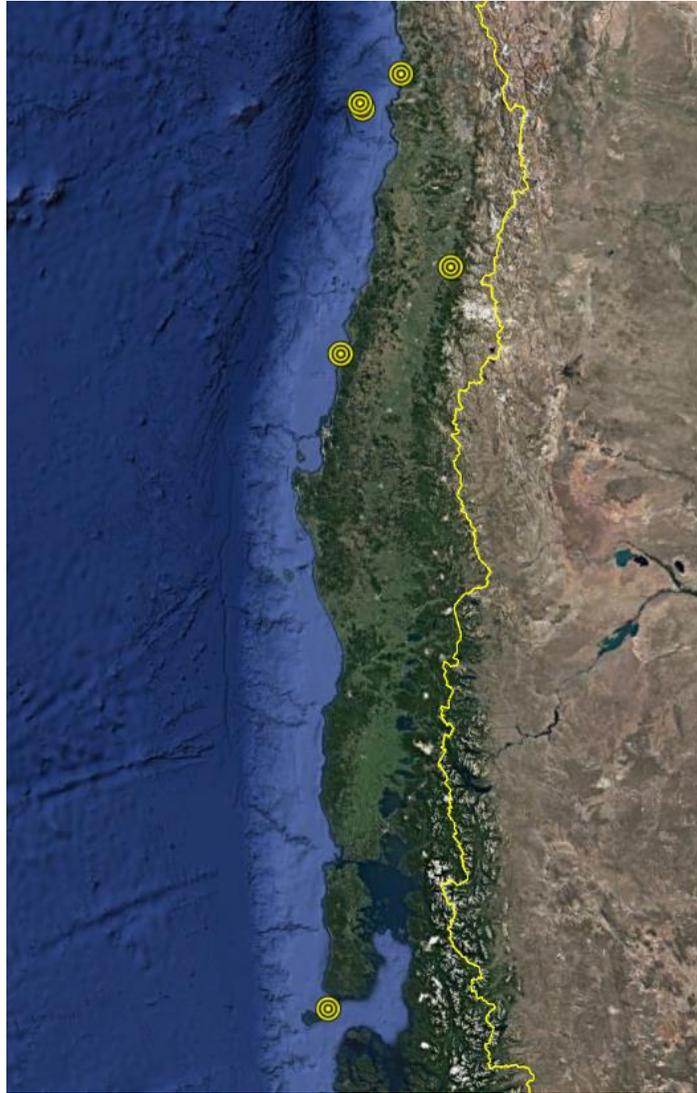
⁽¹⁾ Recuperado de <http://terremotos.ing.uchile.cl>

⁽²⁾ Recuperado de <http://evtdb.csn.uchile.cl>

Las Figuras 6.1 y 6.2 muestran el mapa con las distribuciones de los epicentros de los registros sísmicos considerados.



Figura 6.1: Mapa distribución de registros sísmicos zona norte-centro. Google. (s.f.).
"Mapa de Chile, Chile en Google maps". Recuperado el 9 de Agosto, 2018,
de: <https://www.google.com/maps/place/Chile>.



*Figura 6.2: Mapa distribución de registros sísmicos zona centro-sur. Google. (s.f.).
"Mapa de Chile, Chile en Google maps". Recuperado el 9 de Agosto, 2018,
de: <https://www.google.com/maps/place/Chile>.*

CAPITULO 7 ANÁLISIS PARAMÉTRICO

7.1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los estudios de Shepherd et al. (1988) y Hill (1995), el uso de disipadores de energía tipo anillo friccional es beneficioso para elementos esbeltos. Sin embargo, se necesita precisar si el beneficio de utilizar este tipo de dispositivos depende de otras características del equipo a proteger.

Este capítulo describe los parámetros del modelo a utilizar en el análisis y las variables a evaluar.

7.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y VARIABLES DE ANÁLISIS

Este estudio analiza el efecto de diversas propiedades de los equipos, entre las cuales se incluyen la esbeltez, la frecuencia fundamental de vibración y el efecto de la excentricidad del centro de gravedad con respecto a los apoyos. El valor de las propiedades que se han fijado para el análisis paramétrico se presenta en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Propiedades constantes en análisis paramétrico.

Propiedad	VALOR
M	200 [kg]
L	1000 [mm]
β_x	2 [%]
af	0.4 [g]

Para efectos de análisis se asume un modelo en 2 dimensiones correspondiente al plano XZ, donde la componente vertical del equipo es infinitamente rígida. Se utilizan 2 apoyos, tal que la proyección del centro de gravedad del equipo en la base se encuentre situada entre estos. Además, la medida de intensidad utilizada para obtener las curvas de fragilidad es el PGA en la dirección horizontal X.

7.3. EFECTO DE LA EXCENTRICIDAD DE APOYOS Y ESBELTEZ

El primer estudio paramétrico se realiza sobre los efectos de la excentricidad de los apoyos para distintos valores de esbeltez en la reducción de la aceleración absoluta de diseño del equipo. Los valores de esbeltez (ζ) a utilizar son 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 y 3.0, mientras que los valores de excentricidad (e) son 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1.0. Las

Tablas 7.2 y 7.3 contienen las coordenadas en la dirección X de los apoyos 1 y 2, respectivamente. Se fija una frecuencia fundamental del equipo de 10 [Hz] para todas las combinaciones de excentricidad y esbeltez.

Tabla 7.2: Coordenadas en la dirección X según esbeltez y excentricidad del primer apoyo. Las coordenadas se encuentran en [mm].

ζ / e	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
0,50	2000	2281	2618	3000	3414
0,75	1333	1629	2000	2420	2869
1,00	1000	1309	1707	2151	2618
1,50	667	1000	1434	1904	2387
2,00	500	854	1309	1791	2281
3,00	333	717	1194	1685	2180

Tabla 7.3: Coordenadas en la dirección X según esbeltez y excentricidad del segundo apoyo. Las coordenadas se encuentran en [mm].

ζ / e	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
0,50	-2000	-1781	-1618	-1500	-1414
0,75	-1333	-1129	-1000	-920	-869
1,00	-1000	-809	-707	-651	-618
1,50	-667	-500	-434	-404	-387
2,00	-500	-354	-309	-291	-281
3,00	-333	-217	-194	-185	-180

7.4. EFECTO DE LA FRECUENCIA Y ESBELTEZ

El segundo estudio evalúa la reducción de la probabilidad de exceder la aceleración absoluta de diseño del equipo para distintos valores de esbeltez y frecuencia. Los valores de esbeltez considerados son 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 y 3.0, mientras que los valores de frecuencia son 1.0, 1.3, 2.0, 4.0, 10.0, 20.0, 30.0 y 40.0 Hz. La Tabla 7.4 contiene las coordenadas en la dirección X de los apoyos, para las distintas esbelteces consideradas.

Tabla 7.4: Coordenadas en la dirección X según esbeltez ambos apoyos.

ζ	x_1 [mm]	x_2 [mm]
0,50	2000	-2000
0,75	1333	-1333
1,00	1000	-1000
1,50	667	-667
2,00	500	-500
3,00	333	-333

7.5. PARÁMETROS ALGORITMO GENÉTICO

En esta sección se establecen los parámetros considerados para la aplicación del algoritmo genético, descritos en el capítulo 5.

Se asume que el costo económico de los disipadores de energía es irrelevante en el análisis, entonces el parámetro $CTDR$ de la sección 5.3.2 es igual a 0.

En cuanto a los criterios de diseño de los disipadores de energía, se considera un $\%g_{MIN}$ igual al 10%, a fin de que los disipadores permanezcan en su rama elástica durante la operación del equipo. Por otro lado, se asume un valor de $\%g_{MAX}$ igual al 100%, dado que imponer el doble de peso tributado en cada disipador de energía como fuerza de precompresión, es suficiente para imponer un límite máximo de la fuerza última de los disipadores. Se tiene, además que los fabricantes limitan $P_{\%min}$ y $P_{\%max}$ en 10% y 50%, respectivamente. Para asegurar que los disipadores de energía no sobrepasen sus deformaciones máximas antes que el equipo alcance su aceleración absoluta de diseño, se impone que la probabilidad de excedencia límite de las deformaciones máximas de los disipadores (ϵ) sea igual a 0.005 para el periodo de un año.

A fin de que el algoritmo de optimización converja a una solución que satisfaga los criterios de diseño se utiliza un coeficiente de importancia de la función de criterios de diseño (CCD) igual a 0.2, valor que no limita la posibilidad de recombinación de los padres.

En cuanto a las tasas de recombinación, mutación y conservación se utilizaron los valores más recurrentes en la mayoría de los análisis que utilizan este tipo de algoritmos de acuerdo con Haupt et al. (2004) ($T_K = 0.33, T_R = 0.95$ y $T_M = 0.05$).

CAPITULO 8 SELECCIÓN EQUIPOS

8.1. INTRODUCCIÓN

Tras los eventos sísmicos que han ocurrido durante la historia moderna se ha observado equipos susceptibles a aceleraciones, muchos de los cuales impactan directamente en la economía y diario vivir. La identificación experimental de las propiedades dinámicas de los equipos ha sido un tema escasamente estudiado. No obstante, es posible encontrar en la literatura algunos casos de estudio útiles para la presente investigación.

Este capítulo describe los ejemplos de equipos seleccionados para realizar los diseños de sistemas de protección sísmica utilizando disipadores de energía de anillos friccionales. En todos los casos se considera que la medida de intensidad para la obtención de las curvas de fragilidad es el PGA de la resultante vectorial horizontal.

8.2. BUSHING DE UN TRANSFORMADOR DE 230KV

Un bushing es un componente de los transformadores eléctricos necesario para prevenir las descargas eléctricas de las líneas de alta tensión que llegan y salen de estos equipos. La Figura 8.1 muestra un esquema de un transformador y en específico un bushing. Las Tablas 8.1 y 8.2 contienen las propiedades físicas y geométricas del bushing de un transformador 230kV a estudiar (Koliou et al. 2012) las cuales no consideran estructura de soporte.

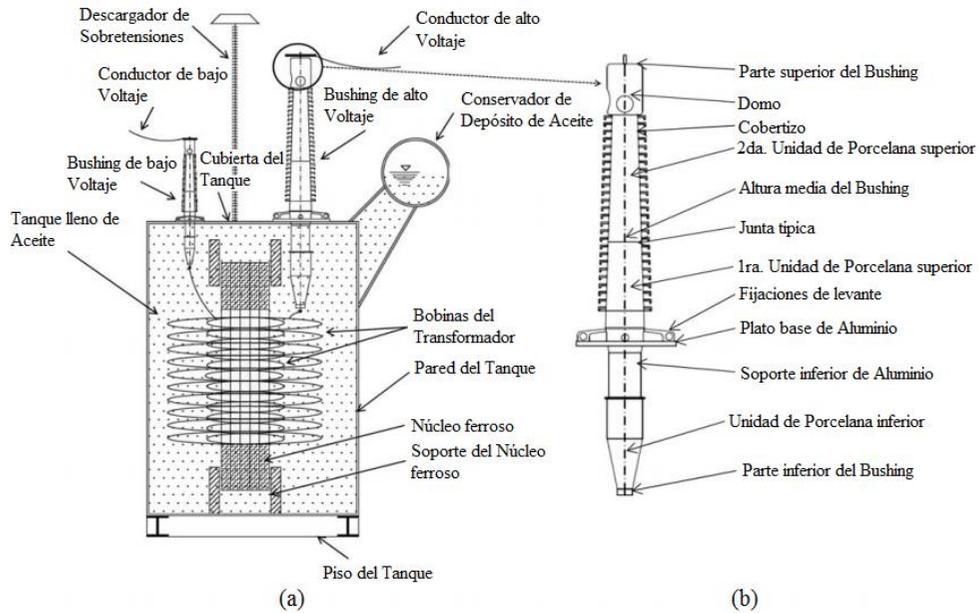


Figura 8.1: Sección transversal simplificada de (a) transformador de voltaje de 230kV y (b) bushing, Filiatrault et al. (2013).

Por otro lado, el estándar IEEE-693 (IEEE 2005) define 3 niveles de certificación de equipos eléctricos de subestaciones eléctricas, los cuales son:

- i. Baja calificación: Los equipos son diseñados para resistir un máximo PGA del sitio de 0.1 [g].
- ii. Media calificación: Los equipos son diseñados para PGA del sitio mayores a 0.1 [g] y menores o iguales a 0.5 [g].
- iii. Alta calificación: Los equipos son diseñados para resistir PGA del sitio mayores que 0.5 [g].

El espectro de aceleración asociado a un nivel de certificación moderada queda definido, en función de la frecuencia (f) y amortiguamiento (β) del equipo (IEEE 2005), por las siguientes ecuaciones:

$$S_a[g] = \begin{cases} 0.572\delta \cdot f, & 0.0 \leq f < 1.1 \\ 0.625\delta, & 1.1 < f \leq 8.0 \\ \frac{6.6\delta - 2.64}{f} - 0.2\delta + 0.33, & 8.0 < f \leq 33 \\ 0.25, & f > 33 \end{cases} \quad (8.1)$$

$$\delta = \frac{3.21 - \ln(\beta)}{2.1156} \quad (8.2)$$

El espectro establece una aceleración absoluta de diseño en el centro de gravedad del bushing 230 kV igual a 0.3 [g], para las propiedades descritas en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Propiedades físicas del bushing de transformador de 230kV.

Propiedad	VALOR
M	381 [kg]
L	356 [mm]
f_x	25.4 [Hz]
f_y	25.3 [Hz]
β_x	2.1 [%]
β_y	2.3 [%]
Af	0.3 [g]

Tabla 8.2: Coordenadas puntos de apoyo del bushing de transformador de 230kV

N°	X [mm]	Y [mm]
1	267	0
2	0	267
3	-267	0
4	0	-267

8.3. INTERRUPTOR DE CIRCUITOS DE 380KV

Un interruptor de circuitos (circuit breaker) protege circuitos eléctricos, previniendo daños causados por sobrecorriente. La Figura 8.2 muestra un esquema de un interruptor de circuitos.

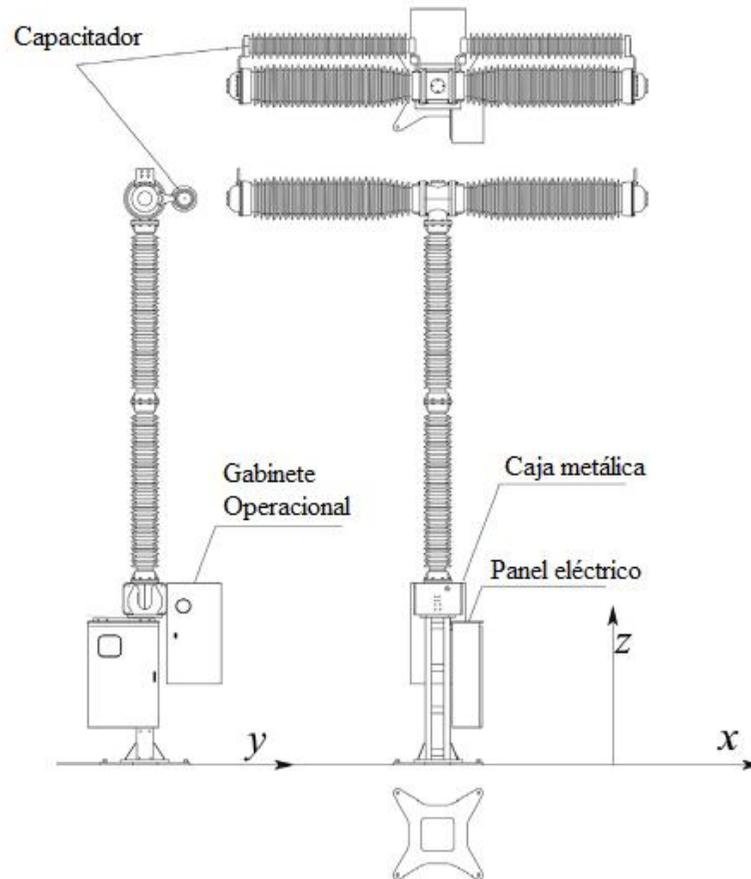


Figura 8.2: Esquema interruptor de circuitos de alto voltaje.

Las Tablas 8.3 y 8.4 contienen las propiedades físicas y geométricas del interruptor de circuitos de 380kV a estudiar (Alessandri *et al.* 2015). La certificación sísmica considerada para el equipo, de acuerdo con el estándar IEEE-693, es 0.5 [g], correspondiente a un nivel sísmico moderado. La certificación moderada establece una aceleración absoluta de diseño en el centro de gravedad de 0.67 [g], para las propiedades descritas en la Tabla 8.3, según las ecuaciones (8.1) y (8.2).

Tabla 8.3: Propiedades físicas interruptor de circuitos de 380kV.

Propiedad	VALOR
M	1458 [kg]
L	5713 [mm]
f_x	0.98 [Hz]
f_y	1.02 [Hz]
β_x	3.0 [%]
β_y	3.0 [%]
A_f	0.67 [g]

Tabla 8.4: Puntos de apoyos interruptor de circuitos de 380kV.

N°	X [mm]	Y [mm]
1	560	0
2	0	560
3	-560	0
4	0	-560

8.4. CHILLER INDUSTRIAL PESADO

Un chiller es una máquina frigorífica utilizada para enfriar el aire o agua necesarios para sistemas de aire acondicionado o para frigoríficos de alimentos. Las Tablas 8.5 y 8.6 contienen las propiedades físicas y geométricas del chiller industrial pesado a estudiar (Fathali & Filiatrault 2007). El equipo estudiado no cuenta con apoyos para control de vibraciones. El chiller utilizado en este estudio se muestra en la Figura 8.3.

Tabla 8.5: Propiedades físicas chiller industrial pesado.

Propiedad	VALOR
M	11997 [kg]
L	969 [mm]
f_x	8.2 [Hz]
f_y	8.5 [Hz]
f_z	10.0 [Hz]
β_x	3.0 [%]
β_y	3.0 [%]
β_z	3.0 [%]
a_f	0.62 [g]

Tabla 8.6: Coordenadas puntos de apoyo chiller industrial pesado.

N°	X [mm]	Y [mm]
1	-2354	1087
2	-2354	-1021
3	2523	1087
4	2523	-1021



Figura 8.3: Espécimen de prueba de chiller industrial pesado.

En este estudio se utiliza el espectro de aceleraciones de la norma chilena NCh2369.Of2003 para definir las aceleraciones absolutas de diseño en el centro de gravedad de equipos industriales. Cabe destacar que este equipo está sujeto al capítulo 7 de esta norma y asumiendo que no se conocen las características del edificio se obtiene la siguiente ecuación:

$$S_a = \frac{6.16A_0}{R_p} \quad (8.3)$$

donde:

A_0 : Aceleración efectiva máxima del suelo.

R_p : Factor de modificación de la respuesta del equipo.

Se asume un emplazamiento en zona sísmica 2, Adicionalmente, se asume un factor de modificación de respuesta igual a 3.0. De acuerdo con lo supuesto y los criterios de la norma chilena NCh2369.Of2003 se tiene que la aceleración absoluta de diseño en el centro de gravedad del equipo toma un valor de 0.62 [g].

8.5. CHILLER INDUSTRIAL LIVIANO

Las Tablas 8.7 y 8.8 contienen las propiedades físicas y geométricas del chiller industrial liviano a estudiar (Fathali y Filiatrault 2007), equipo que no cuenta con apoyos anti-vibratorios. La Figura 8.4 muestra el espécimen utilizado en el estudio.

Tabla 8.7: Propiedades físicas chiller industrial liviano.

Propiedad	VALOR
M	1971 [kg]
L	762 [mm]
f_x	17.9 [Hz]
f_y	9.6 [Hz]
β_x	3.0 [%]
β_y	3.0 [%]
A_f	0.62 [g]

Tabla 8.8: Puntos de apoyos chiller industrial liviano.

N°	X [mm]	Y [mm]
1	-2421	-1311
2	1948	-1311
3	330	-1311
4	-2421	1000
5	1948	1000
6	330	1000



Figura 8.4: Espécimen de prueba de chiller industrial liviano.

Las aceleraciones absolutas de diseño en el centro de gravedad se obtuvieron de acuerdo con la ecuación (8.3) y asumiendo las mismas condiciones que el caso de estudio de la sección 8.4 del chiller industrial pesado.

8.6. PARÁMETROS ALGORITMO GENÉTICO

Los parámetros considerados para la aplicación del algoritmo genético, descritos en el capítulo 5 son los definidos en la sección 7.5 del análisis paramétrico.

CAPITULO 9 RESULTADOS

9.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta los resultados obtenidos del análisis paramétrico de los equipos seleccionados. Los resultados se muestran en base de gráficos y tablas acompañados de discusiones de lo obtenido.

Dado que los programas computacionales (comerciales o no) capaces de modelar la constitutiva de los disipadores de energía de anillo friccional, no posibilitan incorporar la metodología de selección de anillos friccionales en base a algoritmos genéticos, este estudio desarrolla un programa capaz de integrar la metodología propuesta. Este está compilado en el lenguaje C++ e incorpora la capacidad de calcular, en varios hilos de procesamiento, las iteraciones del algoritmo genético.

Para obtener los resultados se considera la curva de peligro sísmico de Santiago de Chile, la cual se obtiene del estudio de Petersen et al. (2018).

9.2. RESULTADOS ANÁLISIS PARAMÉTRICO

En esta sección se describen los resultados obtenidos para los casos propuestos en el capítulo 7.

9.2.1. EFECTO DE LA EXCENTRICIDAD DE APOYOS Y ESBELTEZ

La Figura 9.1 muestra el gráfico de superficie que contiene la reducción óptima posible de probabilidad de excedencia de la capacidad, considerando las propiedades definidas en las secciones (7.2), (7.3) y (7.6), las cuales son: periodo fundamental de 0.1 [s]; masa de 200 [kg] a una altura de 1000 [mm]; amortiguamiento del 2 [%]; y una capacidad de diseño de 0.4 [g]. De acuerdo con estas propiedades, se obtiene que la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño en un año es de 11.4 [%] y 99.7 [%] para una ventana de tiempo de 50 años.

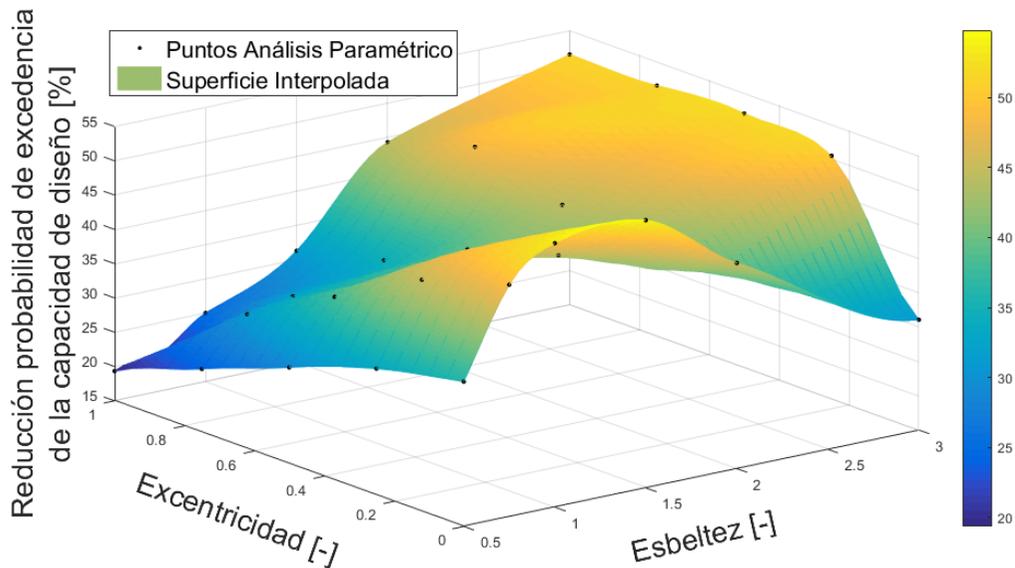


Figura 9.1: Efectos de la esbeltez y excentricidad en la máxima reducción de probabilidad de excedencia de capacidad de diseño.

En el gráfico anterior se puede observar el efecto en la reducción de probabilidad de excedencia de la capacidad del equipo de las dos variables estudiadas. Se observa que para valores de esbeltez en el rango $[0, 1.5]$, las reducciones en la probabilidad de excedencia de la capacidad son mayores a medida que los apoyos se encuentran menos excéntricos. Para el intervalo de esbeltez entre $(1.5, \infty)$ se observa, que la excentricidad de la posición de los apoyos aporta en las reducciones de la probabilidad de excedencia. No obstante, para valores de excentricidad superiores o iguales a 0.6 se observan reducciones de la probabilidad de excedencia constantes. Esto implica un límite a los beneficios obtenidos al modificar esta variable.

9.2.2. EFECTO DE LA FRECUENCIA Y ESBELTEZ

La Figura 9.2 muestra el gráfico de superficie que muestra la reducción óptima de probabilidad de alcanzar la capacidad del equipo utilizando el algoritmo establecido en este trabajo, considerando las propiedades descritas en el capítulo 7. En el gráfico se puede observar que el uso de los disipadores de energía de anillos friccionales para protección sísmica de equipos sensibles a aceleraciones está limitada principalmente a equipos rígidos, que de acuerdo con la norma NCh2369.Of2003 son aquellos cuyo periodo fundamental es igual o menor a 0.06 [s]. No obstante, se pueden esperar reducciones en la probabilidad de excedencia del orden del 50% para valores mayores o iguales a 10 [Hz]. De este mismo gráfico se observa que la frecuencia de inflexión es 4 [Hz]. Bajo este valor, el beneficio de incorporar disipadores de energía en el equipo es prácticamente nulo.

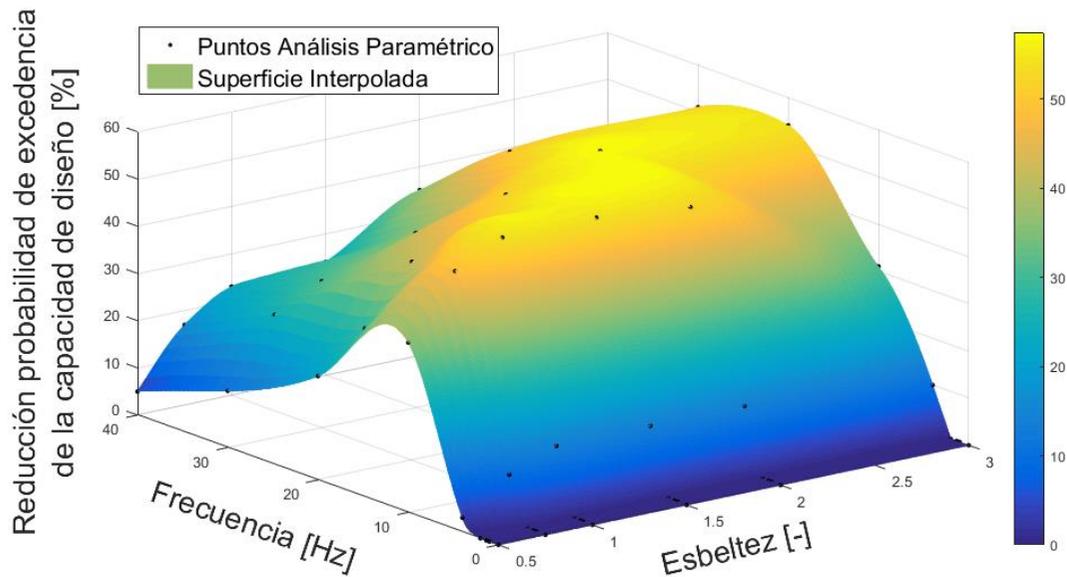


Figura 9.2: Efectos de la esbeltez y las frecuencias naturales de los equipos en la reducción de probabilidad de excedencia de capacidad de diseño.

Por otro lado, se observa lo comentado por Hill (1995), donde equipos de mayor esbeltez tienden a presentar mayores reducciones en la probabilidad de exceder su capacidad de diseño. Esto es más notorio a medida que la frecuencia fundamental del equipo aumenta, donde las reducciones no superan un 20% para configuraciones no esbeltas (esbelteces menores a 1) y superan el 50% para configuraciones esbeltas.

9.3. RESULTADOS SELECCIÓN DE EQUIPOS

La Tabla 9.1 muestra las variables contempladas en el análisis paramétrico que son: las frecuencias fundamentales del equipo f_x , f_y , f_z , esbeltez, ζ , y excentricidad, e . Se muestra además la reducción máxima posible de la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño de los equipos seleccionados en el capítulo 8 para un periodo de un año y para una ventana de tiempo de 50 años. En la Tabla 9.1 se muestra la probabilidad de excedencia de la capacidad sin protección sísmica (P_{sD}) y con disipadores de energía de anillos friccionales (P_{cD}), para las 2 ventanas de tiempo antes mencionadas.

Tabla 9.1: Resultados diseño protección sísmica equipos seleccionados.

Nº SECCIÓN EQUIPO	MASA [kg]	f_x [Hz]	f_y [Hz]	f_z [Hz]	ζ [-]	e [-]	PsD 1 AÑO [%]	PcD 1 AÑO [%]	REDUCCIÓN PROBABILIDAD 1 AÑO [%]	PsD 50 AÑOS [%]	PcD 50 AÑOS [%]
8.2	381	25.4	25.3	-	1.33	0.00	7.8	3.1	59.7	97.9	79.1
8.3	1458	1.0	1.0	-	10.20	0.00	4.6	4.6	0.0	90.1	90.1
8.4	11997	8.2	8.5	10.0	0.36	0.09	2.9	0.7	77.9	77.1	27.7
8.5	1971	17.9	9.6	-	0.37	0.37	2.3	1.0	55.6	68.5	40.2

En primer lugar, se corrobora la fuerte dependencia de la frecuencia fundamental de los equipos en la reducción de probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño de los equipos. Se observa que el equipo flexible (equipo sección 8.3 cuyo periodo es superior a los 0.06 [s]) no presenta reducción en la probabilidad de excedencia al utilizar los disipadores de energía en estudio. Esto se observa tanto en el análisis paramétrico realizado como en el diseño del interruptor de corriente de 380kV de la sección 8.3. Además, se observa que las frecuencias fundamentales de los equipos deben ser cercanas o superiores a los 10 [Hz] para obtener un beneficio considerable.

Por otro lado, es notorio el efecto de la masa sobre la reducción posible a obtener, puesto que a mayor masa se obtienen reducciones mayores de la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño. Se observa, además que para equipos de masa igual a superior a 1 [ton] se obtiene reducciones de la probabilidad de excedencia superiores al 50%, incluso en situaciones desfavorables de la posición de los disipadores. Esto se observa para el caso del chiller industrial liviano (sección 8.5), donde el equipo no es esbelto y sus apoyos se encuentran excéntricos, que de acuerdo con el gráfico de la Figura 9.1 se encuentra en una zona con reducciones en la probabilidad de excedencia disminuidas.

La Tabla 9.2 muestra las reducciones máximas posibles de la probabilidad de excedencia, utilizando las propiedades mecánicas del chiller industrial pesado (sección 8.4), al cual se modifican la posición de los apoyos con efecto de aumentar la esbeltez del sistema. Las variables mostradas son equivalentes a las especificadas para la Tabla 9.1.

Tabla 9.2: Resultados diseño protección sísmica chiller industrial pesado modificando esbeltez.

Nº SECCIÓN EQUIPO	MASA [kg]	f_x [Hz]	f_y [Hz]	f_z [Hz]	ζ [-]	e [-]	PsD 1 AÑO [%]	PcD 1 AÑO [%]	REDUCCIÓN PROBABILIDAD 1 AÑO [%]	PsD 50 AÑOS [%]	PcD 50 AÑOS [%]
8.4	11997	8.2	8.5	10.0	0.36	0.09	2.9	0.7	77.9	77.1	27.7
8.4	11997	8.2	8.5	10.0	0.75	0.05	2.9	0.2	91.8	77.1	11.4
8.4	11997	8.2	8.5	10.0	1.00	0.03	2.9	0.2	93.6	77.1	9.0
8.4	11997	8.2	8.5	10.0	1.50	0.02	2.9	0.2	94.0	77.1	8.5
8.4	11997	8.2	8.5	10.0	2.00	0.02	2.9	0.2	93.5	77.1	9.2
8.4	11997	8.2	8.5	10.0	3.00	0.01	2.9	0.2	93.3	77.1	9.3

Utilizando los gráficos de las Figuras 9.3 a la 9.8 e interpolando por la esbeltez y frecuencia se obtiene que las mejoras promedio son un 1.5, 3.9 y 2.8 veces mayores a los resultados esperados para el bushing de transformador de 230kV, el chiller industrial pesado y el chiller industrial liviano, respectivamente. Lo anterior muestra una relación no lineal en la reducción de la probabilidad de excedencia con respecto a la masa. Por lo tanto, se esperan reducciones mayores en la probabilidad de excedencia al proteger sísmicamente equipos de mayor masa.

En las Figuras 9.3 y 9.4 se muestran los gráficos de convergencia energética para el registro de Concepción Centro de la Tabla 6.1 y el diseño óptimo de la protección sísmica del chiller industrial pesado de la sección 8.4, considerando la esbeltez original y una esbeltez de 3.0, respectivamente.

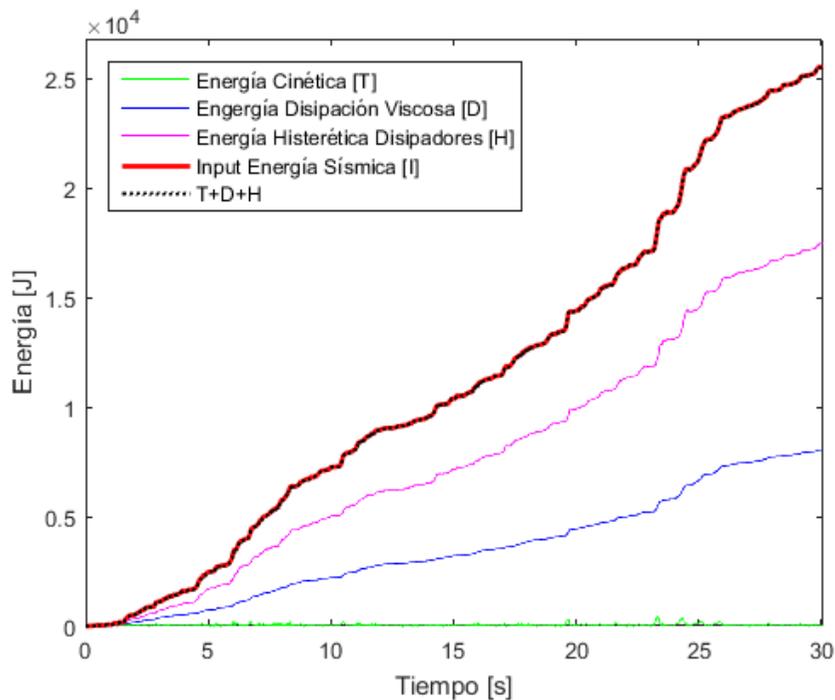


Figura 9.3: Convergencia energética para un chiller industrial pesado bajo el registro de Concepción Centro y esbeltez original.

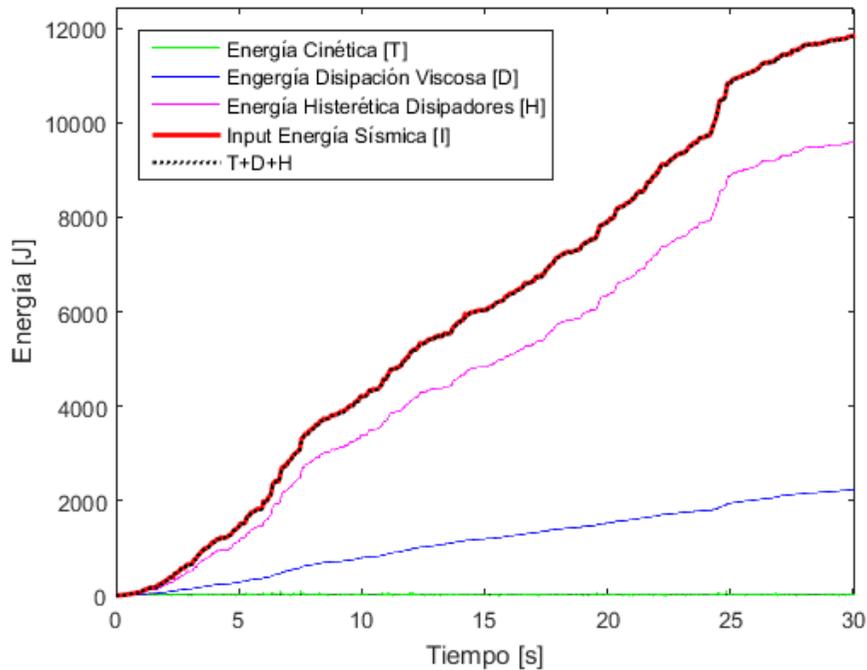


Figura 9.4: Convergencia energética para un chiller industrial pesado bajo el registro de Concepción Centro y esbeltez 3.0.

En las dos Figuras anteriores se observa que la mayor disipación de energía ocurre en los disipadores de energía de anillos friccionales, disminuyendo de esta forma la energía que debe ser disipada por el equipo, sus anclajes y componentes.

Por último, la Figura 9.5 muestra las curvas de fragilidad para el chiller industrial pesado sin y con protección sísmica. Se presentan 2 curvas de fragilidad para el caso con protección sísmica, las cuales corresponden al estado original de la posición de los apoyos y al estado de los apoyos reconfigurados con tal de conseguir una esbeltez del sistema sismorresistente igual a 3.0 [-]. En la Figura se observa un desplazamiento hacia la derecha de la curva de fragilidad de 0.7 [g] para una probabilidad del 50 [%] de exceder la capacidad de diseño. Además, para PGA bajo los 0.5 [g] se observan probabilidades de excedencia de la capacidad de diseño menores a 4.4 veces en comparación con el caso sin protección sísmica.

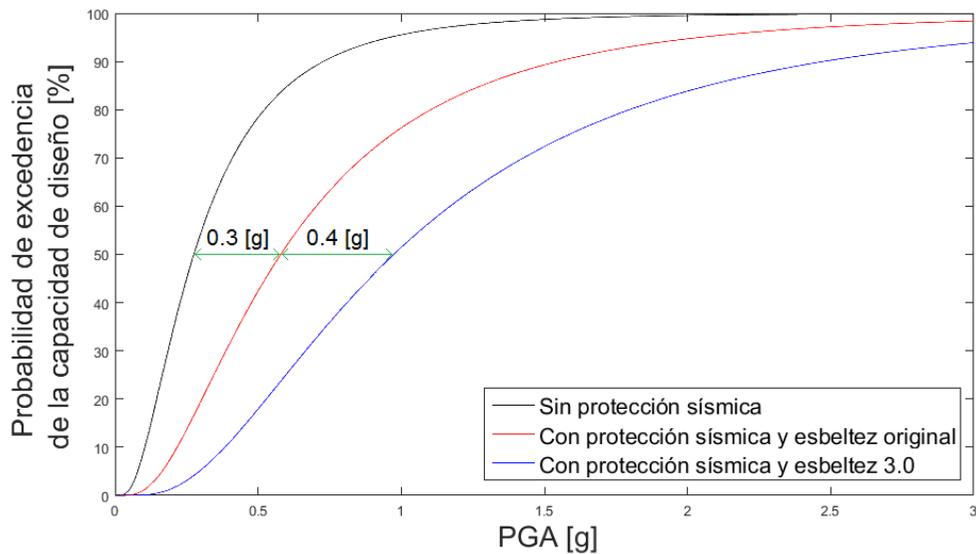


Figura 9.5: Curvas de fragilidad chiller industrial pesado sin y con disipación sísmica.

9.4. ALGORITMO GENÉTICO

Entre las variables del algoritmo genético más relevantes para la convergencia al valor óptimo de reducción son la población inicial y la constante de importancia de la función criterios de diseño (CCD). Se observa que la ecuación (5.16), que determina el tamaño de población, es válida siempre y cuando se conserven los rangos de frecuencias fundamentales del equipo establecidas anteriormente en los resultados del análisis paramétrico (equipos con periodos fundamentales menores a 0.25 [s]). Esto se debe a que el dominio de la solución para equipos con frecuencias fundamentales bajas tiende a tener vecindades al óptimo con gradientes muy elevados, lo que aumenta la probabilidad de omitir la región del óptimo global y converger sobre un óptimo local.

Por otro lado, la constante de importancia de la función criterios de diseño afecta la capacidad del algoritmo genético para recorrer el espacio de soluciones, puesto que en circunstancias donde las reducciones máximas posibles no son considerables, un valor elevado de esta constante puede provocar que el algoritmo converja a un óptimo local. No obstante, un valor bajo de esta limita la capacidad de discriminar soluciones inviables determinadas por los criterios de diseño, por lo que esta constante depende del valor esperado de la solución. Se observa que un valor aconsejable para CCD, es la mitad de la reducción máxima posible esperada.

Otro punto importante por notar del algoritmo genético es que converge de forma rápida a la solución. En general se obtiene el óptimo entre 15 y 25 iteraciones. Los resultados se obtuvieron bajo 14 hilos simultáneos de procesamiento. Además, considerando que el computador utilizado en este estudio contaba con un procesador de 8 núcleos reales capaces de realizar 16 hilos de procesamiento a 3.84 [GHz] cada uno y una memoria RAM en DDR4 a 2400 [MHz], se obtuvo que para una población de 80 padres el algoritmo converge a una solución con un tiempo promedio de 2.5 [hrs].

Este último punto mencionado es importante pues permite, si se quisiera, la incorporación de más variables de diseño al algoritmo genético. Particularmente la ubicación de cada disipador, abordando de esta forma la excentricidad y esbeltez del sistema. Esto implicaría un cambio en el cromosoma del algoritmo genético, donde habría n -particiones (correspondientes a los n -disipadores) subdivididas en 5 particiones correspondientes a la fuerza última, el número de elementos, la precompresión, las coordenadas X e Y en el plano horizontal para cada disipador. Utilizando la ecuación (5.15), y considerando que la mayoría de los diseños consideran 4 apoyos, se obtiene un aumento de 3 veces el número de padres de la ecuación (5.16), lo que implica un aumento de a lo menos 3 veces al tiempo actual promedio de convergencia para 80 padres. Además, este planteamiento permite que cada disipador obtenga una propiedad distinta, lo que podría obtener mejores resultados en equipos que no tienen un eje de simetría.

Otra forma de incluir las posiciones en el plano horizontal de cada disipador de energía sería utilizar 3 particiones bases consistentes en las propiedades de todos los disipadores de energía y 2 particiones extras por cada disipador de energía. Considerando nuevamente 4 disipadores a utilizar se obtiene un aumento de 2.35 veces el número de padres calculados según la ecuación (5.16).

No obstante, se puede afirmar, pese a los posibles cambios que se pueden realizar al algoritmo genético, la presente metodología permite obtener el diseño de protección sísmica óptimo para equipos sensibles a aceleraciones.

CAPITULO 10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1. CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación ha examinado las características, los requerimientos de diseño y las respuestas dinámicas de los disipadores de energía de anillos friccionales. Basado en estos disipadores de energía, el estudio de procedimientos de diseño de sistemas de protección sísmica y metodologías de optimización se desarrolla una metodología de selección de sistemas de anillos friccionales para proteger sísmicamente equipos susceptibles a aceleraciones. Los puntos importantes de este estudio son los siguientes:

- i. Los disipadores de energía de anillos friccionales son candidatos para el uso en aplicaciones sismorresistentes, siendo utilizados como parte de los apoyos de los equipos, lo que es investigado en este estudio.
- ii. La esbeltez del equipo y la excentricidad del sistema influyen en las posibles reducciones máximas de la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño del equipo. Se observó diferencias superiores al 60 [%] en las reducciones de la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño al modificar estas dos variables.
- iii. La frecuencia fundamental mínima de los equipos a proteger sísmicamente con estas tecnologías debe ser cercanas o superiores a los 10 [Hz].
- iv. Se observó que la masa de equipo contribuye en obtener mejores reducciones en la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño, siendo destacable el uso de estas tecnologías para proteger sísmicamente equipos de mayor masa. Se observó que para equipos de masa igual o superior a 1 [ton] se obtienen reducciones de la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño sobre un 50 [%].
- v. Los disipadores de energía de anillos friccionales configurados como apoyos de los equipos son capaces de absorber grandes cantidades de energía, limitando de cierta forma que los equipos requieran disipar energía a través de daños en sus componentes.
- vi. Se observaron reducciones de hasta un 90 [%] en la probabilidad de excedencia de las aceleraciones de diseño de los equipos al modificar la posición de los apoyos para lograr una mayor esbeltez del sistema sismorresistente.
- vii. Es factible modificar parámetros de diseño tal que se obtengan reducciones considerables de la probabilidad de excedencia de la capacidad de diseño.

Dado las conclusiones alcanzadas han permitido abordar cada uno de los objetivos planteados en este estudio.

10.2. RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS

El trabajo desarrollado en esta tesis ha establecido la base para futuras investigaciones. Las áreas sugeridas para trabajos adicionales son:

- i. Creación de ábacos de diseño utilizando la metodología desarrollada en este trabajo.
- ii. Integración de la posición de cada disipador como variable en el cromosoma del algoritmo genético utilizado.
- iii. Considerar diafragma rígido de masa no despreciable entre los disipadores y equipo a proteger sísmicamente, de modo de incorporar al algoritmo genético una variable de masa del sistema para obtener mejores resultados en las reducciones de probabilidad de excedencia de la capacidad del equipo.
- iv. Estudio de comparación de diseños de sistemas de protección sísmica de equipos sensibles a aceleraciones utilizando análisis dinámico lineal-elástico equivalentes y análisis dinámico no lineal.
- v. Considerar la capacidad de diseño del equipo como variable en el análisis paramétrico.

CAPITULO 11 BIBLIOGRAFÍA

1. Alessandri, S., Giannini, R., Paolacci, F. & Malena, M., 2015. "Seismic retrofitting of an HV circuit breaker using base isolation with wire ropes. Part 1: Preliminary tests and analyses", Engineering Structures, Vol. 98, 251-262.
2. Alessandri, S., Giannini, R., Paolacci, F. & Malena, M., 2015. "Seismic retrofitting of an HV circuit breaker using base isolation with wire ropes. Part 2: Shaking-table test validation", Engineering Structures, Vol. 98, 263-274.
3. Almazán, J. L., Auad, G., y García, G. (2015). "Aislamiento tridimensional no-lineal de vibraciones por medio de flexibilidad vertical-rotacional". XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.
4. Azadpour, M. V, Zare, A., & Rahmani, H. (2016). "Optimum seismic design of tuned story mass damper using multi-objective genetic algorithm". Journal of Seismology and Earthquake Engineering. Vol. 18, N° 4.
5. Balaji, P. S., Moussa, L., Rahman, M. E., & Vuia, L. T. (2015). "Experimental investigation on the hysteresis behavior of the wire rope isolators". Journal of Mechanical Science and Technology. Vol. 29, 1527-1536.
6. Baker, J., 2015. "Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamics Structural Analysis", Earthquake Spectra, Vol. 31, No. 1, 579-599.
7. Bathe, K. J, & Wilson, E. L., 1973. "Stability and accuracy analysis of direct integration methods". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 1, 283-291.
8. Camp, C., Peseshk, S., & Cao, G. (1998). "Optimized Design of two-dimensional Structures using a Genetic Algorithm", Journal of Structural Engineering, Vol. 124. 551-559.
9. Cantú-Paz, E. (1999). "Designing efficient and accurate Parallel Genetic Algorithm" (Doctoral Thesis). University of Illinois. Urbana.
10. Carreño, E., Bravo, B., Suárez, A., y Tordesillas, J. M. (2009) "Registro y Tratamiento de Acelerogramas", Física de la Tierra, Vol 11. 81-111.
11. Chopra, A. 2014, Analysis of nonlinear response: Newmark's method (174-179). In Dynamics of structures. Naucalpan de Juárez: Pearson Education Limited.
12. Computers and Structures, Inc., 2019, SAP2000® (Version 19.2.2) [Programa Computacional]. New York. Recuperado de <https://www.csiamerica.com/support/downloads>.
13. Deb. K. (1991). "Optimal design of a welded beam via genetic algorithms", AIAA Journal, Vol. 29. 2013-2015.

14. Demetriades, G. F., Constantinou, M. C., & Reinhorn, A. M. (1992), "Study of Wire Rope Systems for Seismic Protection of Equipment in Buildings" (Technical Report NCEER-92-0012), New York: National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
15. Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K., & Carlson, J. D. (1998). "An experimental study of MR dampers for seismic protection", *Smart Materials and Structures*, Vol. 7. No. 5.
16. Fan, Y., Loh, C., Yang, J. N., & Lin, P., (2009). "Experimental performance evaluation of an equipment isolation using MR dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 38. 285-305.
17. Fathali, S., & Filiatraut, A. (2007). "Experimental Seismic Performance Evaluation of Isolation/Restrain Systems for Mechanical Equipment, Part 1: Heavy Equipment Study", Technical Report MCEER-07-0007.
18. Fathali, S., & Filiatraut, A. (2007). "Experimental Seismic Performance Evaluation of Isolation/Restrain Systems for Mechanical Equipment, Part 1: Light Equipment Study", Technical Report MCEER-07-0007.
19. Filiatraut, A., Tinawi, R., & Léger, P. (1992). "The use of energy balance in nonlinear seismic analysis", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 10. 4111-4116.
20. Filiatraut, A., Tremblay, R., & Kar, R. (2000). "Performance Evaluation of Friction Spring Seismic Damper", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126. 491-499.
21. Gulerce, Z., Erduran, E., Kunnath, S. K., & Abrahamson, N. A. (2012). "Seismic demand models for probabilistic risk analysis of near fault vertical ground motion effects on ordinary highway bridges", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 41. 159-175.
22. Harvey, P. S., Wiebe, R., & Gavin, H. P. (2013), "On the chaotic response of a nonlinear rolling isolation system", *Physica D*, Vol. 256-257. 36-42.
23. Harvey, P. S., & Gavin, H. P. (2014), "Double rolling isolation systems: A mathematical model and experimental validation", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 61. 80-92
24. Haupt, L., & Haupt, S. (2004). *Practical genetic algorithms*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
25. Hill, K. E. (1995). "The Utility of Ring Springs in Seismic Isolation Systems" (Doctoral Thesis). University of Canterbury. Christchurch, New Zealand.
26. IEEE-693 Standard, (2005), *Recommended Practice for Seismic Design for Substations*.

27. Iemura, H., Taghikhany, T., & Jain, S. K. (2007). "Optimum design of resilient sliding isolation system for seismic protection of equipments", *Bull Earthquake Engineering*, Vol. 5. 85-103.
28. Inaudi, J. A., & Kelly, J. M. (1993). "Hybrid Isolation Systems for Equipment Protection". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, 297-313.
29. INN, 2003, NCh2369.Of2003, "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales". Norma Chilena Oficial, instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile
30. Jeon, J., Shafieezadeh, A., Lee, D. H., Choi, E., & Desroches, R. (2015), "Damage assessment of older highway bridges subjected to three-dimensional ground motions: Characterization of shear-axial force interaction on seismic fragilities", *Engineering Structures*, Vol. 87. 45-57.
31. Kar, R., Rainer, J. H., & Lefrançois, A. C. (1996). "Dynamic Properties of a Circuit Breaker with Friction-Based Seismic Damper", *Earthquake Spectra*, Vol. 12, No. 2, 297-314.
32. Kemeny, Z. A. (1997). Ball-in-cone rolling isolation systems, US Patent, 5599106.
33. Khoo, H., Clifton, C., Butterworth, J., McRae, G., Gledhill, S., & Sidwell, G. (2012). "Development of the self-centering Sliding Hinge Joint with friction ring springs". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 78, 201-211.
34. Koliou, M., Filiatrault, A. & Reinhorn, A., 2013. "Seismic Response of High-Voltage Transformer-Bushing Systems Incorporating Flexural Stiffeners II: Experimental Study", *Earthquake Spectra*, Vol. 29, No. 4, 1353-1367.
35. Lu, L., & Lin, G. (2009). "A Theoretical Study on Piezoelectric Smart Isolation System for Seismic Protection of Equipment in Near-fault Areas", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20. 217-232.
36. McGuire, W., Gallagher, R., & Ziemian, R. (2000), *Geometric Nonlinear and Elastic Critical Loads Analysis (242-268)*. In *Matrix Structural Analysis*. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
37. Murota, N., Feng, M. Q., & Liu, G. (2005). "Experimental and Analytical Studies of Base Isolation Systems for Seismic Protection of Power Transformers", Technical Report MCEER-05-0008.
38. Instituto Nacional de Normalización, (2003). *Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales INN-NCh 2369 Of03 (ed.2003)*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
39. Nielson, B. G., & DesRoches, R. (2007). "Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, 823-839.

40. Nocedal, J., & Wright, S. J. (1999). Numerical Optimization. New York: Springer.
41. Oller, S. (2014). Nonlinear Dynamics of Structures. Barcelona: CIMNE.
42. Padgett, J. E., Nielson, B. G., & DesRoches, R. (2008). "Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand of highway bridge portfolios". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 37, 711-725.
43. Petersen, M. D., Harmsen, S. C., Jaiswal, K. S., Rukstales, K. S., Luco, N., Haller, K. M., Mueller, C. S., & Shumway, A. M. (2018). "Seismic Hazard, Risk, and Design for South America", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 108, No 2, 781-800.
44. Ringfeder (2017). Friction Spring Product Catalogue.
45. Sambridge, M., & Drijkoningen, G. (1992). "Genetic algorithms in seismic waveform inversion", Geophysical Journal International, Vol. 109. 323-342.
46. Shepherd, R., & Erasmus, L. (1988). "Ring Springs Dissipators in Seismic Resistant Structures". Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo, Japan.
47. Wahl, A. M. (1963). Mechanical Springs, Cleveland: Penton Publishing Company.
48. Wang, R., Schurr, B., Milkereit, C., Shao, Z., & Jin, M. (2011). "An Improved Automatic Scheme for Empirical Baseline Correction of Digital Strong-Motion Records". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, N° 5, 2029-2044.
49. Wang, S., Hwang, J., Chang, K., Shiau, C., Lin, W., Tsai, M., Hong, J., & Yang, Y. (2014). "Sloped multi-roller isolation devices for seismic protection of equipment and facilities". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 43, 1443-1461.
50. Wongprasert, N., & Symans, M. D. (2004). "Application of a Genetic Algorithm for Optimal Damper Distribution within the Nonlinear Seismic Benchmark Building", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130. 401-406.
51. Zentner, I., Gündel, M., & Bonfils, N. (2017). "Fragility analysis method: Review of existing approaches and application", Nuclear Engineering and Design, Vol. 323. 245-258.