



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS CON AISLACIÓN SISMICA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MENCIÓN INGENIERÍA SÍSMICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

ARY FABRICIO PAREDES ROJAS

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPFF

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARCOS ORCHARD CONCHA
VIVIANA MERUANE NARANJO

SANTIAGO DE CHILE
2019

**RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA SÍSMICA
POR: ARY FABRICIO PAREDES ROJAS
FECHA: 2019
PROFESOR GUÍA: RUBÉN BOROSCHEK K.**

IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS CON AISLACIÓN SÍSMICA

El presente trabajo de título propone establecer un procedimiento de identificación para edificios con aislación sísmica, los que típicamente presentan respuestas no lineales ante excitaciones severas. Para esto, se evalúa el desempeño de una serie de métodos en este tipo de sistemas mediante la realización de un estudio analítico, y posteriormente se valida su aplicación mediante un estudio realizado en base a registros sísmicos de una estructura aislada existente.

Las técnicas de identificación implementadas consisten en algoritmos paramétricos adaptados para capturar el comportamiento no estacionario del sistema y algoritmos no paramétricos cuya identificación se basa en el contenido en frecuencia de la respuesta de la estructura.

El estudio analítico hace uso de registros de aceleración generados a partir de modelos numéricos sometidos a excitación sísmica multidireccional de amplitud variable. Adicionalmente, se consideran representaciones de histéresis bilineal y de Bouc-Wen, frecuentemente utilizadas en el diseño de sistemas de aislación, para definir distintos regímenes de respuesta en los aisladores mediante modelos presentes en softwares de análisis estructural.

El estudio de la estructura aislada existente incluye el uso la base de datos correspondiente a los registros de aceleración traslacional, para eventos sísmicos comprendidos en el período 1993-2014, de uno de los edificios localizados en el conjunto habitacional Comunidad Andalucía, ubicado en el sector centro de Santiago. Con estos registros, se efectúa la estimación de sus propiedades modales y estructurales, buscando validar los resultados obtenidos en forma analítica.

El estudio concluye acerca del alcance que presentan los algoritmos de identificación abordados, haciendo énfasis en la influencia de diversos factores tales como el nivel de excitación, sensibilidad al ruido de la señal, tipo de modelo asumido por los algoritmos y observabilidad del sistema, para la correcta identificación de propiedades dinámicas asociadas al comportamiento no lineal de un edificio sísmicamente aislado.

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas las personas que se hicieron partícipe del largo proceso que significó culminar esta memoria:

Primero, agradecer al profesor guía de este tema Rubén Boroschek, por su ayuda, disposición e interés que mostró estos años por el desarrollo del tema de tesis. Debo admitir que cuando comencé, con un conocimiento probablemente muy por debajo de lo que se requería para sacar adelante de forma expedita el tema, llegué a cuestionarme muchas veces en si acaso podría hacerlo. Pero cada intervención de su parte, significó una oportunidad de crecimiento enorme, y que a día de hoy me ha dejado mucho para el ejercicio profesional y para mi interés en seguir investigando sobre diversos temas relacionados a la profesión, abriéndome las puertas a la participación en conferencias, instancias en las que nunca me imaginé estar presente. Por lo anterior, le estoy enormemente agradecido.

También quiero agradecer al profesor Marcos Orchard y a la profesora Viviana Meruane, por su disposición para atenderme, colaborar con el desarrollo del tema desde sus respectivas áreas y aportarme una visión distinta.

Luego quisiera agradecer a mis amigos de la carrera y trabajo, en especial a: Hernan Santos, Francisco Tapia, Gonzalo Muñoz, Marcos Silva, Jorge Rivas, Emilio Peña y Pastor Villalpando, todos los que se dieron por enterado cuan arduo fue este proceso, y por supuesto a todos los que tuve el agrado de conocer, amigos de plan común, de las otras especialidades, de la pecera, escuela de verano, oficina y todas las amistades que hice camino a la culminación de esta fructífera etapa universitaria, en la cual cada uno aportó de una u otra forma a hacer cada momento mucho mas ameno.

Y finalmente a mi familia, por la espera y el apoyo incondicional en todo este tiempo. A mi madre Sandra, a mi padre Fernando, a mi hermanita Fer, a mi bisabuelo Héctor, a mi abuela Marcia, a mi abuelo Hernán, quienes siempre estuvieron apoyándome y pendientes de cuando llegaría el momento cúlmine, mas allá que no pudieran comprender del todo el alcance de aquello en lo que me encontraba trabajando. A cada una de las personas anteriores les debo todo, mis gratitudes infinitas y mis ganas de seguir adelante. Son las personas en las cuales día a día pensé para no darme por vencido ante todas las circunstancias que se me presentaron en el camino. A ellos y a todo el resto de mi familia, amigos, conocidos, muchas gracias.

Tabla de Contenido

	Pag.
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	xviii
CAPITULO I . INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO	1
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES	5
CAPITULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. INTRODUCCIÓN	9
2.2. ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	10
2.3. MODELOS ANALÍTICOS PARA AISLACIÓN SÍSMICA	47
2.4. ESTRUCTURA AISLADA EN ESTUDIO	56
CAPITULO III.- PRESENTACIÓN DE BASE DE DATOS	69
3.1. INTRODUCCIÓN	70
3.2. REGISTROS SÍSMICOS EN ESTRUCTURA AISLADA	71
3.3. METADATA DE EVENTOS SÍSMICOS	74
3.4. PROCESAMIENTO DE REGISTROS: DESCRIPCIÓN DE BASE DE DATOS MEDIANTE INDICADORES Y PARÁMETROS ESTRUCTURALES	75
3.5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE BASE DE DATOS Y RELACIONES	77

3.6. COMENTARIOS DEL CAPÍTULO	86
CAPITULO IV.- ESTUDIO ANALÍTICO: DESARROLLO DE PROGRAMAS, MODELOS E IDENTIFICACIÓN MEDIANTE REGISTROS SIMULADOS	87
4.1. INTRODUCCIÓN	88
4.2. MODELOS Y GENERACIÓN DE DATOS DE ENTRADA/SALIDA	89
4.2.1. Modelos Numéricos de la estructura	89
4.2.1.1. Modelo Simple de Base Aislada	89
4.2.1.2. Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía	92
4.2.2. Datos Entrada y Salida del Sistema	94
4.3. PROGRAMACIÓN DE ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN	96
4.4. RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN EN MODELOS NUMÉRICOS	96
4.4.1. Propiedades dinámicas de los modelos numéricos	97
4.4.2 PSD	104
4.4.3 MOESP - MV	118
4.4.4 RPEM - λ	132
4.4.5 Filtro de Partículas (PF)	147
4.6. ANÁLISIS COMPLEMENTARIO	169
4.6.1 ANALISIS DE SENSIBILIDAD AL RUIDO DE OBSERVACION	169
4.6.2 INCORPORACIÓN DE MODELO ACOPLADO DE HISTÉRESIS	182
4.6.3 INCORPORACIÓN DE FUNCIONES DE VEROSIMILITUD	188
4.6.4 INFLUENCIA DE COMPORTAMIENTO ROTACIONAL EN IDENTIFICACIÓN	194
4.7. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	197
4.8. COMENTARIOS	200

CAPITULO V.-IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURA AISLADA EXIS- TENTE	202
5.1. INTRODUCCIÓN	203
5.2 EVENTOS SÍSMICOS EN ESTUDIO	204
5.3 RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN ESTRUCTURA AISLADA	206
5.3.1. FFT/MOESP-MW/RPEM- λ	206
5.3.4 Filtro de Partículas (PF)	229
5.4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	250
5.5. COMENTARIOS	252
 CAPITULO VI.- CONCLUSIONES	 253
 BIBLIOGRAFÍA	 260
 ANEXO A: BASE DE DATOS EDIFICIO AISLADO ANDALUCIA	 265
 ANEXO B: PARÁMETROS PROCESADOS DE BASE DE DATOS	 268
 ANEXO C: CÓDIGOS DE PROCEDIMIENTOS DE IDENTIFICACIÓN	 280
 ANEXO D: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN EN ESTUDIO ANALÍ- TICO	 291
 ANEXO E: RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN DE EDIFICIO AISLADO EXISTENTE	 292

Índice de figuras

1.	Determinación de parámetros modales por FFT y PSD	14
2.	Gráfico de Valores Singulares del sistema	17
3.	Determinación de orden del sistema con acumulación de SVD	19
4.	Determinación de diagramas de estabilización para cada ventana de identificación	20
5.	Estimación de parámetros variantes en el tiempo mediante MOESP-MW . .	21
6.	Representación de modelo polinomial para método RPEM	29
7.	Descomposición de función de transferencia de modelo polinomial en RPEM	30
8.	Estimación Bayesiana mediante transformación de $P(X)$ a $P(X Y)$	32
9.	Comparación UKF vs EKF (Ref: http://www.cslu.ogi.edu/nsel/ukf/node6) .	37
10.	Esquemas de distribuciones de probabilidad asumidas por Filtros Bayesianos KF, EKF, UKF y limitaciones para sistema no lineal (Ref: Comparison of Kalman Filter Estimation Approaches for State Space Models with Nonlinear Measurements, Frederik Orderud [28])	38
11.	Representación Discreta de PDF del parámetro	39
12.	Remuestreo en Filtro de Partículas	41
13.	Estimación de distribución multimodal UKF vs PF	42
14.	Variación de PDF de distribución Gamma con L y N	45
15.	Forma de Histéresis de Bouc-Wen	49
16.	Forma de Histéresis de Bouc-Wen según SAP2000 con parámetros dinámicos interpretables	50

17.	Modelo Bilineal por tramos (Ref: Random Processes, Correlation, and Power Spectral Density CEE 541. Structural Dynamics Department of Civil and Environmental Engineering Duke University Henri P. Gavin Fall 2014)	52
18.	Modelo Bilineal por tramos en SAP2000	53
19.	Características de Modelo de Histéresis Biaxial	55
20.	Edificio Aislado Comunidad Andalucía	57
21.	Planta de Cielo Piso Tipo	57
22.	Eje A y B, Vista desde Sur a Norte	58
23.	Eje C, Vista desde Sur a Norte	58
24.	Eje 1, Vista desde Este a Oeste	59
25.	Eje 3, Vista desde Este a Oeste	59
26.	Ubicación de aisladores	60
27.	Amortiguamiento Horizontal de aisladores prototipo	61
28.	Rigideces Horizontales de aisladores prototipo	61
29.	Ubicación de acelerógrafos (Vista en elevacion de eje central (Eje B), Vista desde Sur a Norte)	64
30.	Esquema de edificio aislado y orientación de canales de medición de registros v1	65
31.	Identificación mediante espectros de frecuencias y espectrogramas en edificio aislado Comunidad Andalucía	67
32.	Ejemplo Datos en Registros v1	71
33.	Características de registros sísmicos incluidos en la base de datos	73
34.	Ubicación de Eventos	77
35.	Características de registros sísmicos incluidos en la base de datos	78
36.	Histograma PGA	79
37.	Histograma desplazamiento máximo de aislación	79
38.	Distancia Epicentral vs Intensidad de Arias	80

39.	Magnitud vs Frecuencia Central	80
40.	Calculo de frecuencia central de un registro	81
41.	Magnitud vs Distancia Epicentral vs PGA	82
42.	Magnitud vs Distancia Epicentral vs Desplazamiento máximo de aislación	82
43.	PGA vs Desplazamiento máximo en interfaz de aislación	83
44.	Desplazamiento máximo de aislación vs Frecuencias identificadas de la estructura	84
45.	Aproximación de Fuerza Restitutiva de Aislación	85
46.	Superestructura de Modelo Simple de Base Aislada (MSBA)	89
47.	Modelo Simple de Base Aislada	90
48.	Curvas de Histéresis de Bouc-Wen en Modelo Simple de Base Aislada, ante excitación en dirección X-X, para distintos valores de F_y : a) 30 [Tonf], b) 3 [Tonf] y c) 1 [Tonf]	91
49.	Modelo de Edificio Aislado Comunidad Andalucía	92
50.	Curvas de Histéresis Bilineales ante niveles de excitación sísmica a) Débil b) Medio y c) Fuerte, Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía	93
51.	Excitación en Modelo Simple de Base Aislada	94
52.	Excitaciones en Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía	95
53.	Ubicación de registros de aceleración disponibles en modelos analíticos	95
54.	Formas Modales Modelo MSBA calculadas utilizando rigidez inicial como rigidez equivalente	99
55.	Formas Modales Modelo MSBA calculadas utilizando rigidez post fluencia como rigidez equivalente	100
56.	Formas Modales Modelo MCAEA calculadas utilizando rigidez inicial como rigidez equivalente	101
57.	Formas Modales Modelo MCAEA calculadas utilizando rigidez post fluencia como rigidez equivalente	102
58.	Nodos centrales y laterales en modelos analíticos	103

59.	Espectro PSD para Modelo Simple de Base Aislada con Histéresis Débil (a-b), Medio (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X e Y, Modelo MSBA	105
60.	Identificación de modelo MSBA con excitación traslacional predominante con $\text{máx}(\ddot{u}_{gr})/\text{máx}(\ddot{u}_{gt}) = 0.01$	107
61.	Cálculo de amortiguamiento mediante método de ancho de banda, Modelo MSBA	108
62.	Frecuencias y amortiguamientos identificados por PSD en MSBA dirección X	108
63.	Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) de Modelo Simple de Base Aislada con Histéresis Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X, Modelo MSBA	109
64.	Formas Modales Identificadas con FRF en Modelo Simple de Base Aislada con Respuest: a) Débil y b) Extrema en dirección X, Modelo MSBA	110
65.	Propiedades Modales Identificadas en dirección vertical mediante PSD, Modelo MSBA	111
66.	Espectro PSD para Modelo MCAEA con Histéresis Débil (a-b), Medio (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X	113
67.	Calculo de Amortiguamientos basado en espectro de frecuencia PSD, Modelo MCAEA	114
68.	Resumen de a) frecuencias y b) amortiguamientos identificados con PSD en Modelo MCAEA con Histéresis Débil, Media y Extrema en dirección X . . .	114
69.	Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) de Modelo MCAEA con Histéresis Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X	115
70.	Formas Modales Identificadas con FRF en Modelo MCAEA con Histéresis: a) Débil, b) Media y c) Extrema, Dirección X	116
71.	Propiedades modales identificadas en dirección vertical mediante PSD, Modelo MCAEA	117
72.	Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X, Nodos Centrales	120

73.	Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección Y, Nodos Centrales	121
74.	Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X-Y, Nodos centrales y laterales	122
75.	Variación de desempeño en identificación con ubicación de nodos en MOESPMV	123
76.	Formas Modales Identificadas con MOESP-MV en Modelo Simple de Base Aislada con Respuesta Fuerte, Dirección Y	124
77.	Propiedades modales identificadas mediante MOESP-MW con registros verticales, Modelo MSBA	125
78.	Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MCAEA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X	127
79.	Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MCAEA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección Y	128
80.	Variación de desempeño en identificación mediante MOESPMV con distintos pares de nodos, Modelo MCAEA	129
81.	Formas Modales Identificadas con MOESP-MV en Modelo MCAEA con Histéresis: a)Débil (Lineal), b) Media y c) Extrema, Dirección X	130
82.	Propiedades modales identificadas con registros verticales mediante MOESP-MW, Modelo MCAEA	131
83.	Selección de modelo polinomial y eliminación de propiedades modales espurias obtenidas con RPEM- λ , Nodo 42 X	134
84.	Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con RPEM- λ en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X, Nodo 45	135
85.	Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con RPEM- λ en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección Y, Nodo 13	136
86.	Efecto de ubicación de nodo en estimaciones de Frecuencias y Amortiguamientos mediante RPEM- λ en Modelo MSBA	137
87.	Ajuste de Respuestas Modelo MSBA mediante RPEM	138

88.	Comparación de espectros de frecuencias de respuestas, Modelo MSBA	138
89.	Formas Modales Identificadas con RPEM- λ en Modelo Simple de Base Aislada con Respuesta Fuerte, Dirección X	139
90.	Propiedades Modales identificadas con registros verticales mediante RPEM- λ en Modelo MSBA	140
91.	Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con RPEM- λ en Modelo MCAEA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X, Nodo 77	142
92.	Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con RPEM- λ en Modelo MCAEA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección Y, Nodo 95	143
93.	Ajuste de Respuestas Modelo MCAEA mediante RPEM	144
94.	Comparación de espectros de frecuencias de respuestas, Modelo MCAEA	144
95.	Formas Modales Identificadas con RPEM- λ en Modelo MCAEA con Histéresis : a)Débil (Lineal), b) Media y c) Extrema, Dirección X	145
96.	Propiedades Modales identificadas con registros verticales mediante RPEM- λ en Modelo MCAEA	146
97.	Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA histéresis débil	153
98.	Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA histéresis débil	154
99.	Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA histéresis Media	155
100.	Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA histéresis Media	156
101.	Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA histéresis Fuerte	157
102.	Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA histéresis Fuerte	158
103.	Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MCAEA histéresis débil	160

104. Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MCAEA histéresis débil	161
105. Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MCAEA histéresis Media	162
106. Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MCAEA histéresis Media	163
107. Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MCAEA histéresis Fuerte	164
108. Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MCAEA histéresis Fuerte	165
109. Comparación de respuestas con ruido del 5, 10 y 20 % del máximo de la señal	169
110. Identificación mediante PSD en Modelo MSBA con Histéresis Débil(a-c-e) y Extrema(b-d-f) con nivel de ruido de observación variable	172
111. Funciones de respuesta en Frecuencia en Modelo MSBA con Histéresis Débil(a-c-e) y Extrema(b-d-f) con nivel de ruido de observación variable	173
112. Identificación mediante MOESP-MW en Modelo MSBA con Histéresis Débil con nivel de ruido de observación variable	174
113. Identificación mediante MOESP-MW en Modelo MSBA con Histéresis Extrema con nivel de ruido de observación variable	175
114. Identificación mediante RPEM- λ en Modelo MSBA con Histéresis Débil con nivel de ruido de observación variable	176
115. Identificación mediante RPEM- λ en Modelo MSBA con Histéresis Extrema con nivel de ruido de observación variable	177
116. Verosimilitudes con variación de nivel de ruido de observación, Modelo MSBA	178
117. Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA Caso 3	180
118. Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA Caso 3	181
119. Modelos histeréticos con comportamiento desacoplado y acoplado	182

120. Comparación de aceleración y desplazamiento entre modelos histeréticos acoplado y desacoplado	183
121. Curvas de histéresis en Modelo MSBA acoplado en casos: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X-Y	184
122. Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con PSD, MOESP-MV y RPEM- λ en Modelo MSBA acoplado con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X	185
123. Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA histéresis acoplada	186
124. Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA Histéresis acoplada	187
125. Resultados de Filtro de partículas mediante función de verosimilitud con partículas con peso nulo	188
126. Comparación entre verosimilitudes	189
127. Estimación de Verosimilitud sigmoideal para distintas iteraciones	191
128. Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Función de Verosimilitud sigmoideal	192
129. Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA, Función de Verosimilitud sigmoideal	193
130. FRF para registros de modelo MSBA con rotación basal nula	194
131. Excitaciones típicas en estructuras de base aislada	195
132. Función de Transferencia para casos con y sin rotación	196
133. Propiedades de eventos sísmicos escogidos	205
134. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1994102201 - EO	209
135. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1995011301 - EO	209
136. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1995043001 - EO	210
137. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1995062801 - NS	210
138. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1998102902 - EO	211

139. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1999080301 - NS	211
140. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1999090101 - EO	212
141. Propiedades Modales identificadas en Evento: 2004102601 - EO	212
142. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1996022201 - EO	213
143. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1997032401 - EO	213
144. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1997061901 - NS	214
145. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1998072901 - EO	214
146. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1999040601 - EO	215
147. Propiedades Modales identificadas en Evento: 2000061601 - NS	215
148. Propiedades Modales identificadas en Evento: 2010022701 - NS	216
149. Propiedades Modales identificadas en Evento: 2010031106 - NS	216
150. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1994102201 - V	217
151. Propiedades Modales identificadas en Evento: 2006061701 - V	217
152. Propiedades Modales identificadas en Evento: 1996022201 - V	218
153. Propiedades Modales identificadas en Evento: 2000061601 - V	218
154. Formas Modales Identificadas en Evento: 1994102201	219
155. Formas Modales Identificadas en Evento: 1998072901	220
156. Formas Modales Identificadas en Eventos: 1999090101 (Débil) y 2000061601 (Fuerte)	221
157. Valor Absoluto de Función de transferencia entre registros de aceleración ho- rizontal de losa (L) y cuarto piso (C) para distintos eventos sísmicos	222
158. Valor Absoluto de Función de transferencia entre registros de aceleración ho- rizontal de losa (L) y cuarto piso (C) para distintos eventos sísmicos	223
159. Valor Absoluto de Función de transferencia entre registros de aceleración ver- tical de losa (L) y cuarto piso (C) para distintos eventos sísmicos	224
160. Espectrogramas de respuestas de aceleración relativa horizontal para eventos débiles	225

161. Espectrogramas de respuestas de aceleración relativa horizontal para eventos fuertes	226
162. Espectrogramas de respuestas de aceleración relativa vertical para eventos débiles y fuertes	227
163. Modelo asumido para identificación del edificio aislado Comunidad Andalucía mediante PF	229
164. Elección de tramos para calcular varianza de observación	230
165. Valores de MSE para conjunto de partículas muestreadas en distintos eventos sísmicos para identificación mediante Filtro de Partículas de edificio aislado	232
166. Parámetros y respuestas histeréticas estimadas en Evento 1996022201 utilizando respuesta Completa $t = [0-45]$ [seg]	234
167. Respuestas de aceleración estimadas en el tiempo y en frecuencia para el Evento 1996022201 utilizando respuesta completa $t = [0-45]$ [seg]	235
168. Estimaciones de respuestas de aceleración en el tiempo por fases para Evento 1996022201	236
169. Estimación de espectros de frecuencias por fases en Evento 1996022201 . . .	237
170. Respuestas de desplazamiento estimadas en el tiempo y en frecuencia para el Evento 1996022201 utilizando respuesta completa $t = [0-45]$ [seg]	238
171. Parámetros y respuestas histeréticas estimadas en Evento 1996022201 utilizando respuesta en Fase Débil $t = [0 - 11.6]$ [seg]	239
172. Respuestas de aceleración estimadas en el tiempo y en frecuencia para el Evento 1996022201 utilizando respuesta en Fase Débil $t = [0 - 11.6]$ [seg]	240
173. Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1994102201 . . .	242
174. Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1995011301 . . .	243
175. Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1995043001 . . .	244
176. Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1996022201 . . .	245
177. Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1997032401 . . .	246
178. Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1997061901 . . .	247

179. Curvas de histéresis identificadas para distintas soluciones en evento 1996022201248

Índice de tablas

1.	Rigideces Verticales con $F_v = 35$ ton (K100) y $F_v = 17.5$ ton (K50)	61
2.	Parámetros horizontales de los aisladores (Ref. [30])	62
3.	Parámetros horizontales de los aisladores (Ref. [30])	62
4.	Parámetros horizontales de los aisladores (Ref. [1])	63
5.	Orientación de sensores para toma de registros	64
6.	Frecuencias identificadas con microvibraciones	66
7.	Frecuencias identificadas con evento sísmico 22-02-1996	66
8.	Propiedades Modales de Superestructura de modelo MSBA	89
9.	Propiedades de Modelo Simple de Base Aislada	90
10.	Propiedades de Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía	92
11.	Características Excitación Modelo Simple de Base Aislada	94
12.	Características de Excitación Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía	95
13.	Propiedades Modales MSBA calculadas con a) Rigidez Inicial y b) Rigidez Post-Fluencia	97
14.	Propiedades Estructurales MSBA	98
15.	Propiedades Modales MCAEA calculadas con a) Rigidez Inicial y b) Rigidez Post-Fluencia	98
16.	Propiedades Estructurales MCAEA	98
17.	Nodos centrales y laterales en modelos analíticos MSBA y MCAEA	103
18.	Propiedades Modales Identificadas Modelo MSBA mediante PSD	111

19.	Propiedades Modales Identificadas Modelo MCAEA mediante PSD	116
20.	Parámetros escogidos para identificación con MOESP-MW	118
21.	Propiedades Modales Identificadas Modelo MSBA mediante MOESP-MW . .	125
22.	Propiedades Modales Identificadas Modelo MCAEA mediante MOESP-MW	131
23.	Propiedades Modales Identificadas Modelo MSBA mediante RPEM- λ	139
24.	Propiedades Modales Identificadas Modelo MCAEA mediante RPEM- λ . . .	145
25.	Rangos admisibles de parámetros a identificar	149
26.	Condiciones Iniciales para PF, Modelo MSBA histéresis débil	149
27.	Condiciones Iniciales para PF, Modelo MSBA histéresis media	149
28.	Condiciones Iniciales para PF, Modelo MSBA histéresis fuerte	150
29.	Condiciones Iniciales para PF, Modelo MCAEA histéresis débil	150
30.	Condiciones Iniciales para PF, Modelo MCAEA histéresis media	150
31.	Condiciones Iniciales para PF, Modelo MCAEA histéresis fuerte	150
32.	Cambios de valores de frecuencias con aumento de rigidez inicial en Modelo MSBA	151
33.	Cambios de valores de frecuencias con aumento de rigidez inicial en Modelo MCAEA	151
34.	Parámetros estimados mediante Filtro de Partículas para Modelos MSBA(a-c-e) Y MCAEA(b-d-f)	166
35.	Características de ruido incorporado a la observación $\ddot{u}(t)$	169
36.	Parámetros identificados en modelo MSBA con SNR ~ 1	179
37.	Parámetros identificados mediante verosimilitud sigmoideal	190
38.	Table caption text	204
39.	Table caption text	204
40.	Modos identificados en estructura aislada	208

41. Rangos de búsqueda de parámetros para identificación de edificio aislado mediante PF	230
42. Estimaciones de parámetros de distintos eventos sísmicos utilizando verosimilitud sigmoïdal	248

CAPITULO I
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1. INTRODUCCIÓN

Chile se caracteriza por ser uno de los países con mayor actividad sísmica a nivel mundial, situación que favorece la recolección de una gran cantidad de información asociada al desempeño de estructuras provistas de sistemas de protección sísmica. Estos sistemas están encargados de disipar la energía transmitida por los movimientos telúricos al sistema estructural, mediante el desarrollo de un comportamiento fuertemente no lineal ante excitaciones moderadas o severas.

Un edificio con aislación sísmica es una estructura compuesta por 2 partes principales: la *superestructura*, que generalmente consiste en un edificio convencional de alta rigidez que se encuentra montado sobre la *subestructura*, o *interfaz de aislación*, la cual consiste en un conjunto de elementos de menor rigidez, que reflejan la energía transmitida por el movimiento sísmico mediante el desarrollo de grandes desplazamientos horizontales, incurriendo en un comportamiento histerético. Esta condición desacopla el movimiento de la superestructura con respecto a la excitación basal, produciendo una respuesta predominante del primer modo de vibración y generando desplazamientos entre pisos de la superestructura mucho menores a los que se presentan en un edificio convencional de base fija.

La identificación estructural busca realizar la estimación de parámetros o propiedades que permitan explicar el comportamiento exhibido por el sistema utilizando mediciones de la respuesta obtenida directamente de la estructura. Usualmente los parámetros de interés consisten en propiedades modales (frecuencias, amortiguamientos y formas modales) las que permiten caracterizar la estructura como un sistema lineal. Sin embargo, esto puede extenderse a la estimación de propiedades de cualquier tipo, incluyendo parámetros estructurales específicos tales como la rigidez, Modulo de Young y esfuerzo de fluencia en algunos casos particulares.

En las últimas décadas se han desarrollado técnicas de identificación con miras a dos aplicaciones principales: 1) Monitoreo estructural y 2) Validación de parámetros de un modelo numérico. Estas se han aplicado constantemente en edificios convencionales, los cuales son diseñados para presentar un comportamiento lineal, permitiendo efectuar un seguimiento del estado de deterioro estructural en forma indirecta, utilizando los registros de respuesta correspondiente a la fase previa y posterior a un evento sísmico de gran intensidad. En estos casos, se han observado disminuciones notorias en el valor de las frecuencias predominantes de

vibración, frente a la ocurrencia de daños considerables (o equivalentemente una pérdida de rigidez en la estructura [2][24]). También la aplicación de estas técnicas ha permitido calibrar modelos lineales equivalentes con propiedades modales constantes en el tiempo, generando estimaciones razonables de la respuesta sísmica observada [26].

Sin embargo, la aplicación de estos métodos en edificios con aislación sísmica no resulta directa, ya que el carácter no estacionario de la respuesta en este tipo de estructuras, ante grandes desplazamientos en la interfaz de aislación, limita el supuesto de un sistema lineal con propiedades invariantes durante la ocurrencia de la excitación.

Uno de los enfoques adoptados para abordar este tipo de sistemas, consiste en procedimientos de identificación basados en propiedades modales variantes en el tiempo.

Este es el caso, en métodos de estimación de subespacio como MOESP [36] aplicado en ventanas de tiempo sucesivas, en las que se “linealiza” la respuesta del sistema en cada ventana de identificación. En el estudio desarrollado por Yoshimoto [40], la estimación de las propiedades modales de una estructura aislada se realiza mediante la elección de un orden del sistema basado en un umbral para el porcentaje acumulado de valores singulares (SVD), metodología que generalmente resulta sensible al nivel de ruido característico de señales presentes en sistemas estructurales, conduciendo a la aparición de valores espurios para las frecuencias y grandes variaciones para el amortiguamiento identificado, requiriendo de un alto grado de conocimiento previo de los valores a identificar en la estructura.

El presente trabajo considera un procedimiento de identificación por ventanas haciendo uso del algoritmo propuesto por Bakir [4], donde las propiedades modales se obtienen mediante *diagramas de estabilización*, lo que permite independizar la estimación de las mismas respecto a la elección del orden del sistema y diferenciar las propiedades físicas de las numéricas.

Siguiendo esta misma línea, el uso de métodos recursivos de error de predicción (RPEM), incorporando un factor de olvido λ , en el estudio llevado a cabo por Safak [33], conduce a la estimación de parámetros modales a partir de coeficientes variantes en el tiempo, asociados un modelo polinomial del sistema (LTV).

El gran número de grados de libertad que otorgan los órdenes de los polinomios capaces de ajustar las observaciones, hace necesario recurrir a criterios de selección estándar tales como AIC (*Akaike Information Criterion*), FPE (*Final Prediction Error*) y BIC (*Bayesian Information Criterion*), los que priorizan la simplicidad y el ajuste del modelo representativo. Sin embargo estos no permiten evaluar que tan apropiado es el modelo escogido con respecto a otro candidato con un valor similar del indicador.

Para esto, el presente estudio incorpora los conceptos abordados por Wagenmakers y Farrell [37], permitiendo establecer una significancia estadística en la elección del modelo, mediante la transformación de dichos indicadores a pesos, los cuales son interpretables en forma probabilística.

Por otra parte, los algoritmos de estimación basados en un modelo, abordados desde un enfoque Bayesiano [7] tales como el Filtro de Kalman (KF), Filtro de Kalman Extendido EKF, Filtro de Kalman Unscented UKF y los métodos basados en simulación de Monte Carlo (SMC) como el Filtro de Partículas (PF), han presentado un número limitado de aplicaciones en sistemas estructurales de este tipo. Estos permiten identificar parámetros específicos que definen el modelo asumido para representar la estructura de interés.

En los estudios llevados a cabo por Chatzi [8] y Xie [39], se realizaron estimaciones efectivas de los parámetros estructurales caracterizando modelos numéricos no lineales simplificados sometidos a excitación unidireccional. Sin embargo, la representación en forma de espacio estado del sistema limita dicho planteamiento para casos prácticos, en los que un modelo de mayor complejidad puede ser requerido (ya sea por un aumento en el número de grados de libertad, presencia de características geométricas particulares o por el uso de un modelo complejo cuyas ecuaciones de observación no sean conocidas, disponiendo solo de una representación de "Caja Negra").

Para lidiar con este problema, el presente estudio utiliza un procedimiento basado en el algoritmo de Filtro de Partículas, incorporando un ruido de proceso para la búsqueda aleatoria de los parámetros a identificar, enfoque conocido como *Evolución Artificial de Parámetros* [20].

La principal diferencia en los enfoques presentados consiste en la forma en que se incorporan las no linealidades al procedimiento de identificación. Las primeras tres técnicas (FFT/PSD, MOESP y RPEM) asumen una representación lineal del sistema, caracterizando su comportamiento no estacionario en forma de propiedades modales (variantes en el tiempo para los últimos dos casos). Por otra parte, el algoritmo Filtro de Partículas, requiere "proponer" un modelo que sea capaz de representar el fenómeno que le proporciona la no linealidad al sistema, siendo relevante el conocimiento a priori del sistema en estudio para efectuar la estimación de propiedades particulares que caractericen el sistema estructural mediante el modelo asumido.

Los anteriores corresponden a algunos métodos empleados en aplicaciones a sistemas estructurales con comportamiento no lineal de distinto origen (daños progresivos, uso de elementos de protección sísmica, etc). Estos abarcan estructuras como puentes [9], hospitales [27] y edificios [34][22], entre otros. Un estudio mas detallado, referente al desarrollo de una

gama de técnicas de identificación típicamente encontradas en la literatura, se presenta en [19].

Considerando los antecedentes expuestos, el presente trabajo propone establecer un procedimiento de identificación para edificios con aislación sísmica, mediante la realización de un estudio analítico que permita evaluar el desempeño de un grupo de métodos de identificación, aplicados en modelos numéricos representativos de estructuras de base aislada. Posteriormente, se lleva a cabo un segundo estudio, utilizando los registros sísmicos obtenidos en un edificio aislado existente, perteneciente a un conjunto habitacional ubicado en el sector centro de Santiago de Chile, con el objetivo de validar los resultados obtenidos de forma analítica. Con esto, se busca estudiar el desempeño que presentan los métodos considerados en la estimación de propiedades dinámicas, bajo distintos niveles de no linealidad en la respuesta para este tipo de sistema estructural.

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo del presente trabajo de tesis consiste en establecer un procedimiento para la identificación de sistemas con aislación sísmica. Para esto, se realiza un estudio analítico y otro estudio en base a registros de aceleración de una estructura aislada existente. Los objetivos secundarios para llevar a cabo la obtención de resultados consisten en los siguientes:

- Construir una base de datos con la metadata y parámetros procesados a partir de los registros sísmicos de un edificio aislado existente, que permita ordenar y utilizar de forma eficiente la información de un set de registros sísmicos requeridos por el usuario.
- Construir modelos analíticos que permitan estudiar el comportamiento típico que exhiben edificios con aislación sísmica y generar respuestas ante excitación basal, considerando distintos modelos histeréticos para la representación del comportamiento no lineal de la estructura.
- Programar algoritmos de identificación, con los registros de respuesta del sistema e hiperparámetros iniciales como entrada, y las propiedades dinámicas del sistema como salida.

El contenido que abarca cada capítulo se describe en los siguientes puntos.

CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Descripción de los objetivos del estudio y alcance de cada capítulo.

CAPITULO II.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTUDIO

Descripción de las técnicas de identificación, modelos de histéresis y características del edificio aislado considerado en el estudio.

CAPITULO III.- PRESENTACIÓN DE BASE DE DATOS

Presentación de base de datos, correspondiente a los registros de aceleración traslacional de la estructura aislada, localizada en el conjunto habitacional Comunidad Andalucía. Se muestran relaciones entre parámetros procesados a partir de los registros, con el objetivo de caracterizar y clasificar los eventos sísmicos para su uso en la aplicación de los procedimientos de identificación en estudio.

CAPITULO IV.- ESTUDIO ANALÍTICO: DESARROLLO DE PROGRAMAS, MODELOS E IDENTIFICACIÓN MEDIANTE REGISTROS SIMULADOS

Presentación de modelos, códigos y resultados correspondientes a la aplicación de los procedimientos de identificación, utilizando registros de respuestas de aceleración generadas a partir de modelos numéricos sometidos a excitación sísmica multidireccional. Se evalúa el alcance de los algoritmos en la identificación de propiedades dinámicas para sistemas exhibiendo distintos niveles de no linealidad en su respuesta.

CAPITULO V.- ESTUDIO EN ESTRUCTURA AISLADA: IDENTIFICACIÓN UTILIZANDO REGISTROS MEDIDOS

Presentación de resultados correspondientes a la aplicación de los procedimientos de identificación, utilizando los registros de aceleración de una estructura aislada existente para eventos sísmicos comprendidos en el período 1993-2014. Este capítulo tiene por objetivo validar los resultados obtenidos en forma analítica.

CAPITULO VI.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Conclusiones de los resultados obtenidos, enfocados en la influencia que presentan factores tales como el nivel no linealidad en la respuesta, tipos de modelos asumidos, características particulares de los algoritmos utilizados y de las observaciones del sistema, en el desempeño de la identificación de propiedades dinámicas en un edificio con aislación sísmica.

CAPITULO II
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAPITULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene como propósito, revisar los antecedentes en los que se apoya el desarrollo del estudio. Los tópicos abordados incluyen:

- **Algoritmos de Identificación de Sistemas**

Se presenta el marco teórico de los procedimientos de identificación a utilizar.

- **Modelos Analíticos para Aislación Sísmica**

Se muestran las relaciones y parámetros que caracterizan los modelos de histéresis (Bilineal y Bouc-Wen), para modelar el comportamiento no lineal que los aisladores sísmicos le proporcionan a la estructura.

- **Estructura Aislada en Estudio**

Se presentan las características del edificio aislado ubicado en el conjunto habitacional Comunidad Andalucía, cuyos registros sísmicos son utilizados para validar el estudio analítico de los procedimientos de identificación.

2.2. ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

En esta sección, se presenta el marco teórico correspondiente a los métodos de identificación a utilizar. Estos permiten estimar las propiedades dinámicas de los sistemas estructurales en estudio, a partir de las respuestas de aceleración y la excitación sísmica respectiva que genera dicha respuesta. Los algoritmos de identificación considerados son los siguientes:

Técnicas de Identificación No Paramétrica

Notación

- Transformada de Fourier

FFT

- Espectro de Densidad de Potencia

PSD

Técnicas de Identificación Paramétrica

Notación

- Estimación de Error de Salida de Espacio Estado Multivariable por ventanas

MOESP - MV

- Estimación Recursiva de Error de Predicción con Factor de Olvido λ

RPEM- λ

- Filtro de Partículas con Evolución Artificial de Parámetros

PF

Las técnicas FFT/PSD, MOESP-MV y RPEM - λ permiten estimar **propiedades modales**, es decir: frecuencias, amortiguamientos y formas modales de la estructura, las cuales son características propias de un sistema lineal. Por otro lado, PF estima **propiedades estructurales** definidas por el usuario, correspondientes a la representación del sistema basada en un modelo, el cual puede relacionar de forma no lineal sus estados internos con las respuestas del sistema. Las siguientes secciones abordan los aspectos teóricos de cada método, colocando énfasis en las expresiones para la obtención de las propiedades dinámicas a estimar, el cual constituye uno de los objetivos principales del estudio.

2.2.1.- Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform FFT*)

- **Descripción General**

La transformada rápida de Fourier [11] es un algoritmo que permite calcular de manera eficiente la Transformada Discreta de Fourier (DFT), reduciendo el número de operaciones necesarias para ejecutar el método desde $O(n^2)$ a $O(n \log(n))$, siendo n la cantidad de datos. Dado un conjunto de muestras de una señal $X_t = X_t[0], X_t[2] \dots X_t[N_F - 1]$, la expresión

$$X_f[k] = \sum_{n=0}^{N_F-1} X_t[n] e^{-j2\pi(kn/N_F)}$$

descompone una señal discreta en el dominio del tiempo X_t , y las transforma a un conjunto de valores en el espacio de las frecuencias X_f . En la ecuación anterior, n corresponde al número de muestras de X_t , mientras que $w_k = 2\pi k/N_F$ corresponde a cada una de las N_F frecuencias equiespaciadas de la Transformada de Fourier, con $X_f(k)$ la amplitud del espectro para la k -ésima frecuencia.

- **Cálculo de Propiedades Modales del sistema**

El espectro de Fourier de una señal permite observar la presencia de frecuencias f_i de mayor energía (y por lo tanto de mayor amplitud), las que corresponden a los modos de vibración del sistema (Figura 1a).

Por otra parte, la razón de amortiguamiento β_i asociada al i -ésimo modo, se obtiene utilizando el método de ancho de banda (Figura 1b), donde a partir de las frecuencias f_{1i} y f_{2i} , asociadas a la mitad de la amplitud del peak en el espectro evaluado en f_i , este queda determinado por la expresión

$$\beta_i = \frac{f_{2i} - f_{1i}}{f_{2i} + f_{1i}} \quad \beta_i < \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Finalmente, las formas modales se calculan basado en los espectros de frecuencia (FFT) de las señales de excitación $U(\omega)$ y de la respuesta $Y(\omega)$, en la ubicación específica del sistema en donde se desea conocer la amplitud de la forma modal respectiva (Figura 1c). Calculando la función de transferencia del sistema $H(\omega)$ (o función de respuesta en frecuencia FRF), como el cociente de estas dos cantidades,

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{U(\omega)}$$

las amplitud de la i -ésima forma modal $\{\phi\}_i$ para el nodo j -ésimo del sistema, corresponde al valor de la parte imaginaria del espectro FRF, para el par excitación-respuesta $\{u(t), y_j(t)\}$, evaluado en la frecuencia predominante f_i , las cuales también son identificables generalmente como peaks en la función de transferencia.

En general este método no es robusto en sistemas no lineales, y su aplicación en el presente estudio se lleva a cabo para observar los resultados a los que conduce en sistemas aislados.

2.2.2.- Espectro de Densidad de Potencia (*Power Spectral Density PSD*)

- **Descripción General**

El espectro de Densidad de Potencia [6] consiste en una representación que permite caracterizar la distribución de energía de un proceso estacionario $a(t)$, mediante un espectro de frecuencias ω_i con amplitud $S_{aa}(\omega_i)$, acorde a la expresión

$$S_{aa}(\omega) = |FFT(a(t))|^2 = |A(\omega)|^2$$

denominada frecuentemente como periodograma. Técnicas no paramétricas como el Método de Welch y el Método de Bartlett [29], permiten estimar el espectro PSD, promediando su aplicación en segmentos traslapados de la señal para reducir su varianza.

- **Cálculo de Propiedades Modales del sistema**

Análogamente a lo expuesto para el método FFT en la sección 2.2.1, las frecuencias predominantes f_i asociadas a los modos de vibración del sistema, corresponden a aquellas en donde se presentan los peaks del espectro PSD. Mientras que las formas modales $\{\phi\}_i$ se obtienen a partir de las función de respuesta en frecuencia $H(\omega)$, estimada a partir de las señales de excitación y respuesta, para una ubicación específica en el sistema. Este método considera las amplitudes de la forma modal en el punto de respuesta, proporcional a la amplitud de la parte imaginaria de la FRF, por lo que se requiere normalizar dichos valores para obtener la forma modal correspondiente.

Por otra parte, el cálculo del amortiguamiento modal β_i , también hace uso del método de ancho de banda, donde definiendo las frecuencias f_{1i} y f_{2i} como los valores asociados a una amplitud igual a la mitad de la correspondiente a la frecuencia predominante f_i , este se obtiene a partir de las expresiones

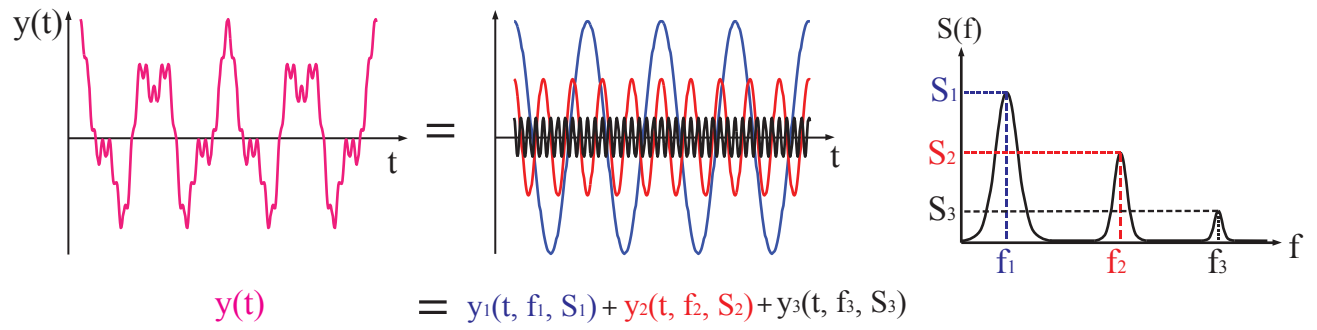
$$A_i = \frac{f_{2i}^2 - f_{1i}^2}{f_{2i}^2 + f_{1i}^2} \quad \text{y} \quad \beta_i = 0.5A_i(1 - 0.375A_i^2)$$

- **Comentarios**

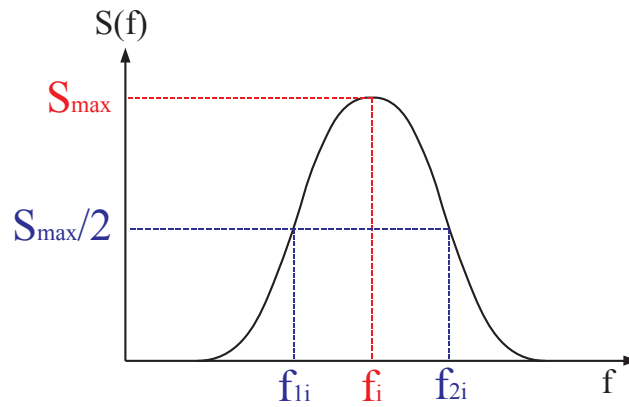
El método PSD permite identificar de forma efectiva las frecuencias predominantes del sistema en el caso en que estas se encuentren debidamente desacopladas, amplificando el valor asociado a dichas frecuencias y atenuando aquellas de menor energía.

La aplicación de los procedimientos no paramétricos FFT y PSD, ha demostrado no ser efectivo en la estimación del amortiguamiento, incluso en sistemas exhibiendo un comportamiento predominantemente lineal ante excitaciones sísmicas. Por lo tanto, la inclusión de dichas técnicas en este estudio busca otorgar valores de referencia principalmente para las frecuencias predominantes en el sistema, mientras que se evaluará el alcance que presenta la identificación de formas modales mediante FRF, metodología que a priori asume un sistema lineal con frecuencias predominantes bien definidas.

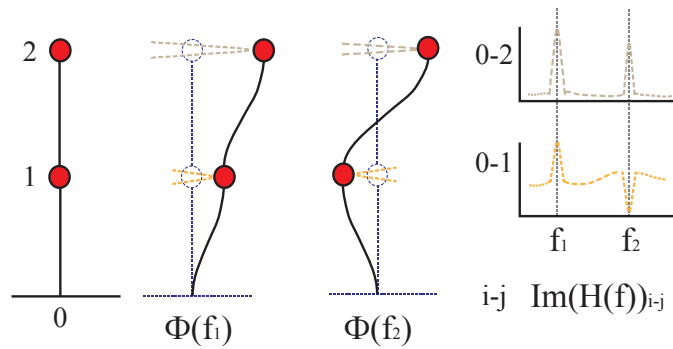
En la Figura 1 se muestran las etapas generales para la obtención de propiedades modales del sistema, utilizando los procedimientos no paramétricos FFT, PSD y FRF.



(a) Identificación de frecuencias del sistema



(b) Determinación de amortiguamiento modal



(c) Determinación de formas modales a partir de FRF

Figura 1: Determinación de parámetros modales por FFT y PSD

2.2.3.- Método de Error de Salida en Espacio Estado Multivariable (*Multivariate Output Error State Space Method MOESP*)

- Descripción General

El método de identificación de subespacio MOESP [36] consiste en un procedimiento que permite calcular las propiedades modales del sistema, definiendo un modelo de espacio estado lineal de la forma,

$$x_{k+1} = \mathbf{A} x_k + \mathbf{B} u_k \quad \text{Ecuación de estado}$$

$$y_k = \mathbf{C} x_k + \mathbf{D} u_k \quad \text{Ecuación de observación}$$

con $x_k \in R^n$: vector de estado del sistema

$y_k \in R^l$: vector de observación del sistema

del cual se conocen las señales de entrada $\{u_k\}_{k=1\dots N}$ y de salida $\{y_k\}_{k=1\dots N}$. El método originalmente busca estimar las matrices \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} y \mathbf{D} , mediante las operaciones de Factorización L-Q y Descomposición de Valores Singulares SVD.

Planteando el modelo de espacio estado, mediante el uso de matrices Hankel para los datos de entrada y salida, se obtiene

$$\begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_j \\ y_2 & y_3 & \dots & y_{j+1} \\ \vdots & & \ddots & \\ y_i & y_{i+1} & \dots & y_{i+j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_j \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} D & & & & \\ CB & D & & & 0 \\ CAB & CB & \ddots & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ CA^{i-2}B & CA^{i-3}B & \dots & CB & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_j \\ u_2 & u_3 & \dots & u_{j+1} \\ \vdots & & \ddots & \\ u_i & u_{i+1} & \dots & u_{i+j-1} \end{bmatrix}$$

o de forma equivalente,

$$Y_{ij} = O_i X_j + T_i U_{ij}$$

con O_i : Matriz de Observabilidad Extendida del Sistema

T_i : Matriz de Toeplitz

$U_i \in R^{i \cdot m \times j}, Y_i \in R^{i \cdot l \times j}$: Matrices Hankel de bloques

Aplicando una Factorización L-Q a la matriz Hankel correspondiente a los datos entrada-salida del sistema $H = [U_{ij} \ Y_{ij}]^T$, esta queda expresada como

$$H = \begin{bmatrix} U_{ij} \\ Y_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ij} = L_{11} Q_1^T \\ Y_{ij} = L_{21} Q_1^T + L_{22} Q_2^T \end{bmatrix}$$

con Q_1^T y Q_2^T matrices ortonormales (i.e $Q_i^T Q_i = I$ y $Q_i^T Q_j = 0$). Por lo tanto, se cuenta con 2 ecuaciones equivalentes a la matriz Hankel de los datos observados Y_{ij} , dadas por

$$Y_{ij} = O_i X_j + T_i L_{11} Q_1^T = L_{21} Q_1^T + L_{22} Q_2^T$$

En la igualdad anterior, el término $L_{21} Q_1^T$ representa la influencia del vector de excitación (o entrada \mathbf{u}) sobre la respuesta, el cual se procede a eliminar ya que este método busca trabajar con la respuesta libre del efecto de la entrada al sistema. Por lo tanto, haciendo uso de la propiedad de ortogonalidad de matrices Q_i , se obtiene

$$\begin{aligned} Y_{ij} &= O_i X_j + T_i L_{11} Q_1^T = L_{21} Q_1^T + L_{22} Q_2^T \quad / \cdot Q_2 \\ &\Rightarrow Y_{ij} Q_2 = O_i X_j Q_2 = L_{22} \end{aligned}$$

Teniendo la respuesta libre del sistema L_{22} , se realiza una Descomposición de Valores Singulares SVD de la forma

$$L_{22} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^T \\ N_2^T \end{bmatrix} \approx M_1 \Sigma_1 N_1^T$$

$$\Sigma_1 = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_n \end{bmatrix} \quad \Sigma_2 = \begin{bmatrix} \sigma_{n+1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_{i.l} \end{bmatrix}$$

con M y N matrices ortonormales y Σ una matriz diagonal que contiene los valores singulares en orden descendente. Un parámetro importante consiste en el orden del sistema n , el cual se determina basado en la caída significativa que presenten los valores singulares, como se observa en la Figura 2. Este parámetro se escoge considerando un umbral $\alpha(\hat{n})$, que acumule un porcentaje de los valores singulares obtenidos (generalmente entre 80-90 %, dependiendo del contenido de ruido en la señal), cuya expresión esta dada por,

$$\alpha(\hat{n}) = \left(\frac{\sum_1^{\hat{n}} \sigma_i}{\sum_1^N \sigma_i} \right) \times 100$$

en donde \hat{n} representa el orden del sistema seleccionado bajo este criterio. Esta condición busca diferenciar entre el subespacio de la señal que aporta información del sistema y el subespacio asociado al ruido (ya sea de origen numérico o de medición).

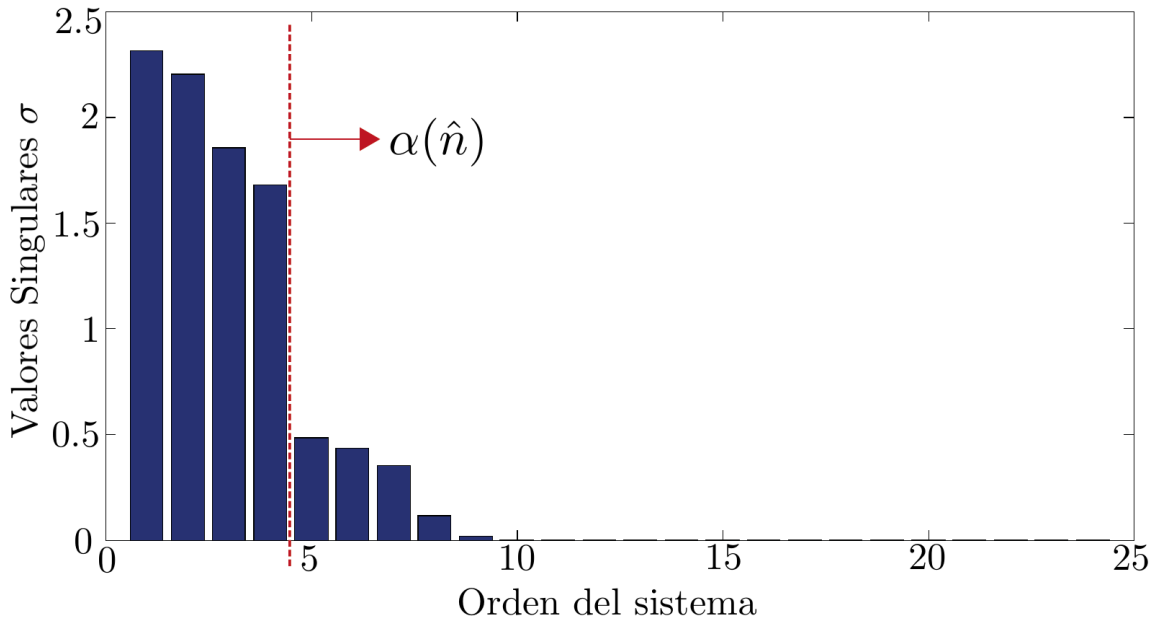


Figura 2: Gráfico de Valores Singulares del sistema

Una vez seleccionado el orden n , la matriz de observabilidad puede ser aproximada, y por consiguiente las matrices A y C del espacio estado, mediante las expresiones

$$O_i = M_1 \Sigma_1^{1/2} \quad A = O_{i-1}^+ \cdot O_{i-1}^\dagger$$

siendo C el bloque superior de la matriz O_i . En este caso O_{i-1} corresponde a la matriz de observabilidad descartando su ultimo bloque fila, $(\bullet)^+$ define la pseudo-inversa de una matriz y O_{i-1}^\dagger la matriz de observabilidad desplazada de forma ascendente en una fila.

• Cálculo de Propiedades Modales del sistema

Las propiedades modales quedan determinadas por las expresiones

$$\lambda_i = \frac{|\ln p_{A_i}|}{\Delta t} \quad \beta_i = -\frac{\text{Re}(\ln(p_{A_i}))}{|\ln(p_{A_i})|} \quad \phi_i = C \cdot \phi_{A_i}$$

siendo p_{A_i} y ϕ_{A_i} los valores y vectores propios de la matriz A, mientras que λ_i , β_i y ϕ_i representan las frecuencias, amortiguamientos y formas modales del sistema respectivamente. Para incorporar el comportamiento no estacionario que presenta un sistema no lineal, se ha extendido el método MOESP aplicándolo en ventanas de tiempo sucesivas [40], actualizando la matriz Hankel de la forma

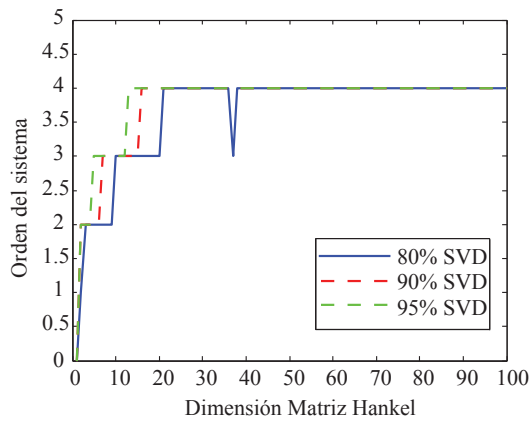
$$Y_0 = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 \\ y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 \\ y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 \end{bmatrix} \Rightarrow Y_1 = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 \\ y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 \\ y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 \\ y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 \end{bmatrix}$$

• Comentarios

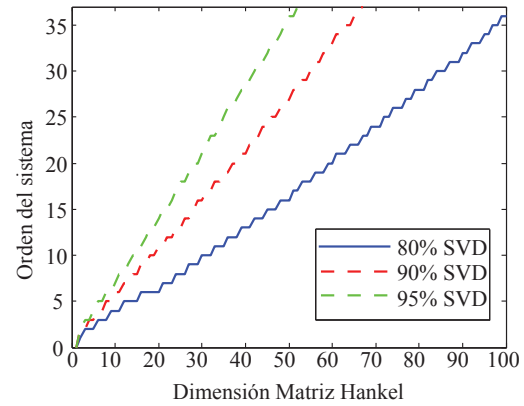
La selección del orden del sistema n en el algoritmo MOESP, se encuentra fuertemente sujeta al nivel de ruido de observación y no linealidad que exhibe el sistema en el segmento de registro utilizado. Por lo tanto, la elección del modelo basado en el umbral de valores singulares acumulados $\alpha(\hat{n})$, resulta altamente dependiente del criterio del usuario en presencia de estas condiciones, las que se dan frecuentemente para mediciones presentes en sistemas estructurales típicos. Esto puede observarse en la Figura 3, la que muestra la elección del orden del

sistema para valores de α igual al 80, 90 y 95 %, ante distintas condiciones de no linealidad y ruido en la señal, para las cuales se observa la aparición de muchos ordenes posibles para representar el sistema (escalones) a partir de un grupo de valores para las dimensiones de la matriz Hankel $[H]$, no resultando evidente el orden que define el sistema en estudio.

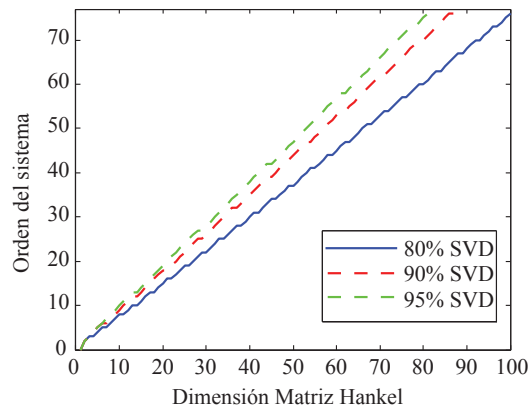
Si bien el enfoque por segmentos traslapados busca “linealizar” el comportamiento del sistema en cada segmento, la elección del orden del sistema puede resultar muy variable bajo el criterio SVD. Por lo tanto, el presente estudio busca evaluar la incorporación de diagramas de estabilización (basado en el algoritmo propuesto por Bakir [4] e implementado por Pastor Villalpando) en cada ventana de registro en la que se realiza la identificación, algoritmo que se describe en la siguiente sección.



(a) Orden Sistema Lineal respuesta sin ruido



(b) Orden Sistema No Lineal



(c) Orden Sistema Lineal respuesta + ruido (SNR < 2)

Figura 3: Determinación de orden del sistema con acumulación de SVD

- **Incorporación de Diagramas de Estabilización**

En el proceso de identificación mediante MOESP, una selección incorrecta del orden del sistema en estudio, así como también un nivel considerable de ruido presente en la señal, pueden llevar a la aparición de valores espurios, que no corresponden a propiedades modales reales o físicas del sistema a identificar. Para esto, el estudio desarrollado por Bakir [4] incorpora el uso de diagramas de estabilización (Figura 4a), los que se construyen calculando los polos del sistema para un rango de ordenes predefinidos. En estos diagramas, los polos físicos poseen la característica de mantenerse para distintos valores de órdenes del sistema, metodología con la que pueden diferenciarse de los polos numéricos o espurios.

El procedimiento consiste en la representación del diagrama de estabilización en forma de un histograma, compuesto de bins traslapados con un ancho w_b definido como un porcentaje de la frecuencia máxima de interés. El método incluye la definición de límites porcentuales de estabilidad entre polos de distintos órdenes para sus valores de frecuencias, amortiguamientos y MAC (Modal Assurance Criterion). También se considera el MPC (Modal Phase Collinearity), el cual cuantifica la consistencia espacial entre los parámetros identificados y permite diferenciar entre modos locales y globales. Los parámetros anteriores permiten llevar a cabo la selección de los polos identificados a partir de la señal observada como se muestra en la Figura 4b.

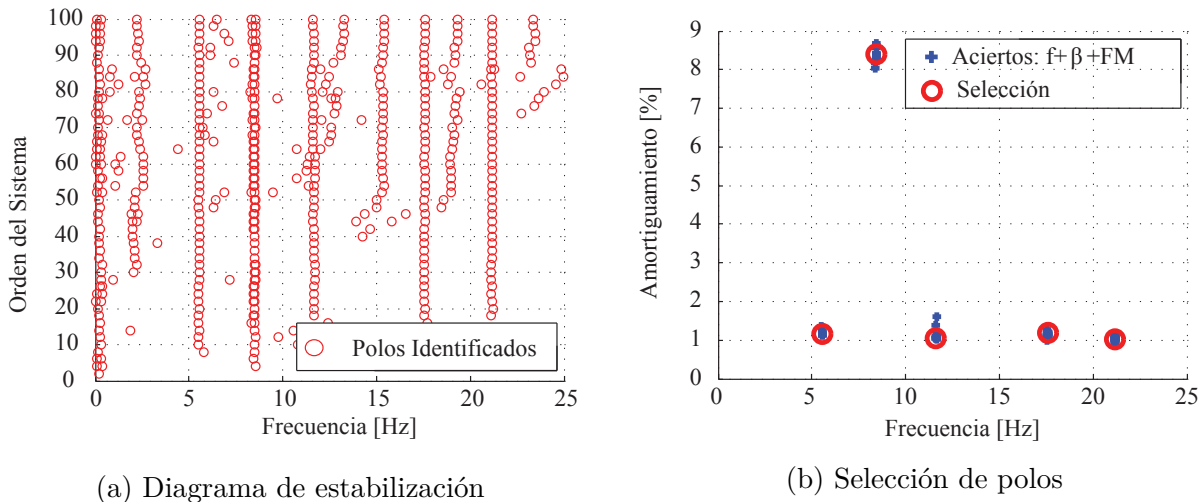


Figura 4: Determinación de diagramas de estabilización para cada ventana de identificación

El procedimiento de identificación abordado, se basa en la aplicación de la metodología descrita para cada ventana de identificación en la cual se divide la señal, las cuales asumen un traslapo del 90 % de su longitud. La duración del intervalo de identificación T_w se asume constante y se sugiere una duración del orden de por lo menos 2 veces el período fundamental

estimado a priori de la estructura en estudio (Figura 5).

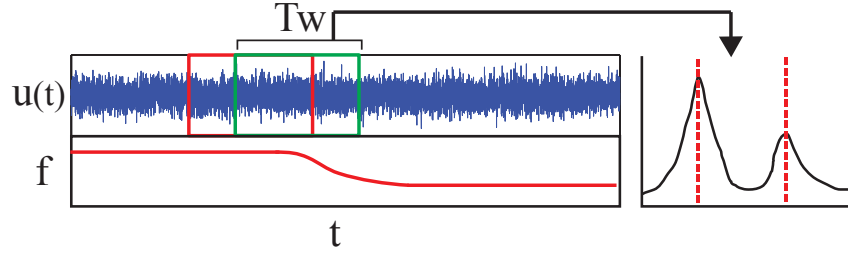


Figura 5: Estimación de parámetros variantes en el tiempo mediante MOESP-MW

Los límites porcentuales para la identificación de polos estables entre los ordenes n y $n+1$ del sistema se definen por las siguientes expresiones

$$\frac{f^n - f^{n+1}}{f^n} < \lim_f \% \quad \frac{\xi^n - \xi^{n+1}}{\xi^n} < \lim_\xi \% \quad (1 - MAC(n, n+1)) < \lim_{MAC} \%$$

$$\text{con} \quad MAC(n, n+1) = \frac{|\phi^{(n)H} \phi^{(n+1)}|^2}{(\phi^{(n)H} \phi^{(n)}) (\phi^{(n+1)H} \phi^{(n+1)})}$$

Calculadas las propiedades de cada orden, se observa la estabilidad de los polos obtenidos, los cuales pueden ser: a) estables en frecuencia, b) estables en frecuencia y amortiguamiento y c) estables en todas las propiedades modales. Basado en estos últimos tipos de polos y los límites admisibles para la identificación de parámetros físicos del sistema, se filtran los polos para generar diagramas de estabilización en forma de histogramas, a partir de anchos de bins traslapados w_b definidos como un porcentaje de f_{max} . Por otra parte, la expresión del MPC (Modal Phase Colinearity) para el i -ésimo modo dada por,

$$MPC_i = \left[2 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} - 0.5 \right) \right]^2 \times 100 \%$$

cuantifica la consistencia espacial de los parámetros identificados, a partir de los valores propios λ_1, λ_2 de la matriz de covarianza calculada a partir de las formas modales estimadas Φ , permitiendo descartar polos que no alcancen el umbral para un valor definido de MPC. Una descripción mas detallada, incluyendo procedimientos utilizados para descartar la ocurrencia de polos dobles en un bin o la repetición de polos en bins sucesivos se presenta en [4].

2.2.4.- Método Recursivo de Error de Predicción (*Recursive Prediction Error Method RPEM*)

- Descripción General

Los algoritmos recursivos de error de predicción (RPEM) son una serie de métodos de estimación de parámetros, que toman en cuenta las diferencias entre el valor real de las observaciones del sistema y el valor predicho a partir de un modelo. La estimación del parámetro buscado se lleva a cabo mediante la expresión

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)(y(t) - \hat{y}(t))$$

donde $\hat{\theta}(t)$: Estimación del parámetro θ en el tiempo t

$y(t)$: Observación de salida en el tiempo t

$\hat{y}(t)$: Predicción de $y(t)$ basada en las observaciones hasta $t-1$

$K(t)$: Ganancia, parámetro que determina cuanto influye el error de predicción $y(t) - \hat{y}(t)$ en la estimación del parámetro $\hat{\theta}(t)$

En la ecuación anterior, la ganancia se define como $K(t) = Q(t) \psi(t)$, donde los términos $Q(t)$ y $\psi(t)$ dependerán del modelo y del tipo de algoritmo considerado (Factor de Olvido, Filtro de Kalman o Gradiente normalizado) [21]. El presente trabajo utiliza el método RPEM con Factor de Olvido λ , para incorporar el comportamiento no estacionario de los parámetros asociados al sistema no lineal en estudio. El algoritmo se resume en las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + K(t)(y(t) - \hat{y}(t)) & Q(t) &= P(t-1) / [\lambda + \psi^T(t)P(t-1)\psi(t)] \\ \hat{y}(t) &= \psi^T(t) \hat{\theta}(t-1) & P(t) &= \frac{1}{\lambda} \left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\psi(t)\psi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \psi^T(t)P(t-1)\psi(t)} \right) \\ K(t) &= Q(t) \psi(t) \end{aligned}$$

donde $P(t)$ es la matriz de covarianza del vector de parámetros θ .

El efecto del factor de olvido λ consiste en que las mediciones anteriores pierden "importancia" de manera exponencial en la estimación actual del parámetro. Este factor toma valores de $\lambda < 1$ (generalmente entre 0.9 - 0.99, dependiendo de la frecuencia de muestreo F_s de los datos), para la identificación de modelos con coeficientes variantes en el tiempo (LTV).

Mientras que con un valor $\lambda = 1$, el algoritmo resulta equivalente a uno de estimación off-line de un modelo con coeficientes constantes (LTI).

El método RPEM se encuentra planteado para trabajar con sistemas representados por modelos polinomiales, los que condicionan la forma de $\psi(t)$ y el valor de predicción $\hat{y}(t)$. Una breve descripción acerca de estos modelos es presentada a continuación.

- **Modelos Polinomiales**

Los modelos polinomiales son representaciones que relacionan las señales de entrada, salida y perturbaciones en un sistema, mediante polinomios que componen las funciones de transferencia entre estas variables. Estos poseen la forma dada por la ecuación

$$A(q) y(t) = \sum_{i=1}^{N_u} \frac{B_i(q)}{F_i(q)} u_i(t - nk_i) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t)$$

con $y(t)$: Señal de Salida

$u_i(t)$: i -ésima señal de entrada con delay nk_i , de un total de N_u entradas

$e(t)$: Ruido/Perturbación

y los polinomios A, B, C, D y F definidos como

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \\ B(q) &= b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b} \\ C(q) &= 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c} \\ D(q) &= 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{n_d} q^{-n_d} \\ F(q) &= 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{n_f} q^{-n_f} \end{aligned}$$

donde q opera acorde a la expresión

$$r(t - L) = q^{-L} r(t)$$

En la ecuación general, el cociente $B(q)/(A(q)F(q))$ representa la dinámica interna del sistema, mientras que el modelo de perturbación, dado por $C(q)/(A(q)D(q))$, permite incorporar la parte de la respuesta que no puede ser modelada por la relación entre la entrada $u(t)$ y la salida $y(t)$ del sistema.

Los polinomios incluidos en el modelo, dependen tanto del tipo de perturbación como también de la relación entre el modelo dinámico y el de ruido asumida para el sistema, aspecto que condiciona el grado de flexibilidad para ajustar las observaciones, existiendo una serie de estructuras polinomiales que adoptan una notación particular[21], entre las que se encuentran

- **ARX:** Modelo Autorregresivo con Entrada Exógena ($C(q) = D(q) = F(q) = 1$)

$$A(q) y(t) = \sum_{i=1}^{Nu} B_i(q) u_i(t - nk_i) + e(t)$$

- **ARMAX:** Modelo Autorregresivo de media móvil con Entrada Exógena ($D(q) = F(q) = 1$)

$$A(q) y(t) = \sum_{i=1}^{Nu} B_i(q) u_i(t - nk_i) + C(q) e(t)$$

En estos modelos, los términos $\psi(t)$ y $\theta(t)$, presentes en las ecuaciones del método, se encuentran definidas de forma general como

$$\psi(t) = [y(t-1) \dots y(t-n_a) \quad u(t) \quad u(t-1) \dots u(t-n_b) \quad e(t) \quad e(t-1) \dots e(t-n_c)]$$

$$\theta(t) = [-a_1(t) \dots -a_{n_a}(t) \quad b_1(t) \dots b_{n_b}(t) \quad c_1(t) \dots c_{n_c}(t)]$$

Los modelos ARX y ARMAX, han sido típicamente utilizados en la identificación de sistemas estructurales sometidos a excitaciones externas, principalmente de origen ambiental [18] y sísmico. Estos difieren en el tipo de perturbación asumida para el modelo, ya que en el primer caso el término $e(t)$ constituye un ruido blanco, mientras que en el segundo el polinomio $C(q)$ funciona como un filtro para los casos en los que la perturbación presente en la señal no pueda ser considerada como ruido blanco, otorgando una mayor flexibilidad para representar el modelo de ruido, a cambio de un aumento en el número de parámetros a estimar.

- **Selección del Modelo**

En la literatura, los criterios usualmente utilizados para la selección de un modelo polinomial representativo del sistema, a partir de una serie de candidatos, toman en cuenta factores como la complejidad del modelo y el ajuste a la respuesta observada. Entre estos se encuentran los siguientes

- **AIC (Akaike Information Criterion)**

El criterio AIC estima la pérdida de información que existe al aproximar la distribución de probabilidad f del sistema real que genera los datos observados, con una distribución de probabilidad g correspondiente al modelo a evaluar. Dicha pérdida de información en la aproximación, se evalúa mediante el valor esperado de la discrepancia Kullback-Leibler [37], donde el modelo que posee la menor discrepancia (o menor pérdida de información) de entre un set de candidatos, presenta el menor valor del parámetro AIC dado por

$$AIC_i = -2 \log(L_i) + 2 V_i$$

y por lo tanto resulta ser el modelo que mejor explica las observaciones del sistema. En la expresión anterior L_i representa la estimación de máxima verosimilitud, calculada a partir de las diferencias entre los datos de respuesta real y los generados por el modelo, mientras que V_i corresponde al número de parámetros del que depende el i -ésimo modelo a evaluar. Este planteamiento penaliza el uso de modelos de alta complejidad (i.e con una mayor cantidad de parámetros libres), mientras que un mejor ajuste a la respuesta por parte del mismo (mayor valor de L_i), favorece su selección.

El criterio AIC considera de forma implícita que el sistema real es infinitamente dimensional y por lo tanto ninguno de los modelos candidatos corresponde necesariamente al sistema buscado. Generalmente se ha observado que el uso de AIC, tiende a seleccionar modelos demasiados complejos, en la medida en que el número de observaciones en el cálculo de la verosimilitud aumenta.

Otra ecuación encontrada para AIC [21] consiste en

$$AIC = N \cdot \log \left(\det \left(\frac{1}{N} \sum_1^N \epsilon(t, \hat{\theta}) \epsilon(t, \hat{\theta})^T \right) \right) + 2 \cdot n_p + N \cdot (n_y \cdot (\log(2\pi) + 1))$$

donde considerando un sistema con una sola salida ($n_y = 1$) se obtiene

$$AIC = N \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_1^N \epsilon^2(t, \hat{\theta}) \right) + 2 \cdot n_p + N \cdot (\log(2\pi) + 1)$$

$$= -2 \cdot \log \left(\left(\frac{2\pi e}{N} \sum_1^N \epsilon^2(t, \hat{\theta}) \right)^{-N/2} \right) + 2 \cdot n_p$$

lo que resulta equivalente a calcular la verosimilitud de la primera ecuación mediante la expresión

$$L = \left(\frac{2\pi e}{N} \sum_1^N \epsilon^2(t, \hat{\theta}) \right)^{-N/2}$$

En las ecuaciones anteriores N representa el número de datos, $\epsilon(t, \hat{\theta}) = y_{observ}(t) - y_{modelo}(t, \hat{\theta})$ la diferencia entre la observación real y la predicha por el modelo, y n_p el número de parámetros del que depende el modelo (i.e. $n_p = V_i$ de la primera ecuación)

- BIC (Bayesian Information Criterion)

El criterio BIC calcula la pérdida de información de forma análoga a AIC, pero considerando que el verdadero modelo se encuentra dentro del set de candidatos, en donde el mínimo valor para la expresión

$$BIC_i = -2 \log(L_i) + V_i \log(n)$$

otorga el modelo mas apropiado que representa las observaciones del sistema. L_i corresponde a la máxima verosimilitud del modelo, V_i el número de parámetros libres y n la cantidad de datos utilizados para calcular la verosimilitud. A diferencia de AIC, este criterio ha mostrado en la práctica tender a la elección de modelos con menor complejidad [37], pero sujeto a la restricción de asumir que uno de los modelos del set corresponde al sistema real, lo cual constituye un supuesto poco flexible, en la representación del sistema.

Otra expresión encontrada para BIC corresponde a la siguiente

$$BIC = N \cdot \log \left(\det \left(\frac{1}{N} \sum_1^N \epsilon(t, \hat{\theta}) \epsilon(t, \hat{\theta})^T \right) \right) + N \cdot (n_y \cdot (\log(2\pi) + 1)) + n_p \cdot \log(N)$$

donde considerando un sistema con una sola salida ($n_y = 1$) se obtiene

$$\begin{aligned} BIC &= N \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_1^N \epsilon^2(t, \hat{\theta}) \right) + N \cdot (\log(2\pi) + 1) + n_p \cdot \log(N) \\ &= -2 \cdot \log \left(\left(\frac{2\pi e}{N} \sum_1^N \epsilon^2(t, \hat{\theta}) \right)^{-N/2} \right) + n_p \cdot \log(N) \end{aligned}$$

lo que resulta equivalente a calcular la verosimilitud de la primera ecuación, al igual que

en el caso de AIC, mediante la expresión

$$L = \left(\frac{2\pi e}{N} \sum_1^N \epsilon^2(t, \hat{\theta}) \right)^{-N/2}$$

En las ecuaciones anteriores N representa el número de datos (n en la primera ecuación), $\epsilon(t, \hat{\theta}) = y_{observ}(t) - y_{modelo}(t, \hat{\theta})$ la diferencia entre la observación real y la predicha por el modelo, y n_p el número de parámetros del que depende el modelo (i.e $n_p = V_i$ de la primera ecuación)

- FPE (Akaike Final Prediction Error)

El criterio FPE sigue la misma línea de AIC y BIC, cuya expresión a minimizar para la elección del mejor modelo consiste en la siguiente

$$FPE = \det \left(\frac{1}{N} \sum_1^N \epsilon(t, \hat{\theta}) \epsilon(t, \hat{\theta})^T \right) \left(\frac{1 + n_p/N}{1 - n_p/N} \right)$$

donde considerando un sistema con una sola salida ($n_y = 1$) se obtiene

$$FPE = \left(\frac{1}{N} \sum_1^N \epsilon^2(t, \hat{\theta}) \right) \left(\frac{1 + n_p/N}{1 - n_p/N} \right)$$

donde N : número de datos

$\epsilon(t, \hat{\theta})$: diferencia entre observación real y la predicha por el modelo

n_p : número de parámetros del que depende el modelo

• Incorporación de significancia estadística en el modelo seleccionado

Si bien los criterios anteriores otorgan un indicador I (AIC/BIC/FPE) para la selección de un modelo representativo basado en las observaciones, resulta difícil interpretar que tan apropiado es el modelo escogido con respecto a otro candidato con un valor cercano del indicador. Considerando esto, la presente metodología incluye el proceso de transformación de estos indicadores a "pesos" [37], los cuales permiten llevar a cabo una comparación estadística entre todos los modelos.

Estimando la verosimilitud para la diferencia $\Delta_i(I)$ entre los valores de los indicadores para el i -ésimo modelo M_i con respecto a aquel que representa el mejor candidato (aquel con el mínimo AIC/BIC/FPE) como

$$L(M_i|Y) \propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} \Delta_i(I) \right\}$$

$$\text{con} \quad \Delta_i(I) = I_i - \text{mín}(I)$$

y normalizando con respecto a las verosimilitudes de los N_m modelos candidatos, se calcula el peso w_i del i -ésimo modelo, acorde al indicador I como

$$w_i(I) = \frac{\exp \left\{ -\frac{1}{2} \Delta_i(I) \right\}}{\sum_{k=1}^{N_m} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \Delta_k(I) \right\}}$$

en donde la comparación entre dos modelos M_i y M_j se lleva a cabo mediante la denominada *razón de evidencia*, expresada ya sea como el cociente entre los pesos (a), o en forma normalizada (b) como

$$(a) \quad w_i(I) / w_j(I) \qquad (b) \quad w_i / \sum_{k=1}^{N_a} w_k$$

donde la expresión (a) se interpreta como las veces en que el modelo M_i es mas probable de ser el mejor modelo en relación al modelo M_j . Mientras que en la forma (b), el cociente es interpretado como la probabilidad normalizada de que el modelo M_i sea el mejor en relación a los N_a modelos candidatos (con $N_a \leq N_m$)

Cabe notar que los criterios anteriores solo toman en cuenta el grado de ajuste a la respuesta y la simplicidad del modelo para efectuar la selección, pero no consideran una relación representativa del fenómeno que genera la observación, por lo que la incorporación de restricciones en las propiedades modales asociadas al sistema a identificar, tales como rangos admisibles en las frecuencias y amortiguamientos, o comportamientos propios de dichas propiedades con el cambio en el nivel de no linealidad presente en el sistema pueden ser necesarios para llevar a cabo un procedimiento de identificación mas efectiva, pero a su vez mayormente dependiente del conocimiento inicial del sistema.

Una vez escogido el modelo, se realiza la validación del mismo para lo cual existen una variedad de criterios, entre los que se incluyen la comparación de respuesta observada y simulada, comparación entre espectro de Fourier de la respuesta real y la generada por el modelo, test de blancura para la perturbación $e(t)$, test de independencia de la entrada con el residual, detallados en [32] [21].

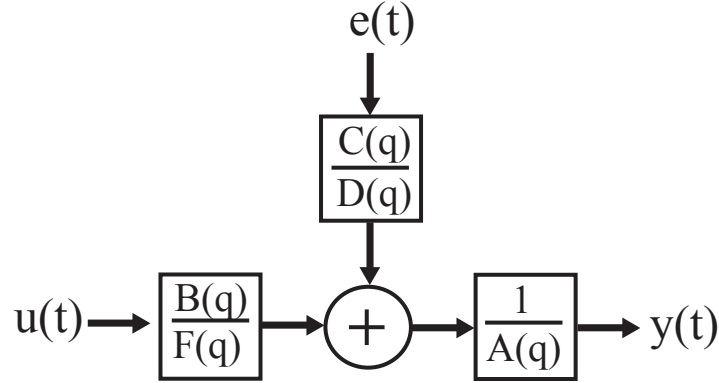


Figura 6: Representación de modelo polinomial para método RPEM

- **Cálculo de Propiedades Modales del sistema**

Finalmente, las frecuencias naturales f_i y los amortiguamientos β_i del sistema están dados por las ecuaciones

$$\beta_i = \frac{\ln(1/r_i)}{\sqrt{\phi^2 + \ln^2(1/r_i)}} \quad f_i = \frac{\ln(1/r_i)}{2\pi \beta_i T}$$

con T : Tiempo de muestreo de los datos $y(t)$, $T = 1/F_s$

r_i, ϕ_i : Módulo y Argumento del i -ésimo polo p_i dado por

$$r_i = p_i p_i^* \quad \phi_i = \tan^{-1} \left[\frac{Im(p_i)}{Re(p_i)} \right]$$

donde p_i^* es el complejo conjugado del polo p_i obtenido del polinomio autorregresivo $A(q)$. Cabe notar que en un modelo de orden n_a , solo se pueden identificar $n_a/2$ modos del sistema.

Por otra parte, el cálculo de la k-ésima forma modal se realiza mediante la descomposición en fracciones parciales de las función de transferencia $H_{ij}(q) = B(q)/A(q)$ correspondiente al par de entrada y salida $\{u_i - y_j\}$. En estas expresiones, el término residual R_{ij}^k de la fracción asociada al polo p_k (relacionado de manera única a la k-ésima frecuencia fundamental f_k del sistema) consiste en el valor de la amplitud de la forma modal en la posición j [25]. Por lo tanto la forma modal completa se obtiene normalizando los residuales obtenidos en cada posición de medición (de las n_y totales) para la k-ésima frecuencia, acorde a la expresión

$$\phi_k = \left[1 \frac{R_{i2}^k}{R_{i1}^k} \dots \frac{R_{in_y}^k}{R_{i1}^k} \right]^T$$

en donde

$$H_{ij}(q) = \sum_{k=1}^{n_a} \left(\frac{R_{ij}^k}{1 - p_k q} + \frac{R_{ij}^{*(k)}}{1 - p_k^* q} \right)$$

Al considerar el algoritmo RPEM con un enfoque escalar (SISO), los parámetros modales identificados pueden variar parcialmente con la localización de la observación, por lo que la determinación de formas modales consistentes conlleva un cierto nivel de complejidad, haciendo necesario un conocimiento a priori por parte del usuario para compatibilizar los resultados obtenidos mediante las observaciones correspondientes a distintas posiciones en el sistema.

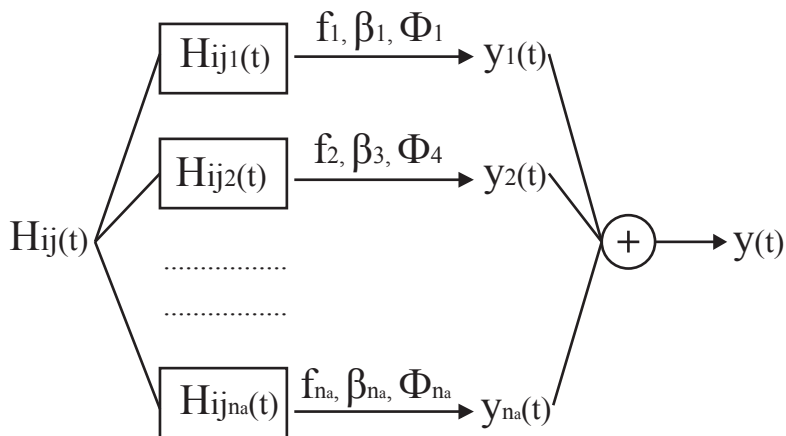


Figura 7: Descomposición de función de transferencia de modelo polinomial en RPEM

2.2.5.- Filtros Bayesianos

Los Filtros Bayesianos son una familia de métodos recursivos de estimación, cuya representación del sistema consiste en un modelo estocástico de espacio estado, con ecuaciones de transición y observación dadas por

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= f(x_k, u_k, w_k) \\ y_k &= h(x_k, v_k)\end{aligned}$$

en donde x_k es el vector de estado asociado a una distribución de probabilidad $p_X(x)$, $\{u_k, y_k\}$ es el par de vectores de entrada y salida del sistema (conocidos), mientras que los términos w_k y v_k son los vectores de ruido de proceso y observación, de media nula y con matrices de covarianza Q_k y R_k respectivamente. Bajo un enfoque bayesiano, la estimación del estado x_k a partir de las observaciones $y_{1:k}$ hasta el tiempo k , equivale a cuantificar la eficiencia de distintos valores para la estimación x_k , mediante la construcción de una función de densidad de probabilidad posterior $p(x_k|y_{1:k})$ (Figura 8), la cual se determina en base a la expresión del Teorema de Bayes como

$$p(X|Y) = \frac{p(Y|X)p(X)}{p(Y)}$$

a partir de una *distribución a priori* $p(X)$ que representa el conocimiento inicial del estado, la *verosimilitud* $p(Y|X)$ que toma en cuenta la predicción de la observación realizada por el modelo, y el *factor de normalización* $p(Y)$ que solo es requerido para cumplir con la condición de distribución de probabilidad

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(X) dx = 1$$

Obtenida la distribución posterior $p(X|Y)$, existen una variedad de criterios para escoger un valor “determinístico” de los estimadores, entre los que se encuentran: MAP (*Maximum a posteriori*) que considera el estado X que maximiza la distribución posterior, ML (*Máxima Verosimilitud*) que selecciona el estado que maximiza la verosimilitud y también MSE (*Estimador de mínimos cuadrados*), el que utiliza la esperanza condicional como estimación del estado, acorde a las expresiones

$$\begin{aligned}\hat{X}_{MAP} &= \arg \max P(X|Y) \\ \hat{X}_{ML} &= \arg \max P(Y|X) \\ \hat{X}_{MSE} &= E\{X|Y\} = \int X P(X|Y)\end{aligned}$$

Sin embargo en sistemas altamente no lineales, donde es frecuente encontrar distribuciones multimodales de un estado (asociadas a múltiples soluciones), el uso de estos estimadores puede resultar contraproducente, siendo conveniente representar directamente la distribución de probabilidad posterior $p(X|Y)$.

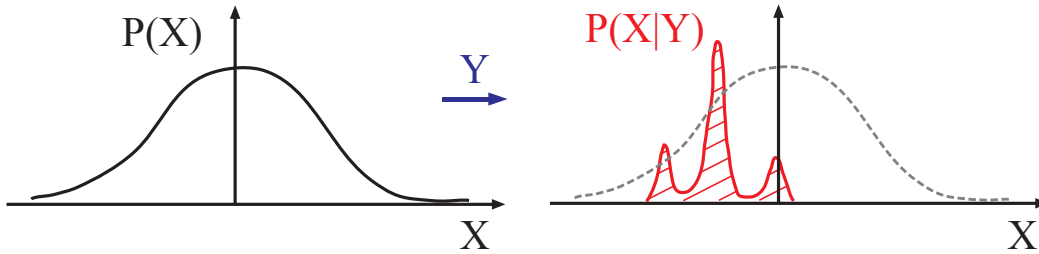


Figura 8: Estimación Bayesiana mediante transformación de $P(X)$ a $P(X|Y)$

Los filtros bayesianos tales como el Filtro de Kalman (KF), Filtro de Kalman Extendido (EKF) y Filtro de Kalman Unscented (UKF) consideran una serie de simplificaciones, con el objetivo de que el problema de estimación sea abordable computacionalmente. Sin embargo, estos métodos asumen una distribución de probabilidad gaussiana para los estados a estimar, lo que representa una limitación para la identificación de parámetros con distribuciones de probabilidad multimodales. Uno de los enfoques que permiten lidiar con esta problemática consiste en los métodos secuenciales de Monte Carlo, particularmente el algoritmo del Filtro de Partículas (PF), a cambio de un alto costo computacional en relación a los métodos anteriores.

Una breve descripción de cada uno de estos algoritmos se presenta en las siguientes secciones, con el objetivo de justificar el uso del Filtro de Partículas como uno de los procedimientos de identificación a evaluar en los capítulos posteriores del estudio.

Filtro de Kalman (KF)

El Filtro de Kalman asume las ecuaciones de transición y observación del modelo, como funciones lineales del estado x_k y de la entrada u_k con respecto a las matrices dependientes del tiempo F_k , B_k y H_k . También considera w_k , v_k como ruidos blancos aditivos no correlacionados, gaussianos, de media nula y con matrices de covarianza Q_k y R_k respectivamente. Esto queda expresado como

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= F_k x_k + B_k u_k + w_k \\y_k &= H_k x_k + v_k \\w_k &\sim N(0, Q_k) \quad v_k \sim N(0, R_k)\end{aligned}$$

Siguiendo un planteamiento recursivo, las siguientes ecuaciones describen los pasos del algoritmo del Filtro de Kalman para la predicción y actualización de la estimación del estado, basado en la observación obtenida en el tiempo t_k [7]

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k|k-1} &= F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \\P_{k|k-1} &= F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \\K_k &= P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \\\hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \\P_{k|k} &= (I - K_k H_k) P_{k|k-1}\end{aligned}$$

Al considerar un modelo lineal con ruido gaussiano, el estado a estimar sigue el mismo tipo de distribución, la que queda definida por sus dos primeros momentos: esperanza \hat{x}_k y varianza P_k . En las ecuaciones anteriores, K_k es la ganancia de Kalman, parámetro que influye en la estimación del estado actual, basado en el nivel de incertidumbre asociado a los valores de las estimaciones anteriores del estado. Las principales limitaciones del algoritmo surgen en sistemas no lineales, para lo cual las variantes de este método, EKF y UKF, utilizan linealizaciones en las ecuaciones del modelo.

Filtro de Kalman Extendido (EKF)

El Filtro de Kalman Extendido lleva a cabo una linealización por expansión en series de Taylor de las funciones de transición y observación del modelo de espacio estado, para incorporar la no linealidad del sistema. Esta metodología requiere el cálculo de los Jacobianos de f y h , evaluados en el valor del estado estimado \hat{x} , para posteriormente aplicar el Filtro de Kalman en el sistema linealizado de forma análoga a lo descrito en la sección anterior. En este caso, las ecuaciones del modelo de espacio estado quedan definidas como

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= F_k x_k + B_k u_k + w_k \\y_k &= H_k x_k + v_k\end{aligned}$$

$$\text{con } F_k = \left. \frac{\partial f(x, u, w)}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k|k}, u_k, 0} \quad H_k = \left. \frac{\partial h(x, u, w)}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k|k-1}, 0}$$

quedando el algoritmo EKF resumido en los siguientes pasos

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k|k-1} &= f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_k, 0) \\P_{k|k-1} &= F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \\K_k &= P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \\\hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - h_k(\hat{x}_{k|k-1}, 0)) \\P_{k|k} &= (I - K_k H_k) P_{k|k-1}\end{aligned}$$

Este método permite trabajar con ecuaciones de proceso y observación no lineales, presentando ventaja en relación al rango de aplicación del Filtro de Kalman (KF). Sin embargo, el algoritmo requiere que dichas funciones sean diferenciables en todo el dominio para el cálculo de los jacobianos, condición que representa su mayor limitación, para los casos de sistemas cuyo modelo sea solo representable mediante funciones no lineales con derivadas no existentes en algunos tramos.

Cabe notar que la estimación del estado se encuentra fuertemente influenciada por el valor alrededor del cual se asume el comportamiento lineal de la función, lo que conlleva a que los puntos vecinos de menor peso en la distribución estimada no contribuyan demasiado a la estimación final del estado.

Filtro de Kalman Unscented (UKF)

El Filtro de Kalman Unscented consiste en un método recursivo planteado por Julier y Uhlmann [17], que hace uso de la *Transformada Unscented (UT)* para realizar una "linealización estadística" del sistema, en donde la distribución de probabilidad Gaussiana del parámetro a estimar es representada mediante una serie de N_σ puntos, llamados *puntos sigma*, los cuales conservan los momentos de la distribución, dados por la esperanza μ y varianza R , al ser transformados a través de un sistema no lineal.

Calculados inicialmente los puntos sigma χ_i y sus respectivos "pesos" w_i , estos se evalúan directamente en el sistema no lineal para obtener la mejor aproximación Gaussiana de la distribución, representada por los puntos transformados y_i . Para esto, los puntos seleccionados deben cumplir con las siguientes restricciones

$$\begin{aligned} \mu_x &= \sum_{i=1}^{N_\sigma} w_i \chi_i & R_{xx} &= \sum_{i=1}^{N_\sigma} w_i (\chi_i - \mu_x) (\chi_i - \mu_x)' \\ \mu_y &= \sum_{i=1}^{N_\sigma} w_i y_i & R_{yy} &= \sum_{i=1}^{N_\sigma} w_i (y_i - \mu_y) (y_i - \mu_y)' \\ \sum_{i=1}^{N_\sigma} w_i &= 1 & R_{xy} &= \sum_{i=1}^{N_\sigma} w_i (\chi_i - \mu_x) (y_i - \mu_y)' \end{aligned}$$

Estas condiciones se cumplen para el siguiente set de $N_\sigma = 2 N_x - 1$ puntos, con N_x la dimensión del estado del sistema [17]

$$\begin{aligned} \chi_0 &= \mu_x & w_0 &= \frac{1}{N_x} \\ \chi_i &= \mu_x + \sqrt{N_x} \sigma_i & w_i &= \frac{1}{2 N_x} \\ \chi_{i+N_x} &= \mu_x - \sqrt{N_x} \sigma_i & w_{i+N_x} &= \frac{1}{2 N_x} \end{aligned}$$

con σ_i la i -ésima desviación estándar y $\{\chi_i, w_i\}$ el i -ésimo par de punto sigma con su peso respectivo. Las etapas del algoritmo UKF son presentadas en las siguientes ecuaciones. Este método posee una serie de parámetros ajustables (en el caso mostrado consiste en α , pero dependiendo del planteamiento se encuentran otros parámetros como $\alpha \in (0, 1]$, $\beta = 2$ y $\kappa \geq 0$), los que hacen variar la forma de la distribución gaussiana, principalmente en términos de la separación de los puntos sigma. Dichos valores poseen intervalos recomendados, pero su valor varía según la aplicación.

- Selección de Puntos Sigma y Pesos

$$\begin{aligned}
\chi_{0,k-1}^a &= x_{k-1}^a & i &= 0 \\
\chi_{i,k-1}^a &= x_{k-1}^a + (\alpha\sqrt{LP_{k-1}^a})_i & i &= 1, \dots, L \\
\chi_{i,k-1}^a &= x_{k-1}^a - (\alpha\sqrt{LP_{k-1}^a})_{i-L} & i &= L + 1, \dots, 2L \\
w_0^{(m)} &= 1 - \frac{1}{\alpha^2} & i &= 0 \\
w_0^{(c)} &= 4 - \frac{1}{\alpha^2} - \alpha^2 & i &= 0 \\
w_i^{(m)} = w_i^{(c)} &= \frac{1}{2\alpha^2 L} & i &= 1, \dots, 2L
\end{aligned}$$

- Predicción de estimación UKF

$$\begin{aligned}
\chi_{k|k-1}^x &= f(\chi_{k-1}^x, u_k, \chi_{k-1}^w) \\
\hat{x}_{k|k-1} &= \sum_{i=0}^{2L} w_i^{(m)} \chi_{k|k-1}^x \\
P_{k|k-1} &= \sum_{i=0}^{2L} w_i^{(c)} [\chi_{k|k-1}^x - \hat{x}_{k|k-1}] [\chi_{k|k-1}^x - \hat{x}_{k|k-1}]^T \\
Y_{k|k-1} &= h(\chi_{k|k-1}^x, \chi_{k-1}^v) \\
\hat{y}_{k|k-1} &= \sum_{i=0}^{2L} w_i^{(m)} Y_{i,k|k-1}
\end{aligned}$$

- Corrección de estimación UKF

$$\begin{aligned}
P_{zz} &= \sum_{i=0}^{2L} w_i^{(c)} [Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_{k|k-1}] [Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_{k|k-1}]^T \\
P_{xz} &= \sum_{i=0}^{2L} w_i^{(c)} [\chi_{i,k|k-1}^x - \hat{x}_{k|k-1}] [Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_{k|k-1}]^T \\
K_k &= P_{xz} P_{zz}^{-1} \\
\hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - \hat{z}_{k|k-1}) \\
P_{k|k} &= P_{k|k-1} - K_k P_{yy} K_k^T
\end{aligned}$$

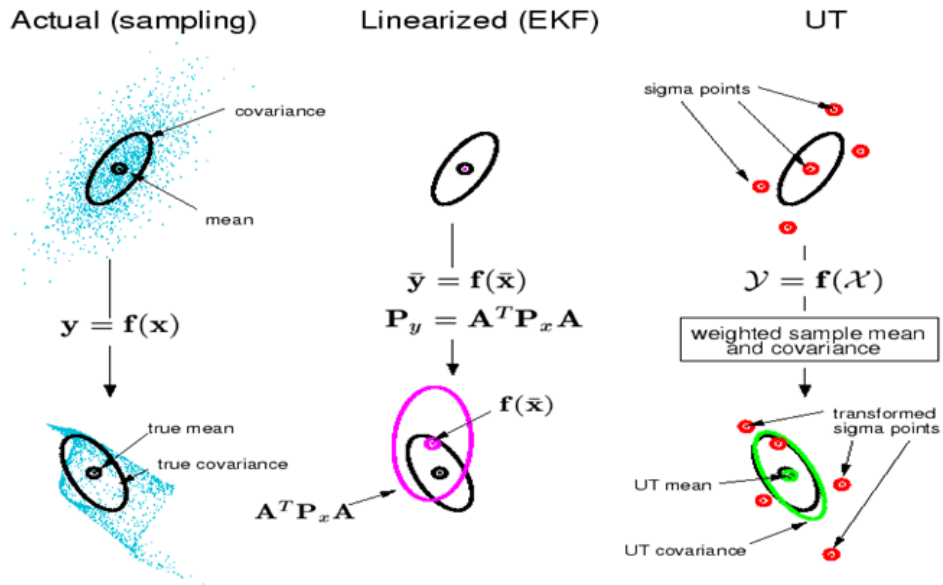


Figura 9: Comparación UKF vs EKF (Ref: <http://www.cslu.ogi.edu/nsel/ukf/node6>)

La ventaja que presenta este algoritmo en relación al EKF es que no requiere que las funciones del modelo sean diferenciables en todo el dominio, ni el cálculo de jacobianos, el cual conlleva el mayor costo computacional. Por otra parte, la representación de la distribución como una serie de puntos sigma distribuidos acorde al algoritmo UT hace que el parámetro estimado presente una mayor influencia del set completo de puntos seleccionados, resultando en una estimación mas representativa de la distribución en comparación al caso del EKF, donde la distribución presenta una fuerte influencia del valor de la estimación utilizado para realizar la linealización \hat{x}_{k-1}

La principal desventaja del método se asocia principalmente a la separación de los puntos sigma, ya que en la medida en que el sistema a identificar sea altamente no lineal, esta se hará mucho mas grande, llevando a problemas en el cálculo de la matrices de covarianza, las cuales dentro de la metodología planteada requieren ser al menos semidefinidas positiva, para efectuar la descomposición de Cholesky, representando este el paso que presenta una mayor complejidad en el método.

Basado en diversos estudios [38] [16] [28], tanto EKF como UKF presentan desempeños relativamente similares, pero este último presenta una mayor versatilidad para abordar el problema de estimación en sistemas no lineales de mayor complejidad y con mejores resultados, como se muestra en la Figura 9.

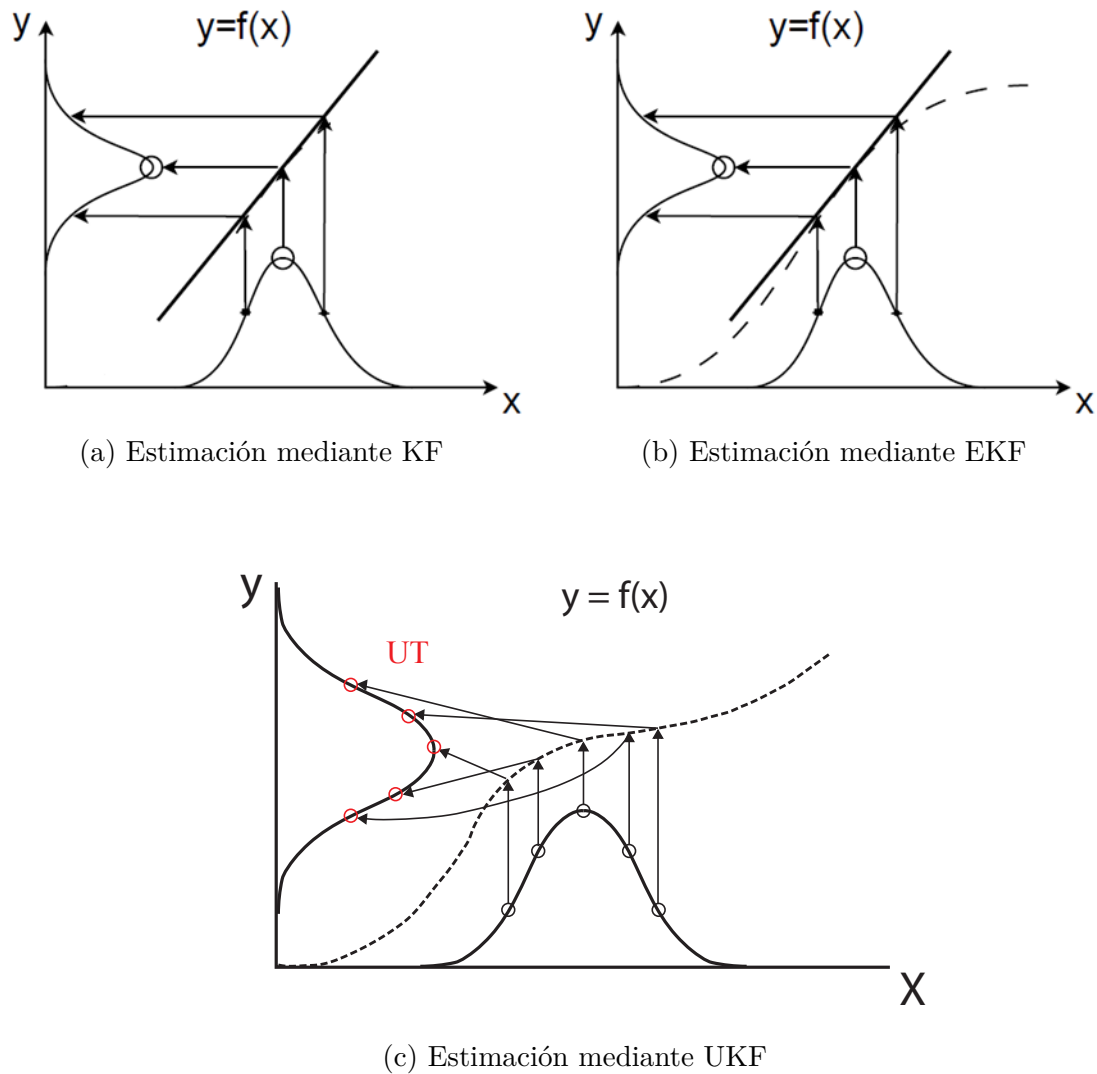


Figura 10: Esquemas de distribuciones de probabilidad asumidas por Filtros Bayesianos KF, EKF, UKF y limitaciones para sistema no lineal (Ref: Comparison of Kalman Filter Estimation Approaches for State Space Models with Nonlinear Measurements, Frederik Orderud [28])

Los algoritmos anteriores asumen una distribución de probabilidad gaussiana para el estado a estimar como lo muestra la Figura 10, pero en la medida en que la no linealidad del sistema aumenta este puede ser un supuesto bastante alejado de la distribución real del estado, la cual puede ser multimodal. Los métodos secuenciales de Monte Carlo, consisten en otro enfoque que permite estimar distribuciones arbitrarias a cambio de un mayor costo computacional. Este es el caso del algoritmo del Filtro de Partículas, el cual se presenta en la siguiente sección.

2.2.6.- Filtro de Partículas (PF)

El Filtro de Partículas consiste en un método que permite abordar el problema de estimación de parámetros y estados del sistema que siguen una distribución de probabilidad arbitraria, representándola en forma discreta mediante un set de muestras con pesos asignados, mediante un enfoque de simulación de Monte Carlo. En la medida en que el número de muestras aumenta, la representación converge a la distribución real de la variable en estudio, requiriendo para esto de un mayor costo computacional.

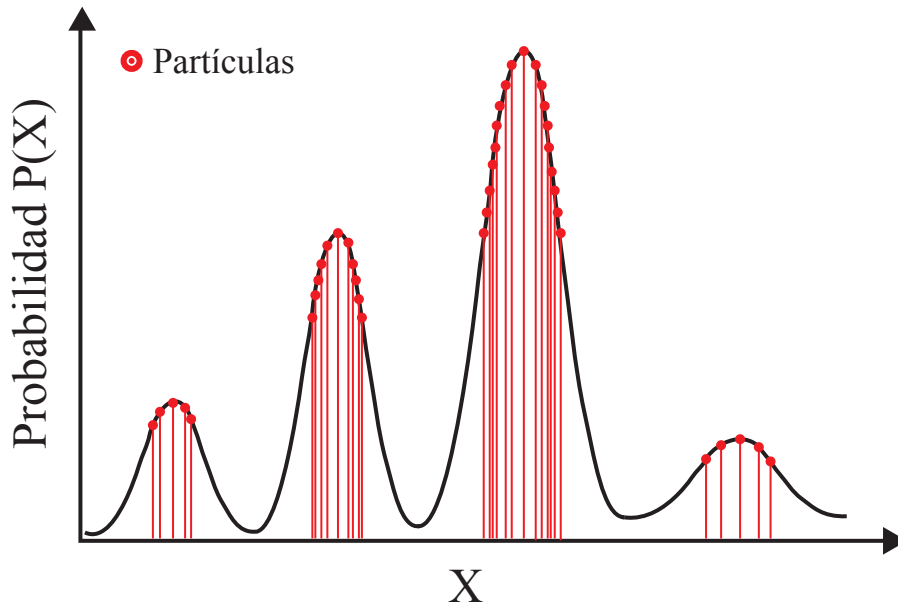


Figura 11: Representación Discreta de PDF del parámetro

Los algoritmos de Filtro de Partículas aproximan la distribución posterior $P(Y|X)$ mediante un set de N partículas χ_k^i , $i=1, \dots, N$ asociados a sus respectivos pesos w_k^i (Fig. 11), los cuales son determinados mediante el método de *Muestreo por Importancia (IS)* [7].

El Muestreo por Importancia consiste en un método que permite obtener muestras representativas de la distribución de probabilidad buscada ('target') $p(x)$, a partir de un set de muestras de otra distribución de probabilidad "conocida" $q(x)$ a partir de la cual resulta mas simple realizar un muestreo (como por ejemplo una distribución uniforme). Para que el muestreo sea efectivo, ciertas condiciones deben cumplirse con respecto a la distribución inicial $q(x)$, influyendo en cierto grado en la calidad de la representación de la distribución buscada $p(x)$, las cuales se fundamentan en lo siguiente,

$$\text{Sea } p(x) \leq q(x) \leq 0 \quad \forall x$$

Se tiene que cualquier integral de la forma $I = \int p(x) dx$ puede ser escrita como,

$$I = \int \frac{p(x)}{q(x)} q(x) dx$$

siempre que $p(x)/q(x)$ se encuentre acotado superiormente. Por lo tanto, se puede realizar una estimación de Monte Carlo a partir de un set de N muestras independientes de $q(x)$ para escribir I de la forma

$$I_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_k^i \delta(x_k - x_k^i) \quad \text{con} \quad w_k^i = \frac{p(x^i)}{q(x^i)}$$

con δ : Delta de Dirac.

Dado esto, la distribución de probabilidad en el tiempo t_k buscada se puede aproximar como

$$p(x_k | y_{1:k}) = \sum_{i=1}^N w_k^i \delta(x_k - x_k^i) \quad \text{donde} \quad w_k^i \propto \frac{p(x_k^j | y_{1:k})}{q(x_k^j | y_{1:k})}$$

donde x_k^j son las N muestras (o partículas) obtenidas a partir de la función densidad de importancia $q(x_k^j | y_{1:k})$. Con respecto a los pesos de cada muestra, estos se estiman de forma recursiva haciendo uso de la propiedad Markoviana de los procesos caracterizando el espacio estado que representa al sistema mediante la expresión,

$$w_k^j \propto w_{k-1}^j \frac{p(y_k | x_k^j) p(x_k^j | x_{k-1}^j)}{q(x_k^j | x_{k-1}^j, y_k)}$$

con $p(x_k^j | x_{k-1}^j)$: Densidad de Transición

$p(y_k | x_k^j)$: Función de Verosimilitud

Una serie de estudios se han realizado para observar la influencia de la elección de $q(x_k^j|x_{k-1}^j, y_k)$ con el objetivo de minimizar la varianza entre los pesos w_k^j en cada iteración, convergiendo en distintas variedades de filtros de partículas con sus respectivas características [7].

La elección estándar de esta función en diversas aplicaciones, ha consistido en usar la función densidad de transición,

$$q(x_k|x_{k-1}, y_{1:k}) = p(x_k|x_{k-1}) \Rightarrow w_k^j = w_{k-1}^j p(y_k|x_k^j)$$

lo que hace la elección de los pesos de las partículas principalmente dependientes de la función de verosimilitud, caracterizada por la función de observación del modelo de espacio estado del sistema.

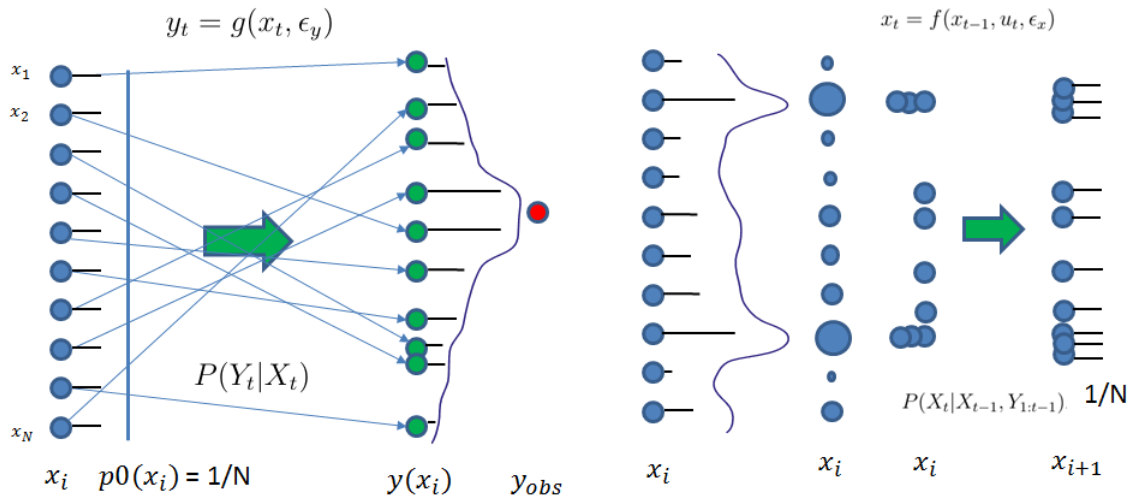


Figura 12: Remuestreo en Filtro de Partículas

Uno de los principales problemas que presenta la aplicación del filtro de partículas es el denominado problema de *degeneración* de las muestras, en donde con cada iteración, la varianza de las partículas representando la distribución buscada aumenta considerablemente, concentrándose un gran peso en unas pocas partículas, provocando de esta forma una pérdida de resolución en la representación y un mayor uso de recursos computacionales en actualizar las partículas que poseen un menor peso asociado, y que por lo tanto no tienen demasiada influencia en la estimación de la distribución $p(X|Y)$.

Una de las formas para abordar el problema anterior consiste en la inclusión de un paso a la metodología del Filtro de Partículas, consistente en el *Remuestreo* (SIR), en donde las partículas con menor peso son eliminadas y remuestreadas dando origen a un nuevo set aleatorio de valores con pesos uniformes ($w_k^j = 1/N$), alrededor de aquellas partículas que poseen un mayor peso (Figura 12). Para esto, existe una gran variedad de técnicas de muestreo presentes en la literatura, entre las cuales se encuentra el denominado *muestreo multinomial*[13], utilizado en el presente estudio para generar partículas, con reemplazo, a partir de una distribución inicial.

En términos generales, el alto costo computacional en comparación a los métodos presentados en las secciones anteriores constituye la mayor desventaja en el uso de este algoritmo. Por otra parte, el Filtro de Partículas presenta su mayor ventaja en la capacidad de trabajar con la estimación de parámetros cuya distribución es completamente arbitraria, lo cual se presenta en sistemas con un alto carácter no lineal, y permite caracterizar la existencia de otras soluciones que con el supuesto gaussiano de la distribución no sería posible de identificar (Fig. 13). Este último aspecto es el que justifica el uso de este método por sobre los otros algoritmos de Filtro de Kalman para el desarrollo del presente estudio.

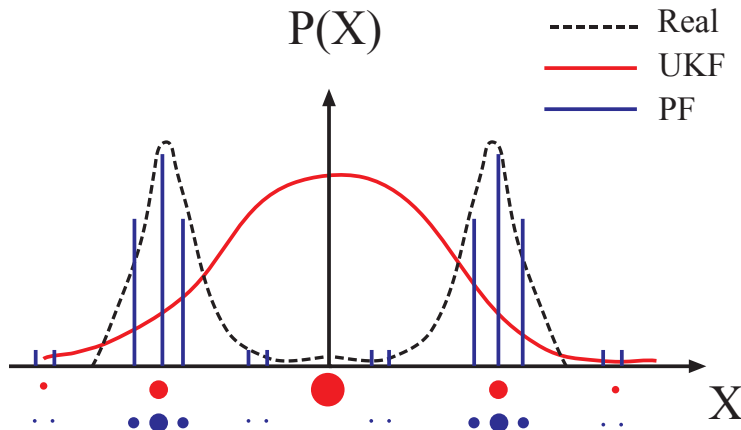


Figura 13: Estimación de distribución multimodal UKF vs PF

Complementariamente el concepto de *Evolución Artificial de Parámetros* se incluye en este procedimiento de identificación. Este es detallado en la siguiente sección y permite realizar la estimación de parámetros constantes de un modelo dinámico no lineal, del cual solo se conoce su comportamiento de forma general a partir su entrada y salida (modelo de caja negra), situación que se presenta cuando el modelo asumido para la identificación es altamente complejo y las relaciones entre sus estados internos y las observaciones del sistema no son conocidos a priori por el usuario.

- **Implementación del Filtro de Partículas con Evolución Artificial de Parámetros**

Un enfoque complementario al Filtro de Partículas desarrollado para modelos dinámicos representados en forma de espacio estado y caracterizados como procesos Markovianos, consiste en la inclusión de los parámetros θ que relacionan los estados del modelo dentro del vector de estado x_k , de modo de llevar a cabo una estimación conjunta del vector

$$x_k = \begin{bmatrix} X_k \\ \theta \end{bmatrix}$$

En estos casos, los estados X_k son considerados “variantes” en el tiempo y siguen la ecuación de proceso que define el modelo dinámico, mientras que los parámetros θ , considerados invariantes, evolucionan a partir de la adición de un ruido blanco ϵ_t de media nula y matriz de covarianza W_k definida acorde al grado de incertidumbre en la estimación del parámetro (i.e $\epsilon_t \sim W(0, W_t)$), a partir de la expresión

$$\theta_j = \theta_{j-1} + \epsilon_j$$

donde el índice j representa la j -ésima iteración que se realiza para estimar el parámetro buscado. Este constituye el procedimiento de Evolución Artificial de Parámetros [20], donde a diferencia de la evolución de un estado X_k , la ecuación que define la evolución del parámetro no constituye un proceso en sí, siendo mas bien una expresión con la cual se realiza una búsqueda del vector de parámetros que mejor describe las observaciones mediante un proceso de “random walk”. Por otra parte, si el interés de la estimación radica en encontrar solamente el valor de los parámetros θ , la anterior constituye la ecuación de proceso del modelo de espacio estado, siendo necesario solo contar con la ecuación de observación del modelo a partir de la entrada, es decir el equivalente a un modelo de caja negra siguiendo las ecuaciones

$$\begin{aligned} \theta_j &= \theta_{j-1} + \epsilon_j \\ y_j &= h(\theta_j, u_j, v_j) \end{aligned}$$

En este caso, la etapa secuencial del método consiste en iteraciones, en donde utilizando la secuencia completa de las observaciones y_j y la excitación externa hacia el sistema u_j , se estiman los parámetros θ_j y por consiguiente el sistema queda completamente determinado.

- Elección de función verosimilitud para la actualización de los pesos

La actualización de los pesos w_k^j asociados a la j-ésima partícula para la k-ésima iteración se lleva a cabo a partir de las expresión dada por,

$$w_k^j = w_{k-1}^j p(y_k | x_k^j)$$

la cual asume la elección de la densidad propuesta $q(x)$ como la función de transición del modelo dinámico. Lo anterior implica que los pesos quedan determinados por la función de verosimilitud $p(y_k | x_k^j) = \mathcal{L}(x|y)$ la cual toma en cuenta la “similitud” entre las observaciones y_j y las respuestas generadas por el modelo \hat{y}_j (sin considerar el ruido de observación) dado un vector de parámetros (considerado en este caso como una partícula).

Para la definición de la función $\mathcal{L}(x|y)$, se utilizará el error cuadrático medio (MSE) para L canales de medición, expresado como,

$$\text{MSE} = \sum_{n=1}^L \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sigma_v^2} \right)_n = \sum_{n=1}^L \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{v_i^2}{\sigma_v^2} \right)_n$$

en donde asumiendo el ruido de observación $v_i = y_i - \hat{y}_i$ como un proceso gaussiano de media nula y varianza σ_v^2 (i.e $v_j \sim N(0, \sigma_v^2)$), se tiene que la razón $v_i^2/\sigma_v^2 \sim \chi_1^2$, ya que $v_i/\sigma_v \sim N(0, 1)$. Por otra parte, la suma de N variables aleatorias independientes $X^i \sim \chi_1^2$ y la media \bar{X} de una variable aleatoria $X \sim \chi_k^2$ siguen las propiedades,

$$\sum_{i=1}^N X^i \sim \chi_N^2 \quad \text{con} \quad \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X \sim \Gamma(N \cdot k/2, 2/N)$$

por lo tanto, reordenando la expresión para MSE de la forma,

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{n=1}^L \left(\frac{v_i^2}{\sigma_v^2} \right)_n \right)$$

puede interpretarse como la media de la variable aleatoria $X = \sum_{n=1}^L (v_i^2/\sigma_v^2)_n \sim \chi_L^2$, la cual sigue la distribución *Gamma*

$$\text{MSE} \sim \Gamma(\alpha = N \cdot L/2, \theta = 2/N)$$

siendo N el número de datos de la señal y L el número de canales de observación del sistema utilizados para llevar a cabo la identificación. Cabe notar que para que el error cuadrático medio distribuya acorde a dicha función, debe cumplirse que las señales de observación sean independientes entre sí.

Basado en la deducción anterior, la función de verosimilitud propuesta consiste en la función de densidad de probabilidad de la distribución *Gamma* del error cuadrático medio x (ECM), dada por

$$\mathcal{L}(x|\alpha, \theta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \theta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\theta}}$$

donde en la medida en que la predicción del modelo \hat{y}_j se acerque a la observación medida y , la función $\mathcal{L}(x|\alpha, \theta)$ adquiere mayores valores, provocando que los pesos asociados a las partículas respectivas aumenten en cada iteración. Por otro lado, aquellas con un menor valor de verosimilitud son ponderadas por valores cercanos a cero, lo que disminuye los pesos de dichas partículas.

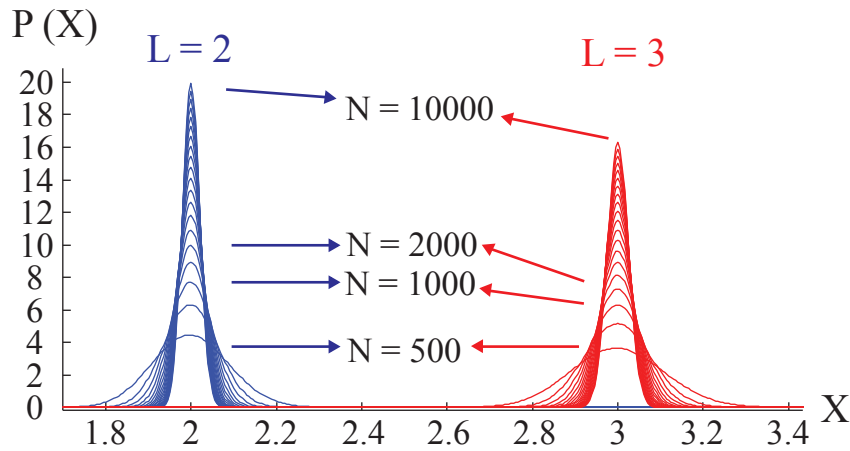


Figura 14: Variación de PDF de distribución Gamma con L y N

Cabe notar que en la medida en que el número de datos aumenta, la función de densidad de probabilidad de la distribución *Gamma* se vuelve más estrecha (Fig. 14), lo que provoca que el ajuste de la observación a partir del modelo para un vector de parámetros determinado deba ser muy preciso. Ante esto, se propone también una modificación en el ancho que abarca el intervalo que asigna los mayores pesos de la distribución, con el objetivo de considerar la suficiencia del modelo analítico propuesto para el sistema a identificar (si la observación es generada desde los modelos analíticos en los que se basa la identificación, esta modificación no es necesaria puesto que la respuesta proviene del modelo propuesto para representar el sistema).

Finalmente, el algoritmo de Filtro de Partículas con Evolución Artificial de Parámetros queda resumido en los siguientes pasos,

Algoritmo de Filtro de Partículas con Evolución Artificial de Parámetros.

- Definir Número de partículas (N_p), iteraciones (N_{it}) y umbral de remuestreo (N_{eff})
- Generar partículas y pesos $\{p_i^1, w_i^1\}$ desde densidad de probabilidad inicial conocida p_{x0}
- Para las iteraciones $j = 2 : N_{it}$

- Añadir ruido de proceso $\epsilon_i \sim N(0, W_\epsilon)$ a la i -ésima partículas

$$p_i^j = p_i^{j-1} + \epsilon_i$$

- Calcular las respuestas \hat{y}_i asociadas a las partículas p_i a partir del modelo y calcular la función verosimilitud $\mathcal{L}(\hat{y}_i)$
- Actualizar los pesos multiplicándolos por la función de verosimilitud.

$$w_i^j = w_i^{j-1} \cdot \mathcal{L}(\hat{y}_i)$$

- Normalizar pesos $\{w_i\}$ mediante la expresión

$$w_i^j = w_i^j / \sum_{i=1}^{N_p} w_i^j$$

- Remuestreo: Verificar si es que se cumple la desigualdad (criterio de decisión propuesto en [15])

$$1 / \sum_{i=1}^{N_p} w_i^j \leq N_{eff}$$

para decidir si llevar a cabo el remuestreo de partículas en las regiones de mayor probabilidad. En caso de cumplirse, efectuar muestreo multinomial de partículas.

- Retornar partículas y pesos $\{p_i^j, w_i^j\}$ para la siguiente iteración

2.3. MODELOS ANALÍTICOS PARA AISLACIÓN SÍSMICA

En la literatura, una gran variedad de modelos de histéresis han sido propuestos para caracterizar la respuesta no lineal de elementos estructurales con disminución aparente de rigidez. Este fenómeno se observa ante excitaciones cíclicas que generen grandes desplazamientos, como ocurre en el caso de sistemas con aislación sísmica.

Dos de los modelos frecuentemente utilizados para representar el comportamiento de aisladores sísmicos, han sido los modelos de histéresis de Bouc-Wen y Bilineal, los que son descritos en las secciones 2.3.1 y 2.3.2.

2.3.1. MODELO DE HISTERESIS DE BOUC-WEN

- **Planteamiento General**

El modelo de Bouc-Wen consiste en una representación analítica del fenómeno de histéresis, ante un proceso cíclico de carga y descarga. Dada la ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + F(t) = f(t)$$

con m la masa del sistema, c el amortiguamiento viscoso lineal, $F(t)$ la fuerza restitutiva de la estructura, $f(t)$ la excitación externa a la que se encuentra sometida, u , \dot{u} y $\ddot{u}(t)$ las respuestas relativas de desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema respectivamente, el modelo de Bouc-Wen divide $F(t)$ en una parte elástica y una histerética, quedando expresada como:

$$F(t) = F^{elas} + F^{hist} = \alpha k_i u(t) + (1 - \alpha) k_i z(t)$$

con $\alpha = \frac{k_f}{k_i}$: Razón de rigideces post fluencia k_f y elástica k_i (con $k_i \geq k_f$, i.e $0 \leq \alpha \leq 1$)

$k_i = \frac{F_y}{u_y}$: Rigidez elástica, con esfuerzo y desplazamiento de fluencia F_y y u_y

$z(t)$: Estado hysterético no-observable (usualmente llamado desplazamiento hysterético) obtenido de la expresión,

$$\dot{z}(t) = A\dot{u}(t) - \beta|\dot{u}(t)||z(t)|^{n-1}z(t) - \gamma\dot{u}(t)|z(t)|^n$$

o también

$$\dot{z}(t) = \dot{u}(t)\{A - [\beta \operatorname{sgn}(z(t)\dot{u}(t)) + \gamma] |z(t)|^n\}$$

donde $\operatorname{sgn}()$ es la función signo. En las ecuaciones anteriores, A , β , γ son parámetros que definen la forma de la histéresis, mientras que la velocidad de transición entre las ramas elástica-lineal y de post-fluencia, se encuentra sujeta al valor que toma n . Los valores admisibles para estas cantidades corresponden a los rangos: $\gamma \in [-\beta, \beta]$ y β , A , $n > 0$.

La cantidad de parámetros de la que depende el modelo, le otorga una gran flexibilidad para ajustar distintas curvas de histéresis encontradas en la práctica, pero a su vez esta característica representa una desventaja en el proceso de identificación, conduciendo a problemas de observabilidad del modelo. Esto quiere decir que, ante un número fijo de observaciones disponibles del sistema, una mayor cantidad de parámetros a estimar provocará que el problema tenga muchas soluciones factibles, sujetas a las restricciones mencionadas.

En el caso del sistema de 1 GDL presentado anteriormente, los parámetros a estimar corresponden al conjunto $\{k_i, c, \alpha, A, \beta, \gamma, n\}$ (m se asume conocido para el problema, ya que se puede estimar con buena precisión a partir de las dimensiones y propiedades del material de los elementos estructurales que componen el sistema), junto con los estados $\{u(t), \dot{u}(t) \text{ y } z(t)\}$. Algunos autores [10] [23], han propuesto simplificaciones para los parámetros del modelo, evitando la redundancia en su definición, reduciendo de esta manera la complejidad del problema de identificación. Entre estas se encuentran

$$A = 1 \quad \frac{A}{\gamma + \beta} = 1$$

Sin embargo, estas formulaciones conllevan a limitaciones, para efectos de modelamiento de una forma hysterética particular, que con una mayor cantidad de parámetros puede ser ajustada con mayor precisión.

Cabe notar que el modelo de Bouc-Wen también incluye el caso en que el modelo se comporte de forma lineal-elástica, situación que se presenta en estructuras aisladas ante pequeñas deformaciones, para lo cual se define el valor de $\alpha = 1$ (i.e $k_i = k_f$). En este

planteamiento general del modelo, los parámetros mencionados carecen de interpretación física, representando solo grados de libertad disponibles para el ajuste de una variedad de formas histeréticas (Fig. 15).

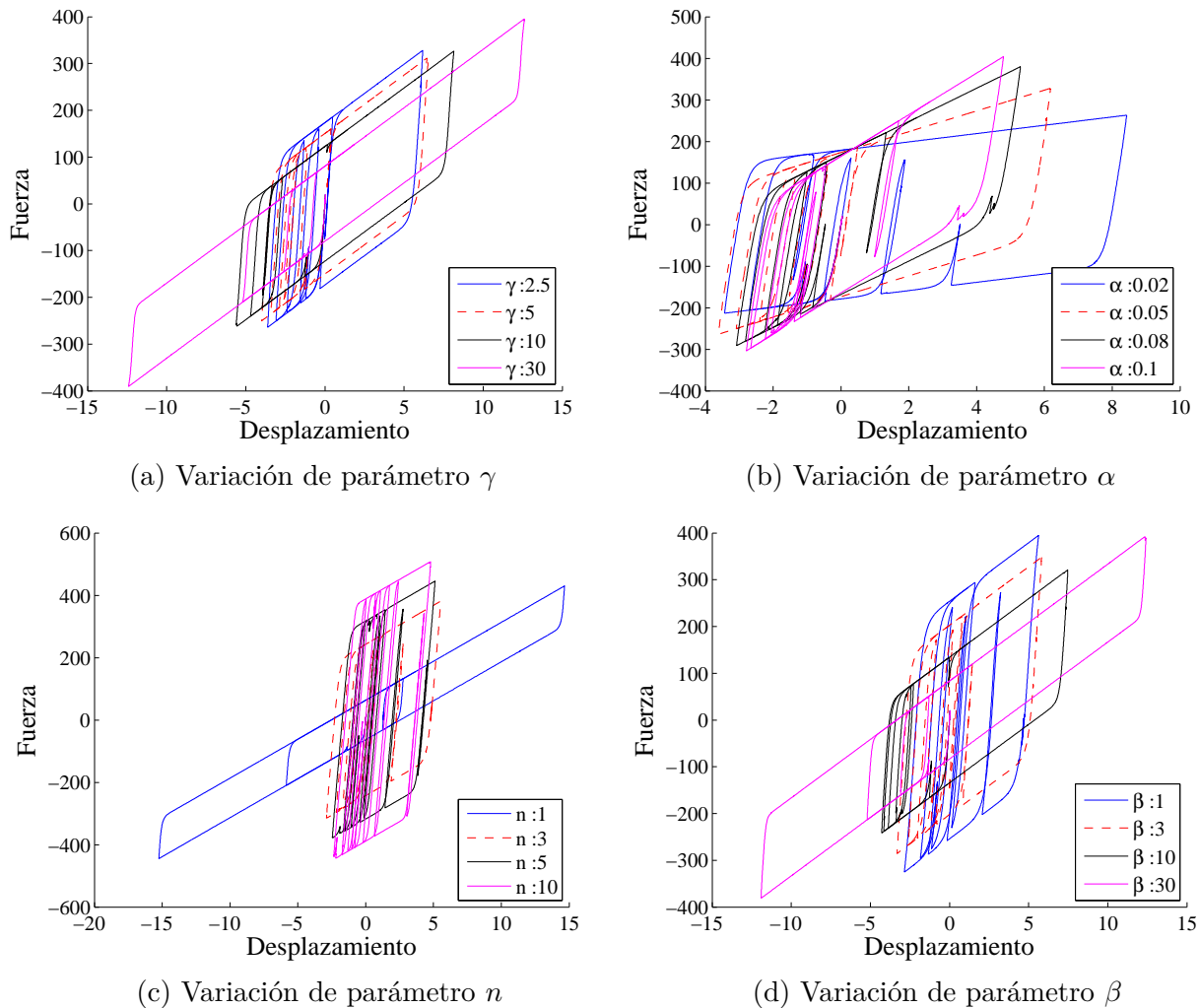


Figura 15: Forma de Histéresis de Bouc-Wen

- **Definición en software SAP2000**

La selección de este tipo de modelo de histéresis en el programa SAP2000 se define como "Plastic-Wen", el que consiste en una representación uniaxial sin interacción entre direcciones ortogonales, cuya fuerza restitutiva $F(t)$ se expresa análogamente a la presentada en el planteamiento general como

$$F(t) = \alpha \cdot k_i \cdot u(t) + (1 - \alpha) \cdot F_y \cdot z(t)$$

Por otra parte, el desplazamiento histérico $z(t)$ se obtiene de de la resolución de la ecuación,

$$\dot{z}(t) = \frac{k_i}{F_y} \dot{u}(t) (1 - |z(t)|)^n \quad \text{si } \dot{u}(t) \cdot z(t) > 0$$

$$\dot{z}(t) = \frac{k_i}{F_y} \dot{u}(t)$$

con los estados $\{u(t), \dot{u}(t), z(t)\}$ y los parámetros $\{\alpha, F_y, k_i, n\}$ presentados anteriormente. Estas ecuaciones corresponden a una forma modificada de las relaciones correspondientes al planteamiento general, y se definen en base a parámetros que poseen interpretación física para la representación de una variedad de curvas de histéresis (Fig. 16).

La incorporación de un elemento con comportamiento representado por el modelo histérico de Bouc-Wen en un sistema de varios grados de libertad (NGDL), resulta directo tanto en las ecuaciones de movimiento, como también en una forma de espacio estado, en donde el vector de estados a considerar corresponde a los desplazamientos relativos, desplazamiento histérico y velocidades relativas del sistema $\{u_i(t), z(t), \dot{u}_i(t)\}_{i=1:N}$, con N los grados de libertad de la estructura.

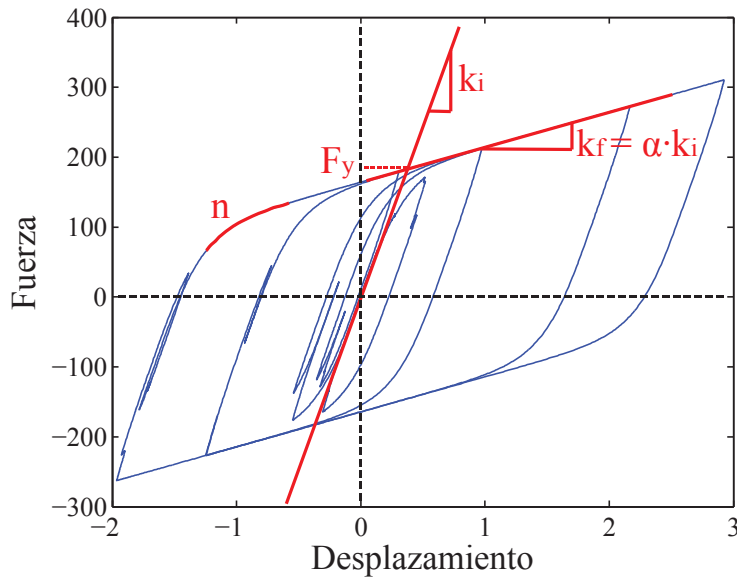


Figura 16: Forma de Histéresis de Bouc-Wen según SAP2000 con parámetros dinámicos interpretables

2.3.2. MODELO DE HISTERESIS BILINEAL

- **Planteamiento General**

El modelo bilineal consiste en otra de las herramientas utilizadas para describir el comportamiento de histéresis en un elemento sometido a cargas cíclicas. En este caso la relación entre la fuerza restitutiva y desplazamiento relativo del elemento se define por tramos lineales, que cumplen ciertas condiciones de transición. Dada la ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + F(t) = f(t)$$

con m la masa del sistema, c el amortiguamiento viscoso lineal, $F(t)$ la fuerza restitutiva de la estructura, $f(t)$ la excitación externa a la que se encuentra sometida, u , \dot{u} y $\ddot{u}(t)$ las respuestas relativas de desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema respectivamente, el modelo bilineal propone una expresión para $F(t)$ definida de la siguiente forma:

Tramo I : Tramo lineal con $|u(t)| \leq |u_y|$

$$F(t) = k_i u(t)$$

Tramo II : Tramo post fluencia carga - descarga con $|u(t)| \geq |u_y|$ y $|\dot{u}(t)| \neq 0$

$$F(t) = \pm F_y + k_f(u(t) \mp u_y)$$

Tramo III : Tramo post fluencia descarga - carga $|u(t)| \in [|u_t|, |u_{tr}|]$

$$F(t) = F_t + k_i(u(t) - u_t)$$

$k_i = \frac{F_y}{u_y}$: Rigidez elástica, con esfuerzo y deformación de fluencia F_y , u_y

k_f : Rigidez post fluencia

F_t y u_t : Esfuerzo y deformación donde $\dot{u}(t) = 0$

F_{tr} y u_{tr} : Esfuerzo y deformación donde se intersecta el tramo III con tramo II

La transición de los tramos anteriores se encuentran definidas por las expresiones presentadas a continuación, las que se muestran junto con los parámetros del modelo en la Fig. 17.

Transición	Condición	
I \longrightarrow II	$ u(t) = u_y $	con $ \dot{u}(t) \neq 0$
II \longrightarrow III	$ \dot{u}(t) = 0$	
III \longrightarrow II	$u(t) = u_t$ o $u(t) = u_{tr}$	con $ \dot{u}(t) \neq 0$

En este estudio, se utiliza el modelo bilineal sin degradación de rigidez entre la ocurrencia de ciclos sucesivos, lo que implica que la rigidez de los tramos lineales considerados no varía. Uno de los aspectos mas importantes respecto a la forma en la cual se plantea el modelo, surge al considerar el origen discreto de los datos a utilizar, ya que a diferencia de un problema con valores continuos, esta situación impide trabajar de forma exacta con los datos para obtener las condiciones de transición entre los tramos, siendo necesario definir tolerancias para aproximar los valores numéricos en los cuales se realice el cambio entre ramas de la curva de histéresis.

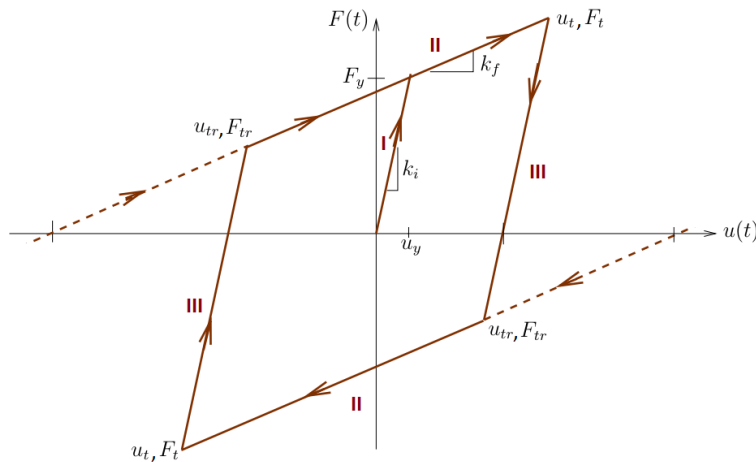


Figura 17: Modelo Bilineal por tramos (Ref: Random Processes, Correlation, and Power Spectral Density CEE 541. Structural Dynamics Department of Civil and Environmental Engineering Duke University Henri P. Gavin Fall 2014)

La aproximación de la curva en forma numérica utilizando valores de datos discretos, será altamente dependiente de factores tales como el método de integración y el paso de tiempo Δt empleado. Este último, en el caso de ser constante puede conducir a errores no despreciables en la definición de la curva de histéresis, por lo que es necesario aproximar de forma precisa los puntos en los cuales se produce la transición entre ramas lineales. Esto se realiza mediante un

proceso iterativo en el cual se hace variar el paso de tiempo dentro del intervalo $[t_i, t_{i+1}]$ hasta aproximar un valor aceptable bajo una cierta tolerancia predefinida, respecto a la condición a cumplir (por ejemplo, un valor en que $|\dot{u}(t)| \leq 10^{-4}$ para la transición II-III).

- **Definición en software SAP2000**

El modelo bilineal en el programa SAP2000 (Figura 18) se define mediante la propiedad 'MultiLinear Plastic', el que consiste en una representación uniaxial sin interacción entre direcciones ortogonales, siguiendo las mismas expresiones presentadas en el planteamiento general, el cual presenta una transición abrupta entre la rama que define el comportamiento lineal elástico y el de post fluencia. Los parámetros que definen la forma histerética consisten en la rigidez elástica k_i , la fuerza de fluencia F_y y la razón de rigideces post fluencia-inicial α . Estos se relacionan mediante las siguientes expresiones,

$$F_y = k_i \cdot u_y \quad \alpha = \frac{k_f}{k_i}$$

donde u_y es el desplazamiento de fluencia y k_f es la rigidez post-fluencia, con $k_f < k_i$ (i.e $0 \leq \alpha \leq 1$). El modelo bilineal por tramos resulta equivalente en su forma de histéresis a un modelo de Bouc-Wen con un valor de n elevado (aproximadamente $n \geq 10$). Sin embargo este puede presentar errores en el caso en que factores como el paso de tiempo Δt de la muestra de datos, influya de forma negativa en la estimación de puntos de transición, mientras que en el caso del modelo de Bouc-Wen, la relación se encuentra definida por una expresión continua generando que el cálculo de la respuesta sea mas robusto.

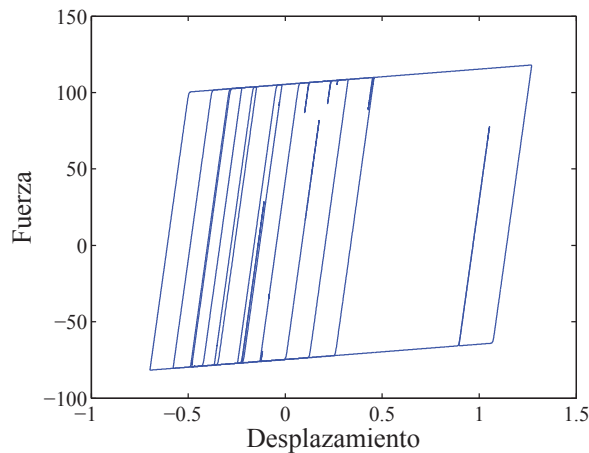


Figura 18: Modelo Bilineal por tramos en SAP2000

2.3.3. MODELO DE HISTÉRESIS BIAxIAL (ACOPLADO)

- **Planteamiento General**

El modelo de histéresis biaxial, propuesto por Wen (1976), Park, Wen y Ang (1986) y recomendado por Nagarajaiah, Reinhorn y Constantinou (1991) para el análisis de aislación sísmica, busca incorporar la interacción de las respuestas en las direcciones horizontales, manteniendo un comportamiento lineal en la dirección vertical del mismo [12].

Las relaciones que definen las fuerzas restitutivas del modelo en las direcciones U2 y U3, $f_{u2}(t)$ y $f_{u3}(t)$, consisten en las siguientes

$$f_2(t) = \alpha_2 k_{i2} u_2(t) + (1 - \alpha_2) F_{y2} z_2(t)$$

$$f_3(t) = \alpha_3 k_{i3} u_3(t) + (1 - \alpha_3) F_{y3} z_3(t)$$

donde k_{i2} y k_{i3} son las rigideces iniciales de las curvas histeréticas, F_{y2} y F_{y3} los esfuerzos de fluencia, α_2 y α_3 las razones de rigideces, mientras que $z_2(t)$ y $z_3(t)$ corresponden a los desplazamientos histeréticos, los cuales se encuentran limitados acorde a la restricción

$$\sqrt{z_2^2(t) + z_3^2(t)} \leq 1 \quad \forall t$$

y son definidos, a partir de condiciones iniciales nulas, mediante las ecuaciones diferenciales dadas por,

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_2(t) \\ \dot{z}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - a_2 z_2^2(t) & -a_3 z_2(t) z_3(t) \\ -a_2 z_2(t) z_3(t) & 1 - a_3 z_3^2(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{k_2}{F_{y2}} \dot{u}_2(t) \\ \frac{k_3}{F_{y3}} \dot{u}_3(t) \end{bmatrix}$$

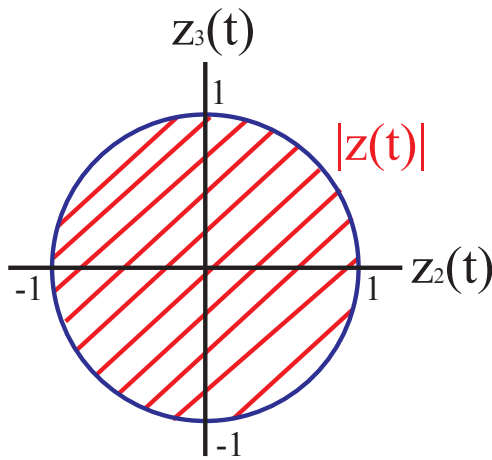
donde a_2 y a_3 se obtienen a partir de las expresiones

$$a_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } \dot{u}_2(t) \cdot \dot{z}_2(t) > 0 \\ 0 & \sim \end{cases} \quad a_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } \dot{u}_3(t) \cdot \dot{z}_3(t) > 0 \\ 0 & \sim \end{cases}$$

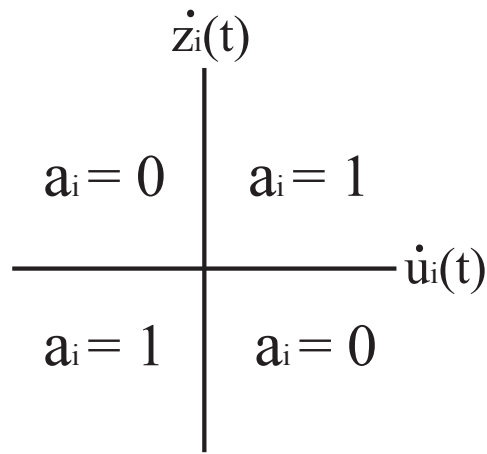
- **Definición en software SAP2000**

En el software SAP2000, este modelo de histéresis (Figura 19) se encuentra definido mediante la propiedad “Rubber”, la cual se utiliza definiendo los parámetros dados por la rigidez inicial, esfuerzo de fluencia y razón de rigideces para cada dirección horizontal de un elemento Link.

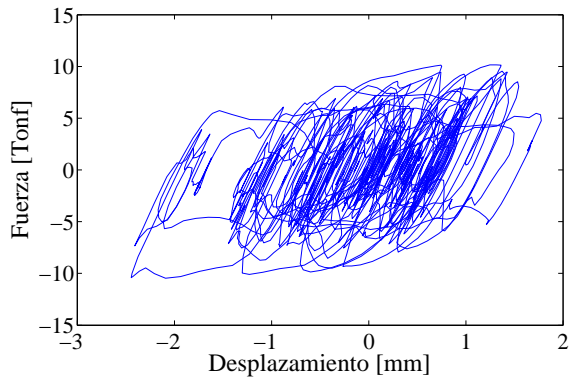
Las expresiones en las cuales se basa este modelo son análogas a las definidas por Park, Wen and Ang (1986) con parámetros $A = 1$ y $\beta = \gamma = 0.5$. Por otra parte, si solo uno de los grados de libertad horizontal (U2 o U3) es definido con comportamiento no lineal, este modelo resulta equivalente a un modelo de Bouc-Wen uniaxial con las propiedades definidas para ese grado de libertad y con un exponente igual a 2 [12].



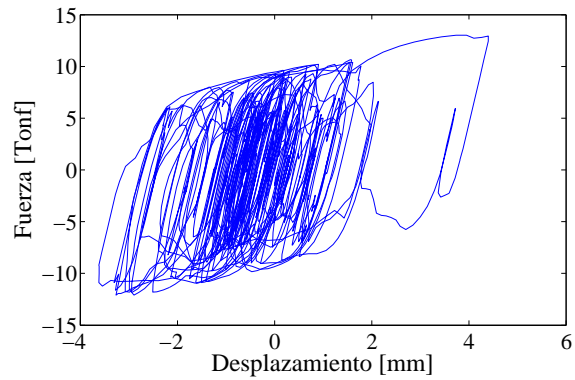
(a) Restricción de desplazamientos histeréticos



(b) Definición de parámetros a_1 y a_2



(c) Histéresis biaxial GDL U2



(d) Histéresis biaxial GDL U3

Figura 19: Características de Modelo de Histéresis Biaxial

2.4. ESTRUCTURA AISLADA EN ESTUDIO

La estructura considerada para el presente estudio consiste en un edificio aislado (Fig. 20) que forma parte del conjunto habitacional Andalucía, ubicado entre las calles Pedro Lagos, Lord Cochrane y Roberto Espinoza, localizadas en la comuna de Santiago.

2.4.1 CARACTERÍSTICAS EDIFICIO

El edificio consta de un primer piso conformado por muros de hormigón armado, y los restantes de albañilería confinada. Posee 4 pisos dúplex, a dos de los cuales se accede por el primer piso, y a los otros dos por el tercer piso, a través de una escalera común.

Cada nivel del edificio corresponde a una planta de 6 x 10 m y una distribución de muros parcialmente simétrica con respecto a sus ejes principales, incluyendo muros perimetrales y un muro transversal que divide los departamentos. Las losas son de hormigón armado, tienen espesor de 10 cm y presentan una abertura en el primer y tercer piso de $3.36 m^2$ que permite el acceso a los pisos superiores.

Los muros del primer piso descansan a través de un sistema de vigas perimetrales en ocho aisladores sísmicos, ubicándose cuatro de estos en el centro del lado mayor, y otros cuatro en las esquinas de la losa a la cual se conectan los aisladores (Fig. 26). Las Figuras 21 - 25 muestran la configuración en planta y elevación de los ejes correspondientes al edificio aislado.



Figura 20: Edificio Aislado Comunidad Andalucía

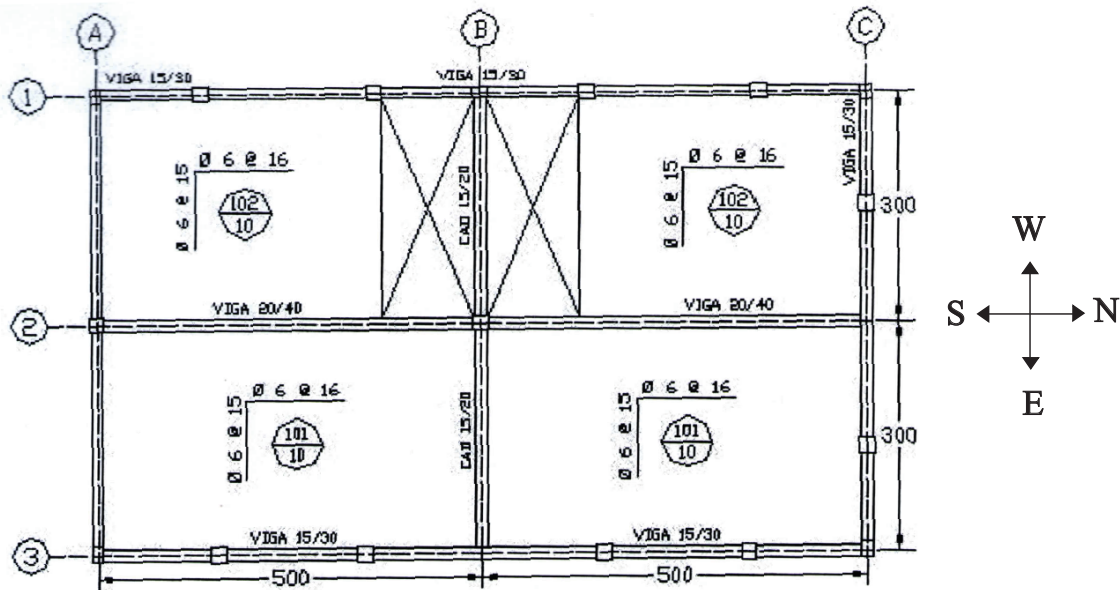


Figura 21: Planta de Cielo Piso Tipo

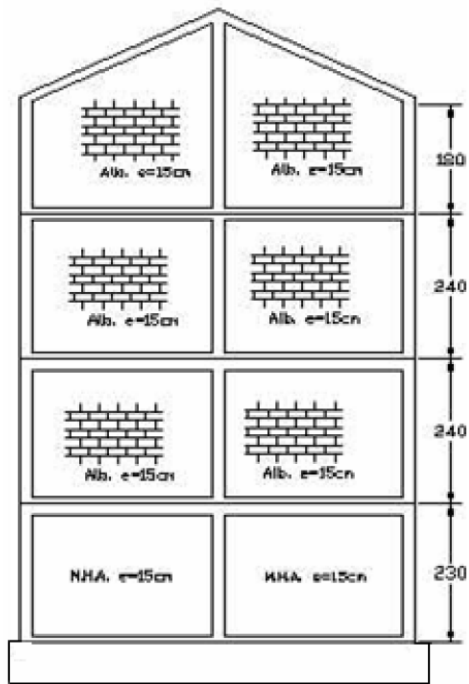


Figura 22: Eje A y B, Vista desde Sur a Norte

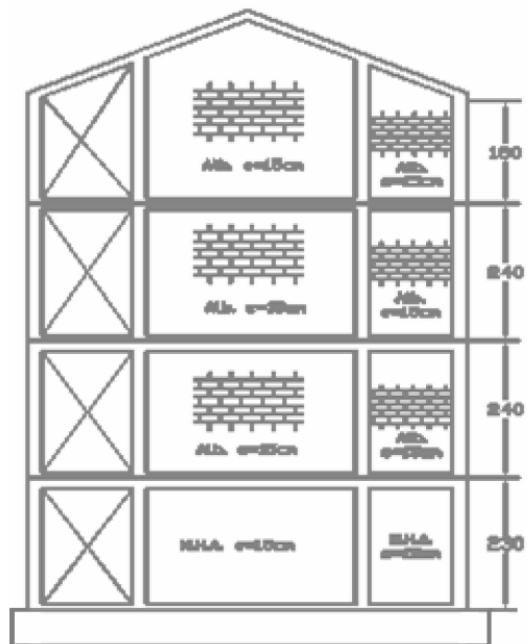


Figura 23: Eje C, Vista desde Sur a Norte

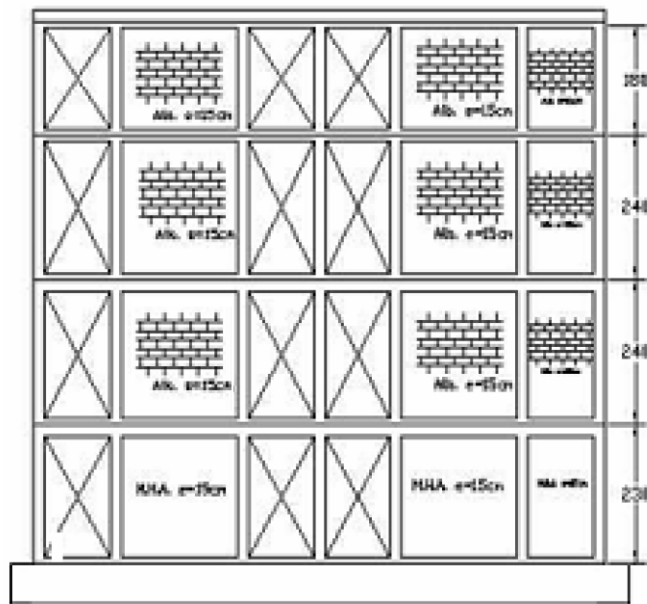


Figura 24: Eje 1, Vista desde Este a Oeste

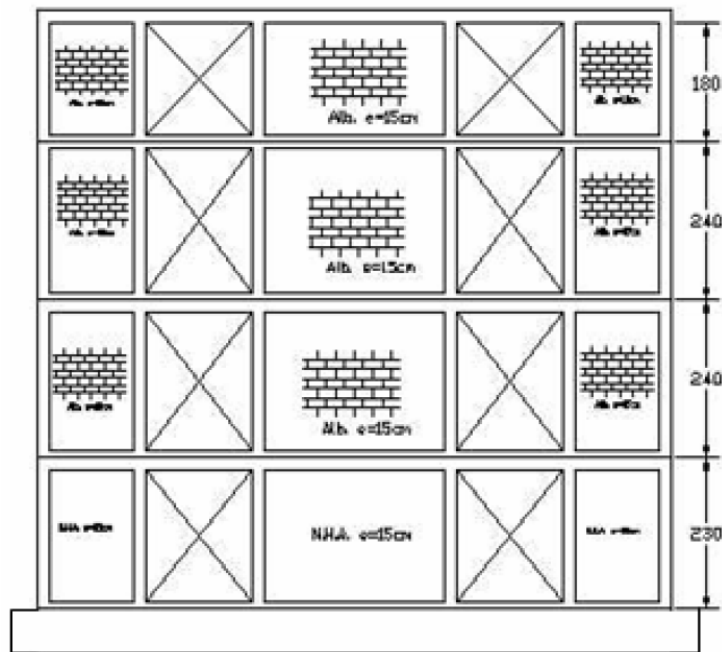


Figura 25: Eje 3, Vista desde Este a Oeste

2.4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS AISLADORES

El edificio se encuentra montado sobre 8 aisladores de goma laminada de alto amortiguamiento (Fig. 26), las que fueron diseñadas para una capacidad máxima de carga vertical de 35 ton y una capacidad de deformación lateral de 20 cm. El módulo de elasticidad al corte del elastómero es de 6.5 kg/cm^2 y posee una razón de amortiguamiento de aproximadamente 10% cuando la deformación alcanza al 50 %, propiedades conferidas por el uso de goma natural con negro de humo y otros componentes [31]

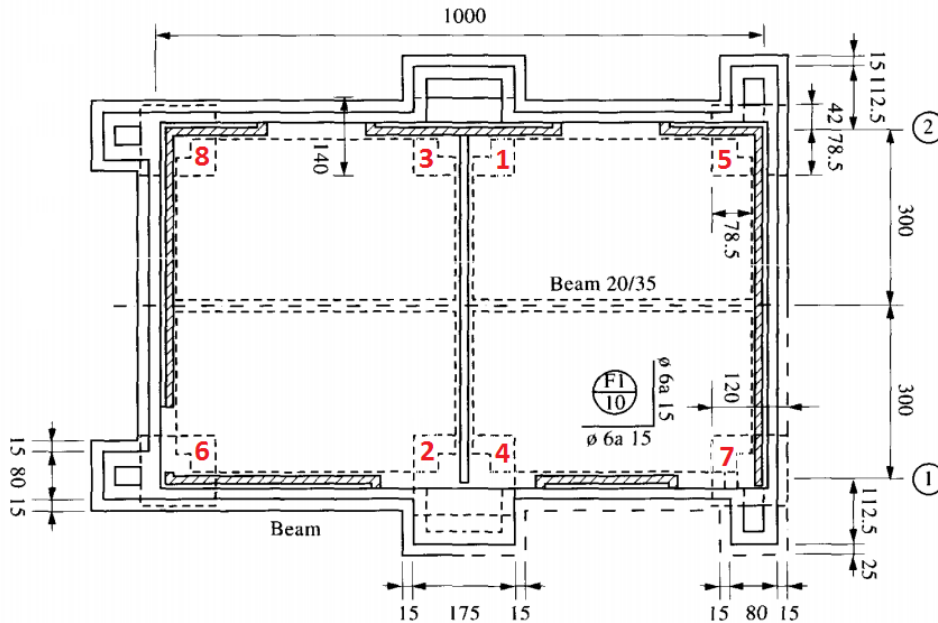


Figura 26: Ubicación de aisladores

Los valores de la rigidez vertical para cada aislador, en 2 ensayos a cargas de 17.5 y 35 ton se muestran en la Tabla 1. Estos muestran un nivel de variación muy pequeño entre cada ensayo, lo que da cuenta de forma preliminar de un comportamiento predominantemente lineal en esta dirección, ante distintos niveles de carga.

Por otra parte, en la Figura 27 se observa que con el aumento de carga vertical, los aisladores presentan un mayor amortiguamiento ante cargas dinámicas laterales. Mientras que la rigidez horizontal resulta fuertemente dependiente del nivel de deformación lateral al que se somete el aislador, presentando una disminución gradual en la medida en que la deformación aumenta (Fig. 28). Un análisis mas detallado de los ensayos se encuentra en [3].

Tabla 1: Rigideces Verticales con $F_v = 35$ ton (K100) y $F_v = 17.5$ ton (K50)

Rigideces Aisladores		
Aislador N°	K50 [ton/cm]	K100 [ton/cm]
1	345.8	342.4
2	321.1	323.3
3	287.8	284.1
4	281.8	296.7
5	305.5	314.1
6	284.2	297.6
7	295.9	276.4
8	300.7	287.2

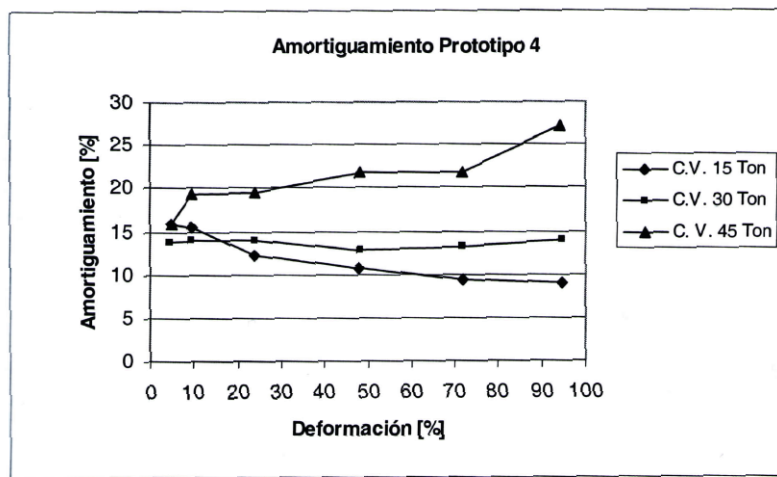


Figura 27: Amortiguamiento Horizontal de aisladores prototipo

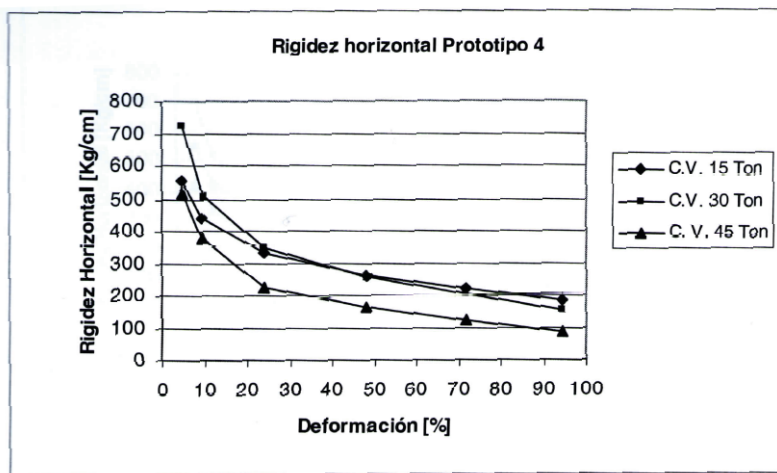


Figura 28: Rigideces Horizontales de aisladores prototipo

Algunos valores de referencia para las propiedades correspondientes a los prototipos de los aisladores, obtenidas mediante ensayos y desarrollo de modelos analíticos, se presentaron en estudios desarrollados por Aguilera[1] y Riveros [30]. La Tabla 2 muestra los parámetros horizontales del aislador, calibrados a partir de los resultados obtenidos de forma experimental por medio de ensayos estáticos y dinámicos, permitiendo definir valores para la rigidez elástica, rigidez post-fluencia y el esfuerzo de fluencia a partir del que los aisladores incursionan en el rango plástico.

Tabla 2: Parámetros horizontales de los aisladores (Ref. [30])

Ensayo	Tipo	Rigidez inicial [T/m]	Razón de rigideces	Esfuerzo de Fluencia [Ton]
1	Dinámico	33	0.455	2.18
2	Estático	235	0.082	0.702
3	Estático	66	0.158	1.11
4	Dinámico	40.85	0.419	1.5

También se obtuvieron dichos parámetros, considerando el método propuesto por Niam y Kelly utilizando los datos de un ensayos realizados en Berkeley, obteniendo los parámetros de la Tabla 3

Tabla 3: Parámetros horizontales de los aisladores (Ref. [30])

Ensayo	Rigidez inicial [T/m]	Razón de rigideces	Esfuerzo de Fluencia [Ton]
5	180	0.126	0.828

Por otra parte, en el estudio llevado a cabo por Aguilera se obtuvieron valores para los parámetros tanto verticales como horizontales de los aisladores, a partir del ajuste de la respuesta (minimizando el error porcentual de las aceleraciones máximas y mínimas) y del espectro de frecuencias de las respuestas, mediante dos tipos de modelos analíticos del edificio aislado: uno con comportamiento elástico-lineal y otro con representación bilineal de los aisladores, considerando excitaciones de origen ambiental (microvibraciones) y sísmico (evento del 24 de Marzo de 1997).

El primer caso garantiza la obtención de propiedades dinámicas asociadas a la estructura en su rango elástico al presentar deformaciones muy pequeñas en la interfaz de aislación, quedando reflejado dicho comportamiento en una frecuencia fundamental horizontal cercana a los 5.43 Hz (tomando como referencia frecuencias obtenidas mediante técnicas no paramétricas como FFT y espectrograma). Por otra parte, el evento sísmico utilizando en dicho estudio, generó una frecuencia fundamental de la estructura cercana a los 2 Hz en la fase

fuerte de la excitación, lo que da cuenta de un comportamiento no lineal en el cual la rigidez de los aisladores sufre una disminución aparente.

Los valores que mejor ajustan las propiedades modales, dadas por las frecuencias de la estructura, para los casos anteriormente mencionados se muestran en la Tabla 4

Tabla 4: Parámetros horizontales de los aisladores (Ref. [1])

Tipo de Excitación	Rigidez Horizontal [T/m]	Esfuerzo de Fluencia [Ton]	Rigidez Vertical [T/m]
Microvibraciones	12500	-	3600000
Sísmica	440	0.2	50000

Cabe notar que la rigidez horizontal obtenida para microvibraciones resulta ser mucho mas alta en comparación a las obtenidas en los ensayos experimentales realizados a los aisladores, resultando entre 80 a 160 veces mayores que la rigidez obtenida para una deformación del 5 % del aislador, lo que da cuenta del comportamiento no lineal de la goma incluso para niveles de deformación muy pequeños [1].

La misma tendencia se observa para la rigidez vertical estimada en casos, donde se observa una diferencia notoria entre el caso de microvibraciones y sísmico. Esto se explica principalmente por el nivel de excitación al que se encuentra sometido la estructura, puesto que dichos valores de rigideces conducen a un comportamiento lineal en esta dirección. Para el caso sísmico, el valor obtenido resulta ser un tanto mayor al estimado por Rojas [31] con $K_v = 30280$ [T/m], buscando ajustar un valor para la rigidez vertical de los aisladores de 14.83 Hz.

Finalmente el esfuerzo de fluencia se obtiene utilizando el mismo criterio, donde considerando un rango de valores de F_y entre 0.08 - 0.275 Ton, se encuentra que el mejor ajuste en las respuestas sísmicas, en particular en la zona de fase fuerte de la excitación, mediante del modelo realizado se obtiene con un valor de 0.2 Ton.

2.4.3 INSTRUMENTACIÓN DE EDIFICIO AISLADO

Los registros de aceleración correspondientes a distintos eventos sísmicos utilizados en el presente estudio, se obtienen mediante una red de acelerógrafos consistente en 3 equipos Solid State Acelerograph (SSA-2), ubicados a nivel de fundación (F), primer piso (L) y cuarto piso (C) del edificio aislado (Fig. 29).

El SSA-2 es un acelerógrafo digital de movimiento triaxial, es decir, que posee tres sensores orientados de manera ortogonal, permitiendo registrar movimientos traslacionales en dirección longitudinal, vertical y transversal. Cuando uno de estos sensores detecta un nivel de aceleración que excede un umbral predefinido, denominado nivel de disparo, los datos comienzan a ser registrados en su memoria. El almacenamiento se realiza en un chip (CMOS Solid State) de 1024 Kbytes de memoria (expandible a 2048 Kbytes).

El tiempo de registro estándar es aproximadamente de 10 minutos por canal (80 minutos con memoria expandida). La frecuencia de muestreo, es ajustada por el usuario, fijando un valor para este estudio de $F_s = 200$ Hz. El equipo puede registrar aceleraciones de hasta $1g$. Su frecuencia natural nominal es de 50 Hz y su amortiguamiento alcanza un 70 % del crítico. Para acceder a la información registrada se requiere de un computador compatible que se conecta directamente al acelerógrafo. La Figura 30 y la Tabla 5 detallan la orientación en la cual se realiza el registro, para cada uno de los equipos disponibles.

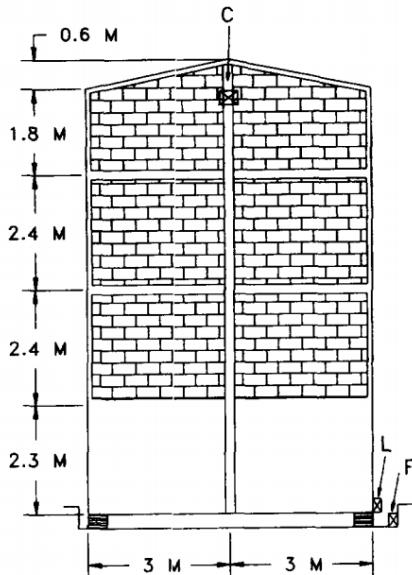
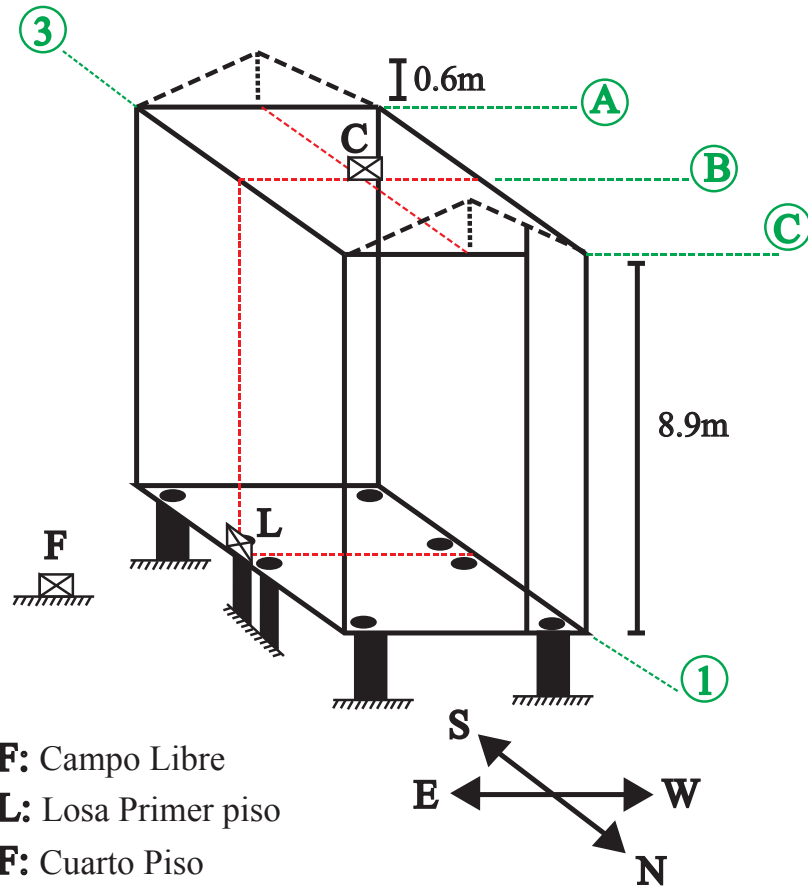


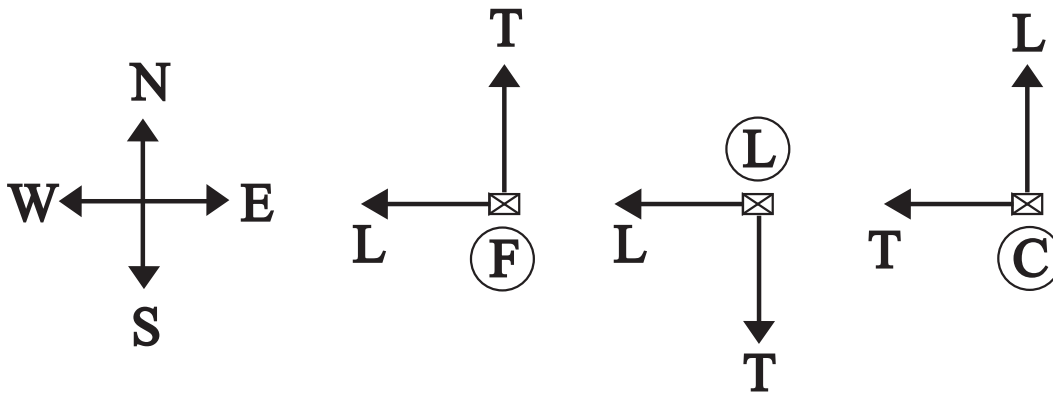
Figura 29: Ubicación de acelerógrafos (Vista en elevación de eje central (Eje B), Vista desde Sur a Norte)

Tabla 5: Orientación de sensores para toma de registros

Orientación	F	L	C
Longitudinal	E-O(-)	E-O(-)	N-S(+)
Vertical	Z(+)	Z(+)	Z(+)
Transversal	N-S(+)	N-S(-)	E-O(-)
F: Equipo en Fundación			
L: Equipo en Primer Piso			
C: Equipo en Cuarto Piso			



(a) Esquema de edificio aislado y acelerógrafos



(b) Orientación de sensores en medición de registros iniciales (V1) L: Longitudinal - T: Transversal

Figura 30: Esquema de edificio aislado y orientación de canales de medición de registros v1

2.4.4 IDENTIFICACIONES ANTERIORES REALIZADAS AL EDIFICIO AISLADO

Los estudios realizados en los edificios del conjunto habitacional Comunidad Andalucía, han puesto énfasis en el modelamiento, reproducción de la respuesta, estimación de capacidad [2] y efectos de vibraciones sobre la respuesta de la estructura [1] .

En estos casos, se han utilizado procedimientos para la identificación de la frecuencia fundamental del edificio convencional, permitiendo el desarrollo de modelos lineales equivalentes representativos de la estructura [5], con el fin de reproducir su respuesta de aceleración y efectuar comparaciones con la registrada.

También se han llevado a cabo análisis de los registros sísmicos horizontales [30] y verticales [31] del edificio aislado, haciendo uso de las técnicas de identificación no paramétrica PSD y espectrograma. Con estos se ha observado un cambio para las frecuencias del primer modo horizontal, ante excitaciones de distinta amplitud, mientras que en la dirección vertical se ha detectado un comportamiento predominantemente lineal, manteniéndose los valores de las frecuencias identificadas alrededor de 15 Hz.

Las siguientes tablas muestran los valores identificados, en los estudios mencionados, para las frecuencias del edificio aislado de la Comunidad Andalucía, utilizando microvibraciones (Tabla 6) y registros sísmicos (Tabla 7).

Tabla 6: Frecuencias identificadas con microvibraciones

Valor identificado para el 1er modo		
Dirección	Períodos [seg]	Frecuencias [Hz]
Longitudinal	0.175	5.71
Transversal	0.154	6.50
Torsional	0.117	8.57
Vertical	0.065 - 0.068	14.75 - 15.3

Tabla 7: Frecuencias identificadas con evento sísmico 22-02-1996

Dirección Longitudinal (N-S) y Transversal (E-O)		
Modo	Períodos [seg]	Frecuencias [Hz]
1	0.5	2
2	0.1-0.125	8-10
3*	0.066-0.071	14-15

*: En los espectros presentados se observa un modo de menor amplitud alrededor de 15 Hz, que se considera como un posible modo rocking con componentes horizontal y vertical según [31]

La Figura 31 muestran algunos de los espectros obtenidos en los estudios llevados a cabo por Aguilera [1] mediante las técnicas no paramétricas PSD y espectrograma, para la identificación de las frecuencias predominantes utilizando la señales de aceleración medidas en el edificio aislado de la Comunidad Andalucía.

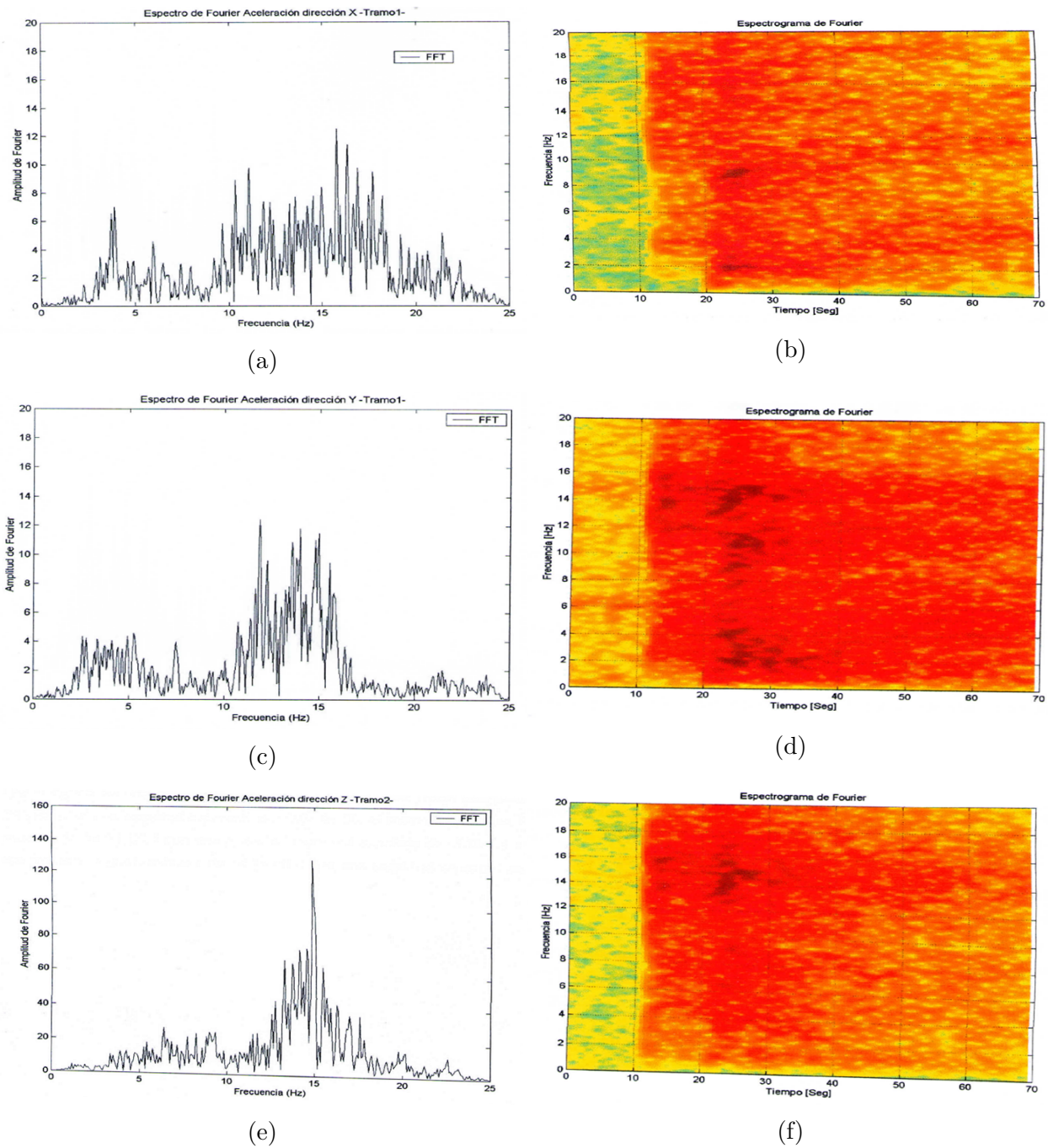


Figura 31: Identificación mediante espectros de frecuencias y espectrogramas en edificio aislado Comunidad Andalucía

2.5 COMENTARIOS DEL CAPÍTULO

El capítulo II se enfocó en presentar el marco teórico necesario para el desarrollo del estudio, describiendo los algoritmos de identificación, los modelos de histéresis y las características del edificio aislado a identificar en los capítulos posteriores.

En el grupo de métodos de identificación, se incluyen algoritmos no paramétricos como FFT y PSD, y otros paramétricos como MOESP-MV y RPEM- λ , los cuales identifican **propiedades modales** de la estructura, incluyendo: frecuencias, amortiguamientos y formas modales. Por otra parte, el algoritmo de Filtro de Partículas con Evolución Artificial de Parámetros (PF), realiza una identificación basada en un modelo analítico propuesto para el sistema, efectuando la estimación de **parámetros estructurales** asociados a dicho modelo.

Por otra parte, los modelos analíticos encargados de representar el comportamiento no lineal que los aisladores le confieren a la estructura, consisten en curvas de histéresis, entre las cuales se incluyen para el desarrollo de este estudio los modelos **de Bouc-Wen** y **bilineal**. Ambos dependen de los parámetros estructurales dados por: rigidez inicial k_i , razón de rigideces α , esfuerzo de fluencia F_y y exponente de transición n (solo en el caso de Bouc-Wen), los que se busca estimar mediante PF, y definen la curva de carga y descarga representando el comportamiento de la subestructura ante excitaciones de distinta amplitud.

También se presentaron las características del edificio aislado existente ubicado en Comunidad Andalucía, el que se procede a identificar en el Capítulo V, haciendo hincapié en la configuración geométrica y los elementos estructurales que la componen. Las propiedades dinámicas de la estructura obtenidas a partir de identificaciones y ensayos anteriores fueron detalladas, con el objetivo de contar con valores de referencia para efectuar una comparación posterior con los resultados obtenidos a partir de los métodos de identificación a aplicar en el presente estudio.

A partir de los antecedentes anteriores, se busca identificar las propiedades dinámicas (modales y estructurales) en modelos analíticos sometidos a excitación sísmica, con el objetivo de estudiar el desempeño de las técnicas de identificación en estudio, sujeto a distintos factores tales como el nivel de ruido presente en la observación, amplitud de excitación y nivel de observabilidad del sistema. Posteriormente se identifican las propiedades del edificio aislado de la Comunidad Adanlucía, con el fin de validar los resultados obtenidos en forma analítica y efectuar comparaciones con los valores obtenidos en identificaciones anteriores en la estructura.

CAPITULO III
PRESENTACIÓN DE BASE DE DATOS

CAPITULO III. PRESENTACIÓN DE BASE DE DATOS

3.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo muestra los elementos que componen la base de datos utilizada para el desarrollo del estudio, construida en base a las características de los registros de aceleración del edificio aislado ubicado en el conjunto habitacional Comunidad Andalucía, para eventos sísmicos comprendidos en el período 1993 - 2014.

En el desarrollo del capítulo se presenta la corrección y filtrado de los registros iniciales, necesarios para su uso posterior en procedimientos que requieren la integración de los mismos. A la vez, se muestra la metadata correspondiente a los eventos sísmicos, la que permite caracterizarlos en función de un set de parámetros, entre los cuales se incluyen: magnitud, intensidad, localización de sensores en el edificio y fecha de evento, entre otros.

Luego, se presentan parámetros procesados a partir de los registros disponibles, los que incluyen indicadores de la fuerza del movimiento sísmico y contenido en frecuencia de los registros, encontrándose entre estos: intensidad de Arias, aceleración máxima de suelo (PGA), frecuencia central y desplazamiento máximo en la interfaz de aislación.

El capítulo finaliza analizando las relaciones y distribuciones asociadas a los parámetros presentados, los que permiten caracterizar de forma general el conjunto de registros, con el objetivo de clasificar los eventos sísmicos para su posterior incorporación en los estudios de los procedimientos de identificación abordado en el Capítulo V.

3.2. REGISTROS SÍSMICOS EN ESTRUCTURA AISLADA

El set de datos considerado en el estudio, consiste en un grupo de 696 registros de aceleración, obtenidos en el edificio aislado ubicado en el conjunto habitacional Comunidad Andalucía, correspondientes a un total de 89 eventos sísmicos ocurridos en el período 1993 - 2014. Estos presentan un rango de magnitudes M_w de 4.1 a 8.8, intensidades de Mercalli en el intervalo I - VIII y distancias a la ruptura comprendidas entre los 10 y 400 Km aproximadamente.

3.2.1 REGISTROS v1 (No corregidos)

Los datos de los registros de aceleración iniciales se manejan en formato ASCII y se convierten a unidades de $[m/s^2]$, obteniéndose los archivos v1.mat. Estos son designados como UYYMMDDNv1.mat, indicando la ubicación (U), fecha de ocurrencia (YYMMDD) y número del registro (N) (por ejemplo, F9307153v1.mat - Registro 03 con fecha 15/07/1993 ubicado en la Fundación). Cada uno de estos archivos posee 3 columnas de datos de aceleración, siguiendo el orden de orientación: Longitudinal(L) - Vertical(V) - Transversal(T) . Mientras que la ubicación consiste en los niveles en los cuales se ubican los acelerógrafos asociados al registro respectivo: Fundación (F), Losa del primer piso (L) y el Cuarto piso (C) (Fig. 32).

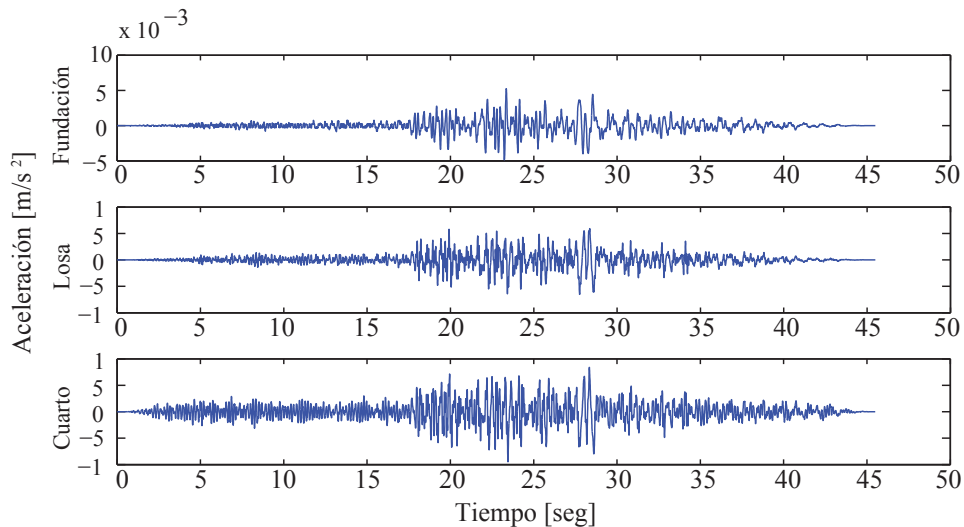


Figura 32: Ejemplo Datos en Registros v1

Dada la orientación que presentan los sensores, acorde a lo detallado en la Figura 30, los archivos v1 son corregidos inicialmente, debiendo multiplicar por -1 el registro transversal

(columna 3) del sensor dispuesto en la losa del primer piso (L), e intercambiar las columnas 1 y 3 del archivo de cuarto piso (C), con el objetivo de normalizar la orientación de los registros acorde a la dada por el sensor ubicado a nivel de la Fundación (F), siguiendo de esta manera las direcciones E-O (columna 1), Vertical (columna 2) y N-S (columna 3).

Estos archivos son posteriormente corregidos mediante los procesos de *filtrado de ruido* y *corrección de línea de base*, con el objetivo de que los registros resulten apropiados para ser utilizados en procedimientos que involucren su integración, como se explica en la siguiente sección.

3.2.2 REGISTROS v2 (Corregidos)

Para el uso apropiado de los registros en procedimientos que involucren su integración numérica (obtención de desplazamientos (Fig. 33a), intensidades instrumentales como la de Arias, etc), se realizan las siguientes correcciones:

Corrección de línea de base o ceros

El error de desviación de línea de base en un registro puede ocurrir debido a que el acelerógrafo no se encuentra perfectamente nivelado. Si bien puede ser imperceptible para los valores de aceleración medidos, este error cobra importancia al llevar a cabo la integración del registro, para la obtención de velocidades y desplazamientos, resultando en la adición de área entre la curva de aceleración y la línea de base. Para esta corrección se aplica el comando *detrend* en Matlab, lo que entrega un registro con media nula, como se muestra en la Figura 33b.

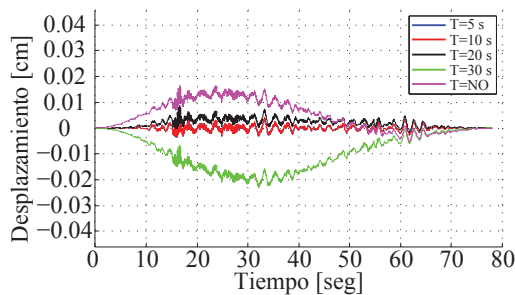
Filtrado de Ruido

El ruido es un fenómeno que afecta de forma inherente a los datos del acelerograma, pudiendo tener un origen en el lugar donde fueron realizadas las mediciones, como también puede asociarse al tratamiento posterior de datos. Un ruido de alta frecuencia modifica principalmente el valor de los peaks del registro, mientras que uno de baja frecuencia presenta mayor impacto en el área bajo la curva del mismo, afectando el proceso de integración en ambos casos.

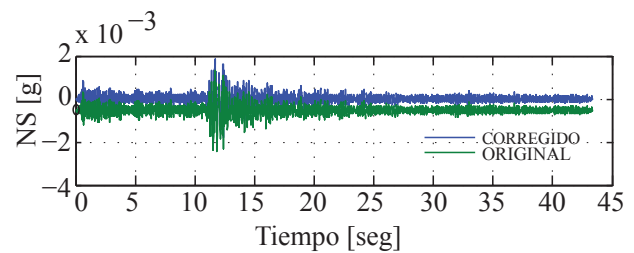
Esta corrección se realiza a partir del Espectro de Fourier del registro en escalas logarítmicas, en el cual se seleccionan las frecuencias de corte basado en los *plateau* que presenta el espectro en sus extremos, los que indican una predominancia de ruido asociado a altas

y bajas frecuencias. En el procesamiento de los registros para este estudio, se seleccionaron frecuencias de corte mínima de 0.25 Hz y máxima de alrededor de 60-70 Hz dependiendo del registro, lo cual se muestra en la Figura 33c.

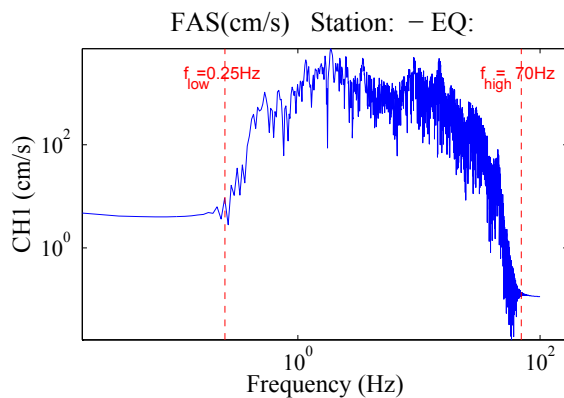
Realizadas estas correcciones utilizando el programa PRS (Procesamiento de Registro Sísmicos de RBA) se obtienen los archivos v2, los cuales tienen el mismo formato y orden de columnas de datos que en el caso de los archivos v1 (ya corregidos por orientación), pero encontrándose estos en unidades de [g]. Las frecuencias de filtrado y tiempos de corte, considerados para los registros corregidos, se incluyen en el Anexo A.



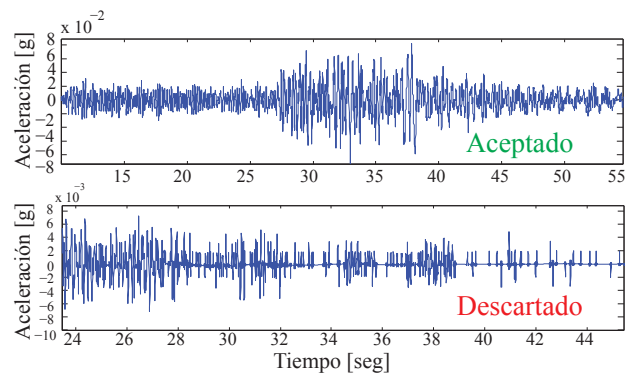
(a) Integración de registros con distinta frecuencia de filtrado



(b) Corrección de línea de base



(c) Filtrado de Registros



(d) Selección y descarte de registros

Figura 33: Características de registros sísmicos incluidos en la base de datos

Cabe notar que de forma previa al proceso de corrección, se descartaron 93 registros de aceleración, correspondientes a 15 eventos sísmicos, debido a la baja resolución que presentan (asociado principalmente a eventos con una excitación muy pequeña), problemas del equipo en la medición o ausencia del registro de fundación, lo cual representa un 11.7 % del total (93 de 789 registros inicialmente). Los registros finales fueron seleccionados por inspección, según la resolución que presentan, acorde a lo mostrado en la Figura 33d

3.3. METADATA DE EVENTOS SÍSMICOS

Con el objetivo de clasificar el set de registros disponibles, correspondientes al edificio aislado de la Comunidad Andalucía, se consideran una serie de características para la construcción de la base de datos de eventos sísmicos durante el periodo 1993 - 2014. Los campos considerados son los siguientes:

- **Fecha de Evento:**

Fecha de ocurrencia del evento sísmico expresada en formato *YYYYMMDD*. También se incluye el año, mes y día en forma independiente.

- **Hora de Evento:**

Hora de ocurrencia del evento sísmico expresada en hora, minuto y segundo en forma independiente.

- **Magnitud:**

Magnitud M_w del evento sísmico registrado.

- **Intensidad:**

Intensidad de Mercalli en la ubicación del edificio (Región Metropolitana). Expresada en números romanos.

- **Ubicación**

Ubicación del registro en el edificio aislado. Este campo considera, Fundación (F), Losa del primer piso (L) y Cuarto Piso (C).

- **Orientación**

Orientación del registro en el edificio aislado. Este campo considera, Longitudinal, Vertical, Transversal.

- **Latitud y Longitud**

Coordenadas geográficas del epicentro del evento sísmico.

- **Profundidad**

Profundidad evento sísmico expresado en Km.

- **Frecuencia de Filtrado**

Frecuencia máxima a la cual se filtraron los registros v1 para obtener registros v2 utilizados en el proceso de identificación. Expresado en Hz.

- **Tiempo inicial y final de registro**

Tiempos del registro v1 considerados para el proceso de corrección para la obtención de registros v2. Expresado en segundos.

Estas características fueron completadas en base a los datos entregados en los informes sísmicos disponibles de la red de cobertura nacional de acelerógrafos, operada por la división Estructuras-Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, RENADIC [14]. La base de datos completa se muestra en el Anexo A.

3.4. PROCESAMIENTO DE REGISTROS: DESCRIPCIÓN DE BASE DE DATOS MEDIANTE INDICADORES Y PARÁMETROS ESTRUCTURALES

La segunda parte de la construcción de la base de datos consiste en la obtención de parámetros procesados a partir de los registros corregidos v2. Con estos, se analizan las tendencias que muestran sus relaciones y distribuciones, de modo de obtener indicadores que permitan caracterizar los eventos sísmicos, para su posterior incorporación en el estudio de los procedimientos de identificación. Entre estos se encuentran:

- **Peak Ground Acceleration (PGA)**

Aceleración máxima obtenida a nivel de Fundación. Se presentan de forma independiente por dirección horizontal (E-O / N-S) y vertical (V).

- **Duración total del registro**

Duración del registro en segundos obtenida como $t_{final} - t_{inicial}$.

- **Tiempos y duración de Arias**

Tiempos en el que se concentra entre el 5% y el 95% de la energía del registro $a(t)$, basado en la Intensidad de Arias (IA). La duración se obtiene de la diferencia entre estos dos tiempos $t_{fIA} - t_{iIA}$. La intensidad de Arias se define como

$$IA = \frac{\pi}{2g} \int_0^t [a(t)]^2 dt$$

- **Tiempos y duración Bracket**

Tiempo inicial y final en los que se supera el umbral de aceleración del registro, definido por 0.01[g] en la dirección horizontal, y 0.005 [g] en la dirección vertical. La duración se obtiene de la diferencia entre estos dos tiempos $t_{fBr} - t_{iBr}$. Las cantidades son expresadas en segundos

- **Aceleración RMS**

Parámetro que incluye los efectos de amplitud y contenido de frecuencia de un registro de movimiento fuerte dado por

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{S} \int_0^S [a(t)]^2 dt} = \sqrt{\lambda_0}$$

- **Frecuencia Central**

Medida de frecuencia Ω donde se concentra el espectro de densidad de potencia PSD, definida por Vanmarcke [35] expresada como

$$\ddot{u}_{max} = \sqrt{2\lambda_0 \log \left(\frac{2.8\Omega S}{2\pi} \right)}$$

donde

λ_0 : Aceleración cuadrada media

S : Periodo

Ω : Frecuencia central, expresada en Hz

Los valores calculados para estos parámetros se muestran en el Anexo B. La siguiente sección muestra relaciones y distribuciones generadas con los parámetros calculados, permitiendo caracterizar los registros considerados en la base de datos.

3.5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE BASE DE DATOS Y RELACIONES

A continuación se muestran relaciones y distribuciones correspondientes a los parámetros procesados a partir de los registros de la base de datos, con el objetivo de clasificar los eventos sísmicos para su uso en los procedimientos de identificación aplicados en el Capítulo V. Los parámetros considerados en el análisis consisten en: Magnitud M_w , Intensidad, Distancia Epicentral, Intensidad de Arias, PGA, Desplazamientos en interfaz de aislación y Frecuencias Centrales.

La Figura 34 muestra la ubicación epicentral de los eventos sísmicos disponibles, los cuales se agrupan desde la región de Coquimbo (IV) hasta la región del Maule (VII), en donde se ubica el epicentro del sismo de mayor magnitud en la base de datos, correspondiente al evento del 27 de Febrero de 2010 de magnitud de momento 8.8 M_w . El 90 % de los epicentros de los eventos registrados tiene lugar entre la V región de Valparaíso y la VI región del Libertador General Bernardo O'Higgins, presentándose distancias epicentrales de entre 10 a 400 Km aproximadamente para la totalidad de los eventos considerados.

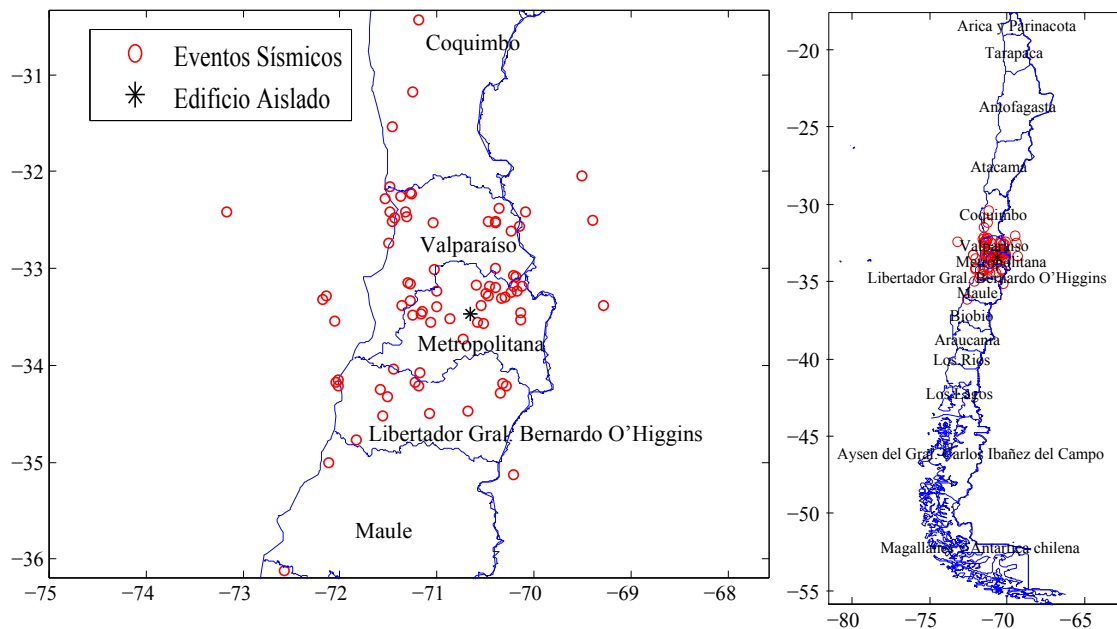
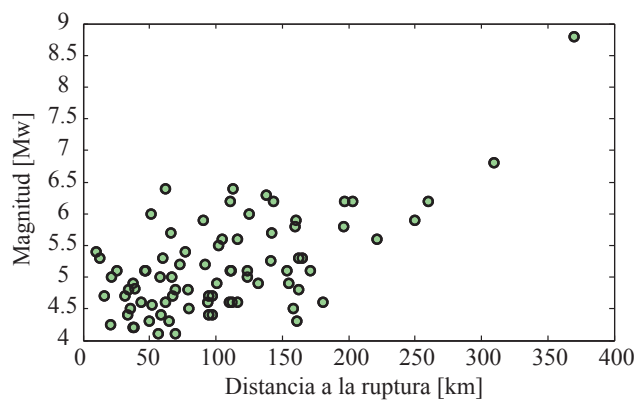


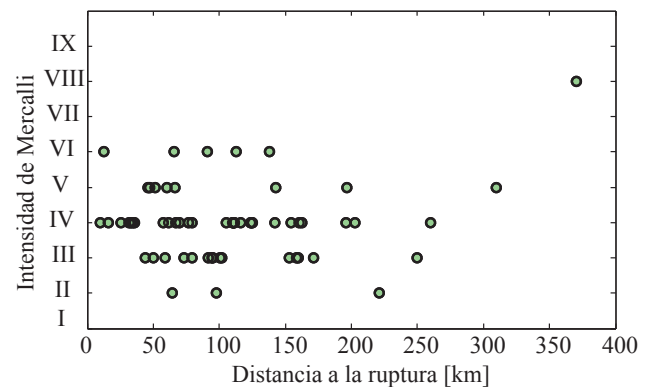
Figura 34: Ubicación de Eventos

Por otra parte, la Figura 35a muestra una relación creciente entre las magnitudes y la distancia a la ruptura, donde solo el 5% de los eventos (4 de 89) presenta una distancia menor a 100 Km con magnitud sobre 6.0 M_w , existiendo una baja cantidad de eventos

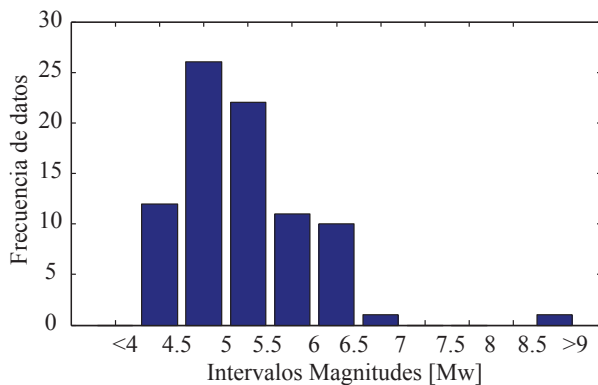
sísmicos de mayor energía en un rango de distancia cercano al edificio en estudio, donde cerca del 50 % de los eventos posee magnitud menor o igual a 5.5 (Figura 35c). La Figura 35b muestra las intensidades de Mercalli (IMM) establecidas para Santiago (ubicación del edificio aislado en estudio) versus la distancia a la ruptura asociadas a los eventos sísmicos. No se puede establecer una relación clara entre estas variables, existiendo disponibilidad de niveles de percepción de daños distribuidos dentro de todo el rango de distancias a la ruptura. Alrededor del 30 % de los eventos corresponde a un sismo de intensidad IV en la escala de Mercalli (Figura 35d)



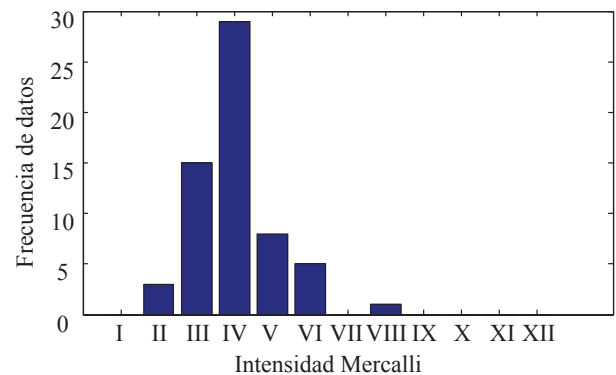
(a) Magnitud vs Distancia Epicentral



(b) Intensidad vs Distancia Epicentral



(c) Histograma de Magnitudes

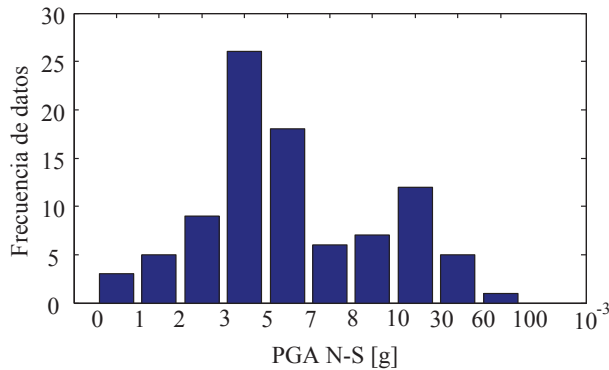


(d) Histograma de Intensidades

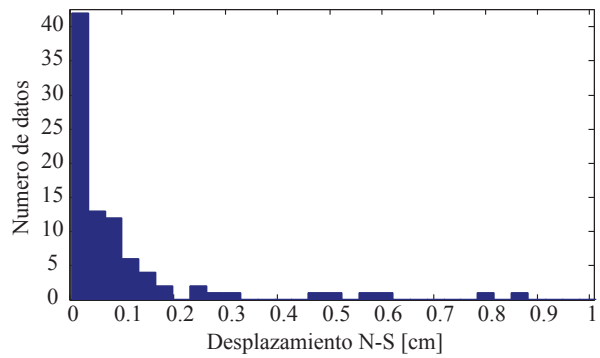
Figura 35: Características de registros sísmicos incluidos en la base de datos

La Figura 36 muestra los histogramas de aceleración máxima de suelo en las direcciones de registro (Este-Oeste, Norte-Sur y Vertical), presentándose para los 3 casos una distribución bimodal de los datos, concentrándose en los intervalos $3-5 \times 10^{-3}g$ y $1-3 \times 10^{-2}g$. Dichos niveles de excitación provocan que los desplazamientos relativos máximos a nivel de interfaz de

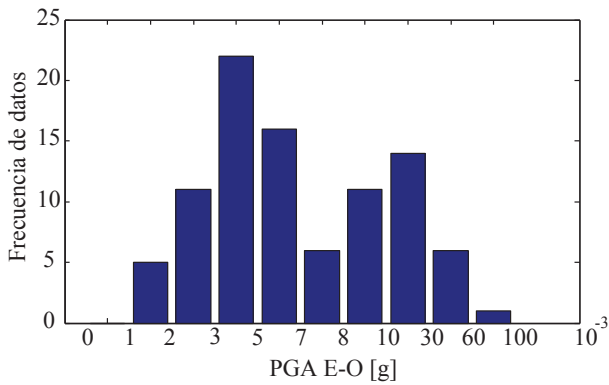
aislación se concentren en un 80 % en valores menores a 0.1 cm para la direcciones horizontales y menores a 0.02 cm en la dirección vertical (Figura 37). En esta última los aisladores se encuentran diseñados para que el comportamiento de la estructura permanezca en un rango predominantemente lineal, presentando un nivel mucho menor de deformaciones a costa de un aumento en el nivel de aceleración en relación al edificio convencional [31].



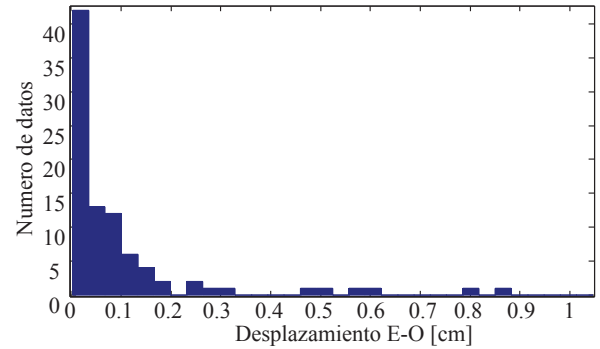
(a) Norte-Sur



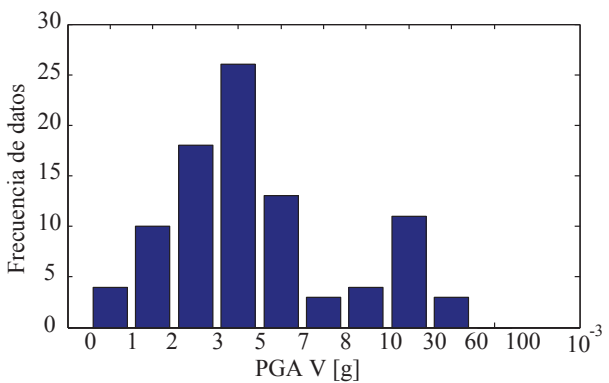
(a) Norte-Sur



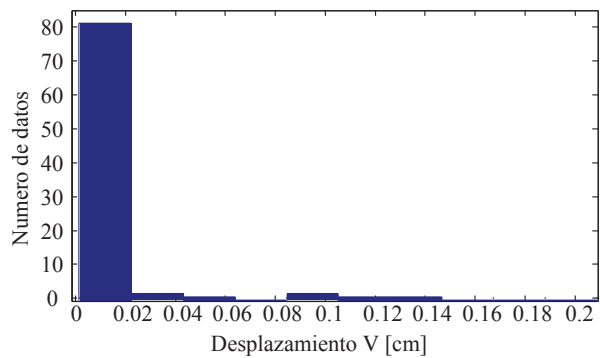
(b) Este-Oeste



(b) Este-Oeste



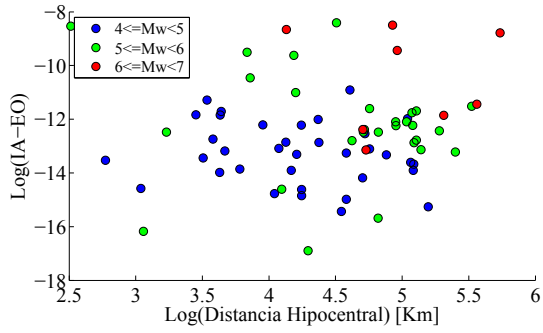
(c) Vertical



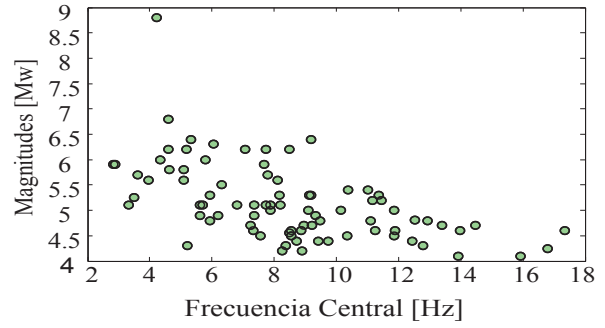
(c) Vertical

Figura 36: Histograma PGA

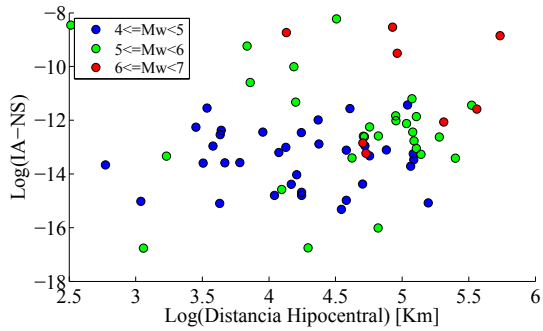
Figura 37: Histograma desplazamiento máximo de aislación



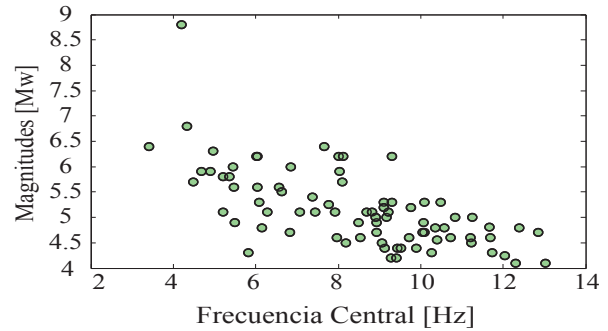
(a) Norte-Sur



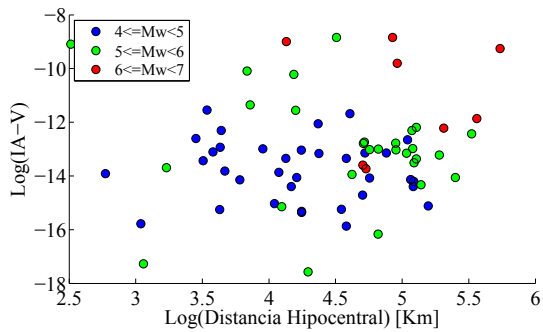
(a) Fundación Este-Oeste



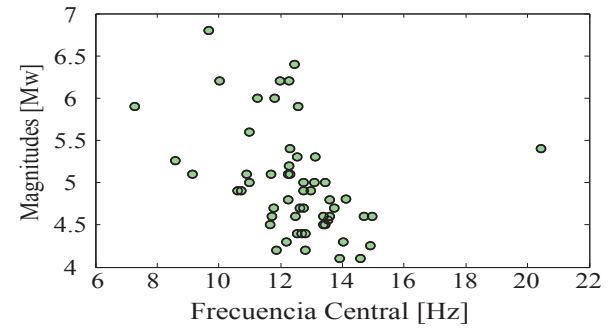
(b) Este-Oeste



(b) Cuarto Piso Norte-Sur



(c) Vertical



(c) Losa Vertical

Figura 39: Magnitud vs Frecuencia Central

Figura 38: Distancia Epicentral vs Intensidad de Arias

Dos de los parámetros que muestran una mayor capacidad para clasificar los eventos sísmicos considerados en el estudio, basados en características asociadas a la energía de los registros, consisten en la Intensidad de Arias y la Frecuencia Central. La Figura 38 muestra los valores de la Intensidad de Arias calculadas en base al intervalo del 5% - 95% de la energía de los registros de aceleración basal aplicada a la estructura, donde es posible diferenciar

rangos con respecto al intervalo de magnitudes considerado y una tendencia decreciente con la distancia epicentral. Por otra parte, la Figura 39 permite observar que en la medida en que el evento sísmico considerado posee una mayor energía, representada por la magnitud, los valores de las frecuencias centrales asociadas a cada registro de aceleración tiende a decrecer, abordando los rangos entre 4 a 12 Hz para la dirección horizontal, y un rango mas acotado para la dirección vertical, donde los valores se concentran en el rango 10 a 15 Hz. Cabe notar que la frecuencia central representa un valor promedio de donde se concentra la energía del espectro de potencia del registro de aceleración utilizado, considerando un rango comprendido en este caso entre el 1 y el 95 % de la energía total, por lo que un espectro de frecuencias multimodal, con modos de energía similar pudiera entregar valores de frecuencias centrales que no constituyan valores de referencia asociado al contenido en frecuencia Figura 40. A pesar de lo anterior, esta medida muestra una buena correlación con la magnitud, medida representativa de la energía liberada por el sismo.

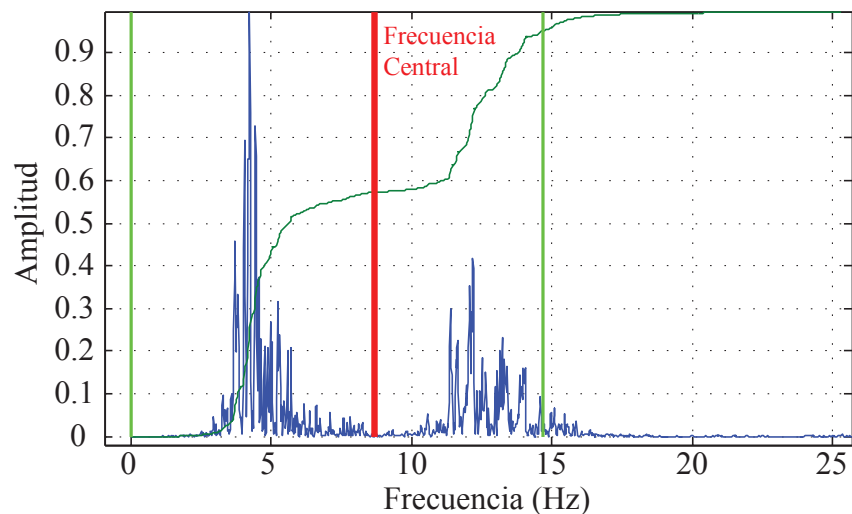
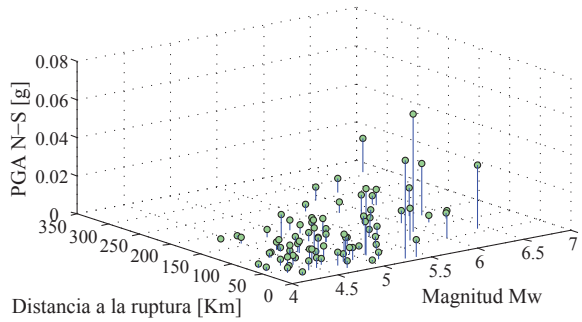


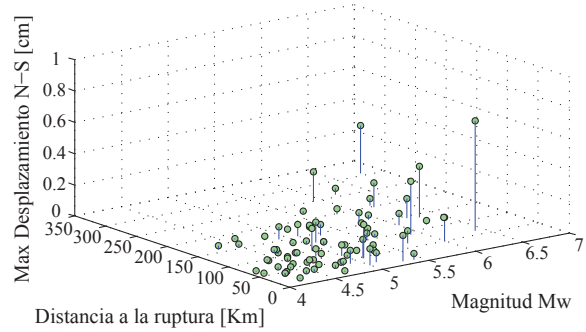
Figura 40: Cálculo de frecuencia central de un registro

Comportamientos similares son observados en las relaciones obtenidas para la aceleración máxima de suelo PGA (Figura 41) y el desplazamiento máximo en la interfaz de aislación (Figura 42) con respecto a la magnitud y la distancia epicentral del evento sísmico, presentando una tendencia al incremento en sus valores con el crecimiento de la magnitud y el decrecimiento de la distancia a la ruptura. Las figuras anteriores muestran los eventos incluidos en la base de datos con excepción del evento sísmico del 27 de Febrero de 2010, el cual supera por al menos 5 veces el valor máximo de estas variables con respecto a los obtenidos para el resto de los eventos sísmicos, mostrando una mayor sensibilidad a la variación de la magnitud en comparación a la distancia a la ruptura, ya que este último evento, aun presentando uno de

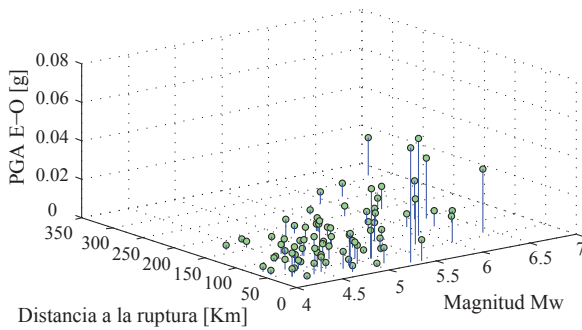
los mayores valores de distancia epicentral hasta la estructura en estudio, exhibe los mayores valores de PGA y desplazamiento de la base de datos.



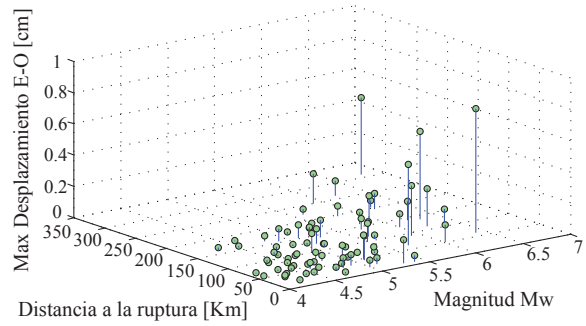
(a) Norte-Sur



(a) Norte-Sur



(b) Este-Oeste



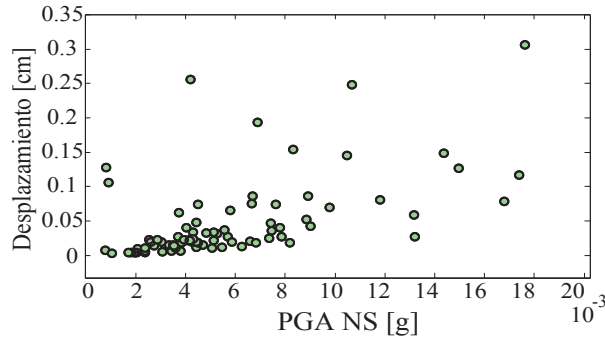
(b) Este-Oeste

Figura 41: Magnitud vs Distancia Epicentral vs PGA

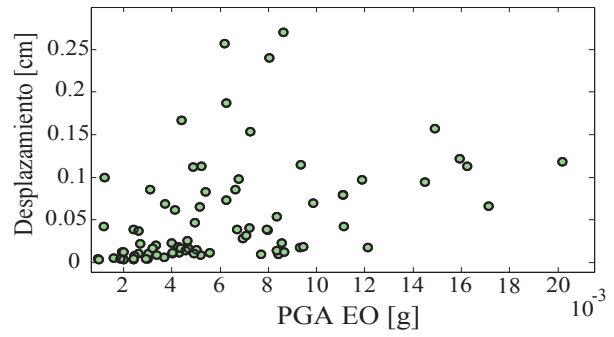
Figura 42: Magnitud vs Distancia Epicentral vs Desplazamiento máximo de aislación

En la Figura 43 se observan las relaciones entre los desplazamientos máximos a nivel de aislación y la aceleración máxima de suelo (PGA) para eventos con excitación menor a 0.02 g. Estas variables solo muestran cierto grado de correlación hasta valores cercanos a 0.008 g en la dirección horizontal, presentando una gran dispersión al superar ese umbral. La dirección vertical exhibe un comportamiento más estable en los valores relacionados, manteniendo el 90 % de los valores menor a 0.01 cm para el rango de valores de PGA seleccionado.

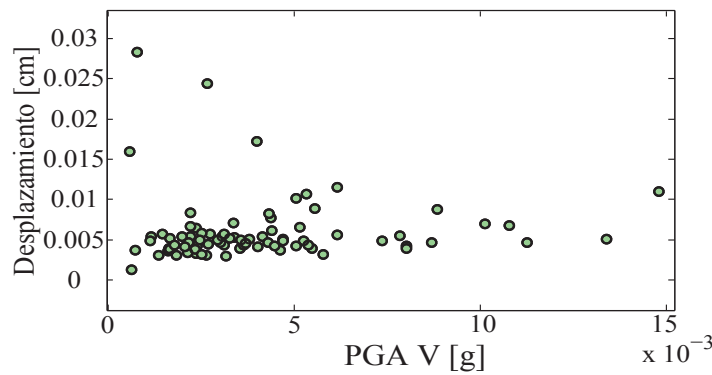
Las tendencias mostradas en las figura anteriores, no permiten establecer una relación directa entre estas dos variables como es usual asumir en estructuras convencionales, lo que puede encontrarse asociado a factores tales como el comportamiento no lineal de los aisladores en los distintos períodos considerados (particularmente debido a efectos de endurecimiento y temperatura en la goma) y los errores intrínsecos en el proceso de integración del desplazamiento, medición y procesamiento de la aceleración.



(a) Norte-Sur



(b) Este-Oeste



(c) Vertical

Figura 43: PGA vs Desplazamiento máximo en interfaz de aislación

Por consiguiente, tanto PGA como el desplazamiento máximo en la aislación deben ser tratados como dos variables no correlacionadas, con miras a caracterizar el comportamiento de la estructura aislada ante distintos niveles de excitación. Esto se confirma al obtener los valores de las frecuencias de los modos de la estructura mediante técnicas de identificación no paramétricas como FFT, utilizando los registros de respuesta de aceleración (Figura 44), los cuales exhiben tendencias con mayor regularidad con los desplazamientos en relación a los obtenidos con la aceleración máxima de suelo.

Con los valores obtenidos, se pueden identificar principalmente 3 modos para las distintas direcciones. En las direcciones horizontales, un primer modo con valores de frecuencia decrecientes con el aumento de desplazamiento es identificado, variando entre un rango de 6 Hz A 0.65 Hz para el evento con mayor excitación en la estructura (27F), el cual presenta un desplazamiento máximo de 10.6 cm. Un segundo modo entre los 10-12 Hz y un tercero comprendido entre los 15-16 Hz también son identificados, presentando una menor variación

con el desplazamiento en comparación al comportamiento mostrado por el primer modo, lo cual es consistente con el efecto esperado de la incorporación del sistema de aislación a la estructura, donde los modos superiores no se ven mayormente afectados. Mientras que en la dirección vertical, se identifica un modo predominante cercano a los 15-16 Hz al igual que en el caso horizontal, mostrando un posible modo "rocking" [1], presentando una respuesta acoplada para ambas direcciones. En algunos casos también se identificaron modos asociados a frecuencias cercanas al rango del primer modo horizontal, comprendido entre 2-6 Hz y un segundo modo cercano a los 8 Hz, lo cual puede representar un grado de acoplamiento en la respuesta entre las direcciones horizontales y vertical en la estructura.

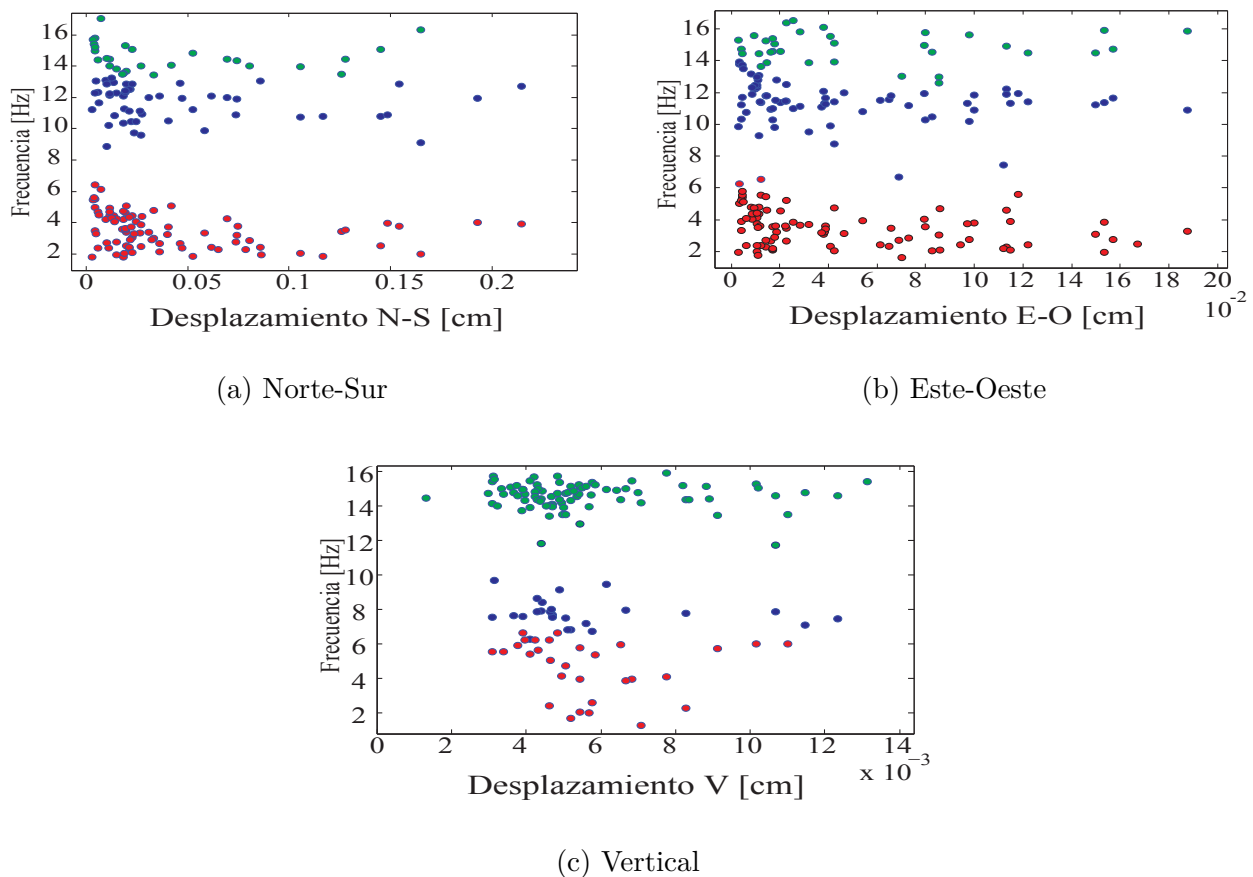


Figura 44: Desplazamiento máximo de aislación vs Frecuencias identificadas de la estructura

Basado en los resultados anteriores, el desplazamiento máximo en la interfaz de aislación permitiría caracterizar parcialmente y de mejor manera el comportamiento de la estructura ante sismos de distinto nivel de excitación que el valor de la aceleración máxima de suelo aplicada a la estructura.

Lo anterior es consistente con el hecho de que el desplazamiento relativo de los aisladores con respecto al suelo constituye una variable que se encuentra directamente relacionada al nivel de no linealidad exhibido por la estructura, lo que puede ser representado por la forma de la fuerza restitutiva que los aisladores aportan al comportamiento global de la estructura, la que se obtiene como una primera aproximación mediante la expresión

$$F_r \propto -\ddot{u}_{total}(t)$$

la que incluye la componente de amortiguamiento viscoso lineal en la respuesta dinámica de la estructura, permitiendo obtener una forma aproximada de la curva de rigidez del aislador, la cual para distintos niveles de excitación permite observar un comportamiento particular de los aisladores, como lo muestra la Figura 45

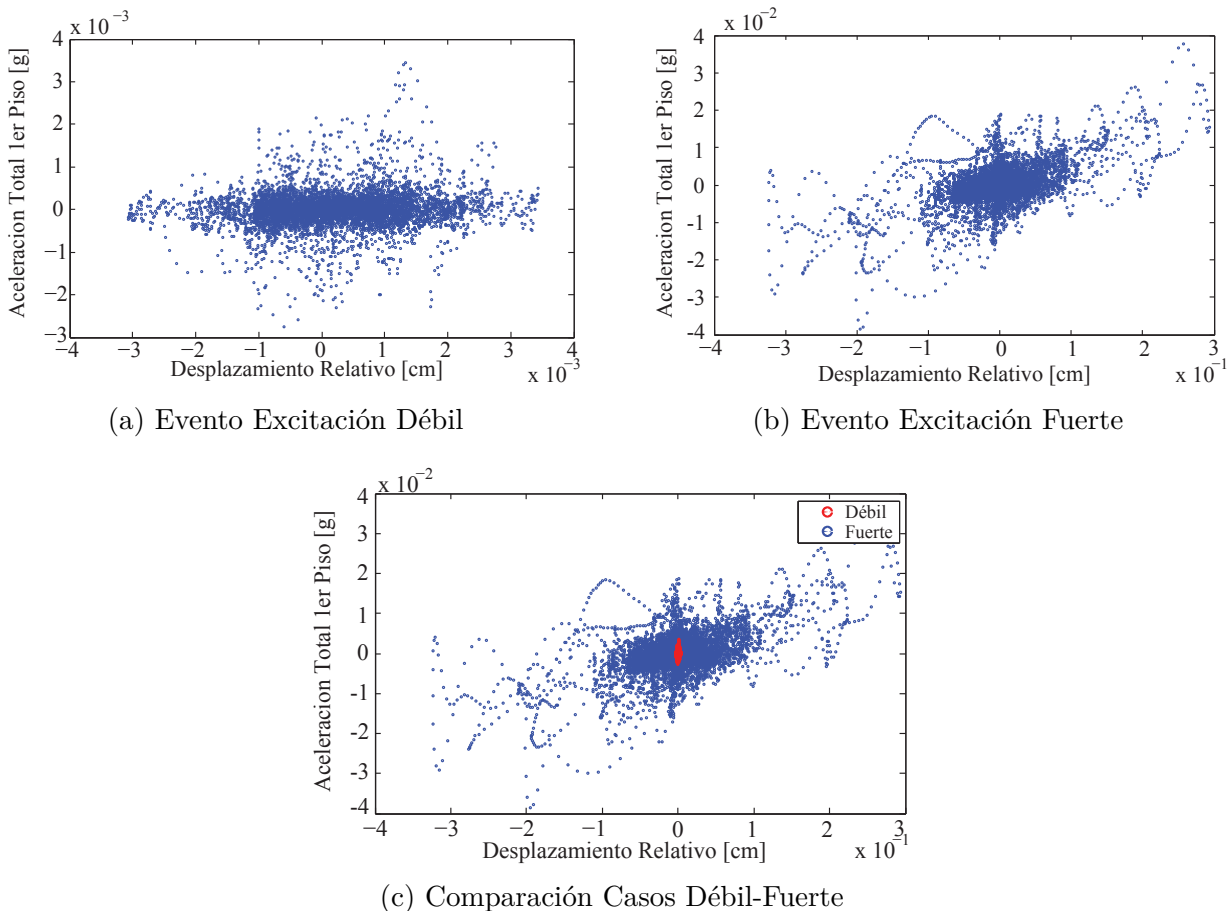


Figura 45: Aproximación de Fuerza Restitutiva de Aislación

3.6. COMENTARIOS DEL CAPÍTULO

El presente capítulo abordó la caracterización de los registros de aceleración obtenidos para los eventos sísmicos incluidos en la base de datos. Esta se construye para ser utilizada en el estudio de las técnicas de identificación aplicadas sobre una estructura aislada existente.

Inicialmente se presentaron los procesos de corrección de los registros obtenidos directamente de los equipos dispuestos en la estructura, consistiendo en el filtrado de ruido y corrección de la línea de base, con el objetivo de disponer de registros que sean aptos para su utilización en procedimientos que requieran su integración. Estos fueron filtrados entre los 0.25 a 30 Hz considerando las frecuencias predominantes que se presentan en los espectros de frecuencia y el rango de interés para el análisis de las propiedades de la estructura.

Por otra parte, se presentó la metadata de la base de datos, buscando asignar a cada evento sísmico un set de características entre las cuales se encuentran la fecha de ocurrencia del evento, magnitud, intensidad, ubicación del equipo, distancia epicentral y profundidad del evento, las que permiten a su vez establecer relaciones correspondientes a los eventos sísmicos que han afectado al edificio en el período considerado.

Finalmente, se obtuvieron parámetros procesados a partir de cada registro, los que permiten clasificar el nivel de excitación y respuesta sísmica que presenta el edificio. Entre los parámetros considerados se encuentran la Intensidad de Arias y la frecuencia central, las cuales muestran cierta capacidad para caracterizar el nivel de energía que ingresa a la estructura a partir de la excitación sísmica.

Sin embargo, el parámetro que muestra ser un mejor indicador del nivel de no linealidad en la respuesta de la estructura es el desplazamiento relativo a nivel de la interfaz de aislación, el cual si bien presenta una correlación con el nivel de excitación dado por el PGA para niveles de excitación menores, permite de mejor forma caracterizar la respuesta del edificio, lo que se observa tanto en las curvas de rigidez aproximadas como en el comportamiento que exhiben las frecuencias del primer modo obtenidas mediante técnicas no paramétricas de identificación. Este será utilizado para clasificar los eventos a mostrar en la identificación para distintos niveles de no linealidad en la estructura en el Capítulo V.

Algunos de los parámetros y relaciones asociadas al comportamiento variable de la estructura bajo distintos niveles de no linealidad son consideradas para el desarrollo del estudio analítico a llevar a cabo en el Capítulo IV, el cual coloca énfasis en la identificación de las propiedades de modelos numéricos representativos de una estructura aislada a partir de las técnicas de identificación en estudio.

CAPITULO IV

**ESTUDIO ANALÍTICO: DESARROLLO DE
PROGRAMAS, MODELOS E IDENTIFICACIÓN
MEDIANTE REGISTROS SIMULADOS**

CAPITULO IV. ESTUDIO ANALÍTICO: DESARROLLO DE PROGRAMAS, MODELOS E IDENTIFICACIÓN MEDIANTE REGISTROS SIMULADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene por objetivo evaluar de forma analítica el desempeño de las técnicas de identificación, mediante su aplicación a sistemas con aislación sísmica. Para esto, se utilizan respuestas de aceleración generadas a partir de modelos numéricos sujetos a excitación sísmica multidireccional.

Inicialmente se presentan las características de los modelos realizados para representar este tipo de estructuras, los que consisten en un modelo simple de base aislada (MSBA) y un modelo de elementos finitos construido en base a la geometría del edificio aislado de la Comunidad Andalucía (MCAEA). Ambos difieren en el nivel de observabilidad asumido y en la forma de incorporar el comportamiento no lineal de los aisladores presentes en el sistema, haciendo uso de modelos de histéresis de Bouc-Wen y bilineal respectivamente.

El estudio considera excitaciones de aceleración basal, modeladas como ruido blanco gaussiano (WGN), a partir de los que se generan una serie de respuestas de aceleración del sistema asociadas a distintos niveles de no linealidad, controlada por la magnitud de los desplazamientos relativos presentes en la interfaz de aislación.

Posteriormente se muestran los resultados de la aplicación de las técnicas de identificación : PSD, MOESP-MV, RPEM- λ y Filtro de Partículas (PF). Estas utilizan las respuestas de aceleración generadas para obtener las propiedades dinámicas de la estructura, las que consisten en propiedades modales (frecuencias, amortiguamientos y formas modales) para los 3 primeros métodos, y en los parámetros estructurales del modelo de histéresis en el caso del último algoritmo.

Finalmente, se comparan los resultados entregados por cada método y se analizan los principales factores que influyen en la capacidad de identificación del sistema. Entre estos se incluyen, el nivel de ruido presente en las observaciones del sistema, el tipo de modelo histerético asumido, y las limitaciones en las condiciones de entrada a los algoritmos, entre otros. Lo anterior permite concluir acerca del alcance de cada procedimiento en la estimación de propiedades dinámicas de un sistema aislado.

4.2. MODELOS Y GENERACIÓN DE DATOS DE ENTRADA/SALIDA

4.2.1. Modelos Numéricos de la estructura

Se realizaron una serie de modelos numéricos representativos de edificios con aislación sísmica. Estos fueron elaborados en el software de análisis estructural SAP2000, con el objetivo de generar un conjunto de respuestas a partir de este tipo de sistemas. Los modelos se dividen en 2 tipos y sus características se detallan a continuación.

4.2.1.1. Modelo Simple de Base Aislada (MSBA)

El modelo consta de una superestructura simplificada de un edificio de 4 pisos (Figura 46), con dimensiones de 5 m x 8 m en planta y una altura de piso de 3 m. Sobre cada piso se asigna una losa de hormigón de peso unitario $2.5 \text{ tonf}/m^3$ y de espesor 25 cm, mientras que las columnas y vigas son de sección rectangular con dimensiones 40 cm x 70 cm y 20 cm x 30 cm respectivamente. Las propiedades y dimensiones anteriores, fueron seleccionadas de forma que la frecuencia del primer modo de vibración de la superestructura sea de 8.2 Hz, con un amortiguamiento asociado del 5 % para todos los modos (Tabla 8).

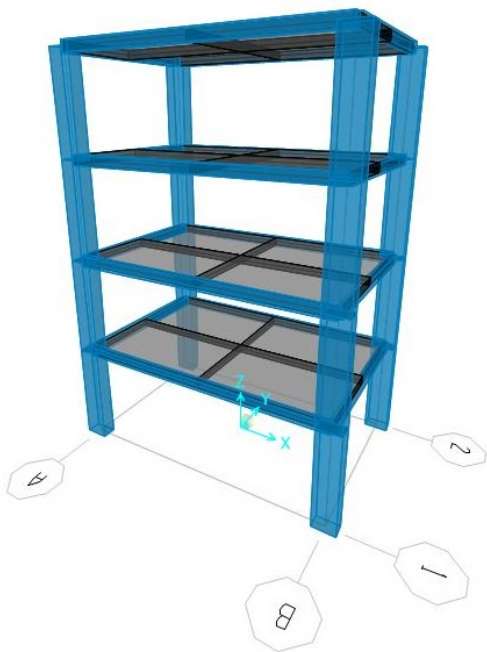


Figura 46: Superestructura de Modelo Simple de Base Aislada (MSBA)

Tabla 8: Propiedades Modales de Superestructura de modelo MSBA

Modo	Frecuencia [Hz]	Dirección
1	8.2	Y
2	12.9	XY
3	13.6	X
4	23.5	Y
5	24.3	Z
Amortiguamiento		5 % para todos los modos

A lo anterior, se incorporó una losa a nivel de fundación, con elementos 'Link' asignados en cada esquina, encargados de modelar el comportamiento no lineal de los aisladores sísmicos. Estos se definieron con grados de libertad traslacionales en las direcciones X-Y-Z y rotacionales en el plano XY. La relación fuerza-deformación de estos elementos sigue un modelo de histéresis de Bouc-Wen ('Plastic Wen'), sin degradación de rigidez por ciclo, el que fue detallado en el Capítulo II.

Los parámetros del modelo de Bouc-Wen para los aisladores se seleccionaron con una razón de rigideces del 5 % ($\alpha = 0.05$) y una transición suave entre el tramo inicial y de post-fluencia ($n = 0.5$). El valor de rigidez inicial k_i de los aisladores se escogió de tal forma que la frecuencia del primer modo de vibrar, asumiendo la rigidez inicial como rigidez efectiva en el análisis modal del sistema, alcanzara un valor de 5 Hz con un amortiguamiento del 5 % para todos los modos.

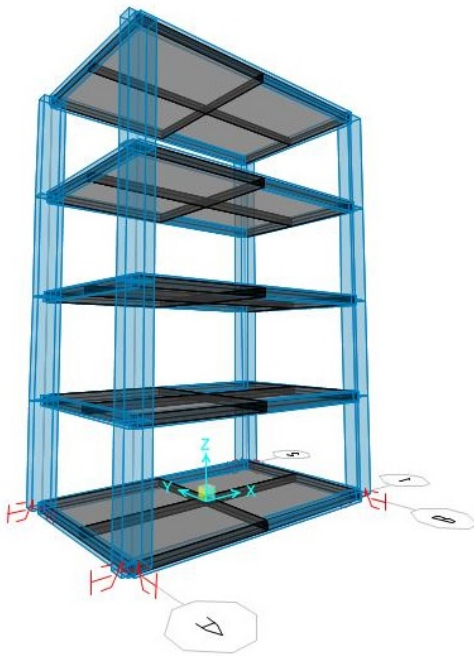
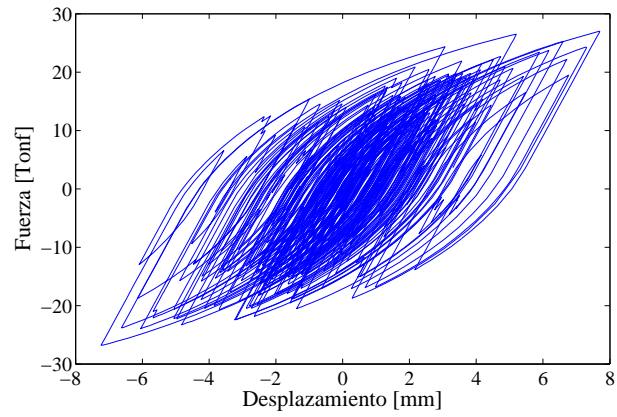


Figura 47: Modelo Simple de Base Aislada

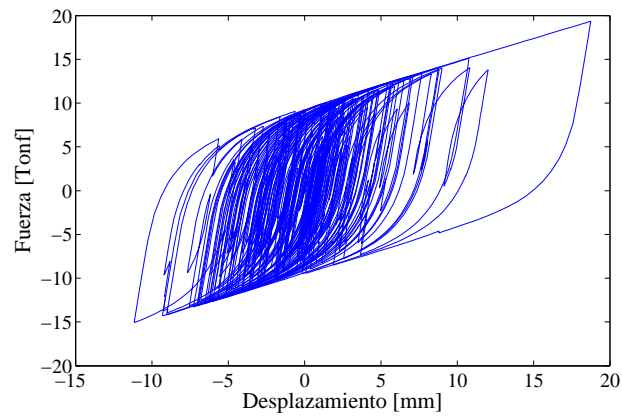
Tabla 9: Propiedades de Modelo Simple de Base Aislada

Modo	Frecuencia [Hz]	Dirección
1	5.0	UY
2	5.6	UX
3	6.8	RZ
4	17	UY
5	19.3	UZ
6	25.06	UZ
Amortiguamiento		5 % para todos los modos
Parámetros 'Links'		
k_i [Tonf/m]		10500
α		0.05
n		0.5
F_y [Tonf]		1, 3 y 30

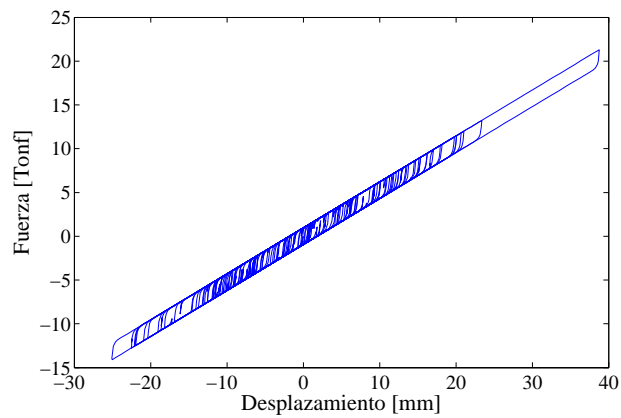
Se asignó un grupo de valores para F_y , con el fin de obtener respuestas asociadas a distintos niveles de histéresis en la estructura ante un mismo nivel de excitación basal, los que se muestran en la Figura 48. Los valores de los parámetros utilizados aparecen en la Tabla 9, mientras que en la Figura 47 se muestra el modelo simple de base aislada detallado.



(a) Histéresis Débil MSBA



(b) Histéresis Media MSBA



(c) Histéresis Fuerte MSBA

Figura 48: Curvas de Histéresis de Bouc-Wen en Modelo Simple de Base Aislada, ante excitación en dirección X-X, para distintos valores de F_y : a) 30 [Tonf], b) 3 [Tonf] y c) 1 [Tonf]

4.2.1.2. Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía (MCAEA)

Consiste en un modelo de elementos finitos, realizado en base a las características geométricas del edificio aislado ubicado en el conjunto habitacional Comunidad Andalucía. Posee 4 pisos, con muros y losas dispuestas en planta acorde a los datos detallados en el Capítulo II.

Los valores para las propiedades de los materiales asignados en la superestructura corresponden a los establecidos en [31] (con Módulos de Young para el hormigón y albañilería igual a $E_{horm} = 320000$ [Kg/cm²] y $E_{alb} = 19000$ [Kg/cm²] respectivamente), los que ajustan los períodos obtenidos por ensayos de microvibraciones en el edificio convencional. Por otra parte las propiedades del sistema de aislación (Tabla 10) se estiman basado en las respuestas que presenta el edificio aislado ante microvibraciones y el evento sísmico del 24 de Marzo de 1997, acorde a los valores especificados en [1].

El modelo posee 6 elementos 'Link' en la losa de fundación (1 en cada esquina y 2 en los centros de la dimensión mayor de la losa acorde a la Figura 49), los que representan el sistema de aislación de la estructura siguiendo un modelo de histéresis Bilineal, sin degradación de rigidez en cada ciclo, el que fue presentado en el Capítulo II. Estos se definieron con propiedades no lineales en los grados de libertad traslacionales UX-UY, y lineales en las direcciones UZ-RZ (con rigidez vertical $k_{uz} = 200000$ [Tonf/m] y $k_{rz} = 150$ [Tonf-m/rad]).

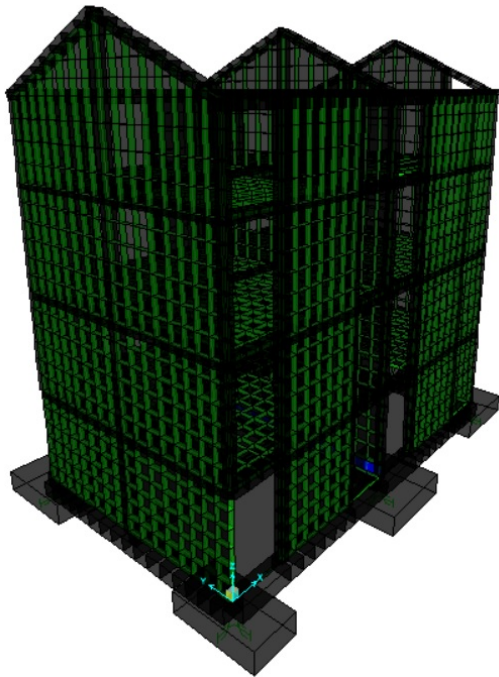
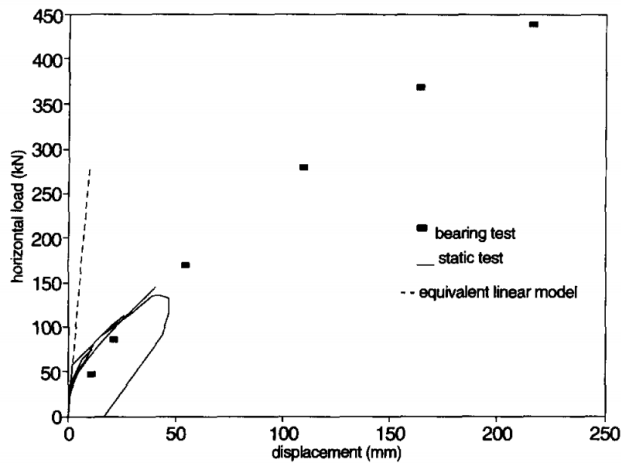


Figura 49: Modelo de Edificio Aislado Comunidad Andalucía

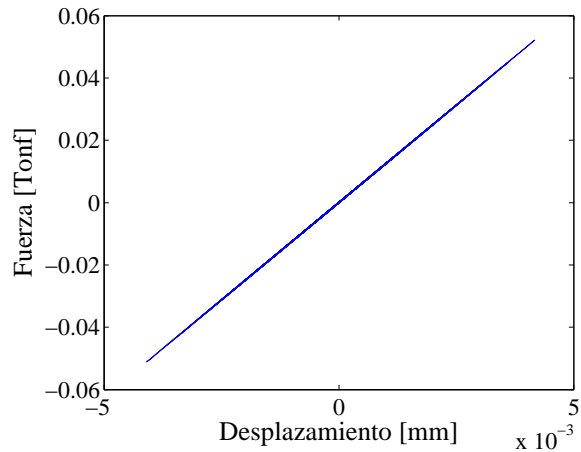
Tabla 10: Propiedades de Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía

Modo	Frecuencia [Hz]	Dirección
1	5.18	UX - RY
2	6.49	UY - RX
3	8.16	XY
4	11.43	UX - RY
5	15.38	UY - RX
6	15.75	UX - RY
7	16.86	RY
8	17.96	RZ
Amortiguamiento		2 % para todos los modos
Parámetros 'Links'		
k_i [Tonf/m]		12500
α		0.035
F_y [Tonf]		0.2

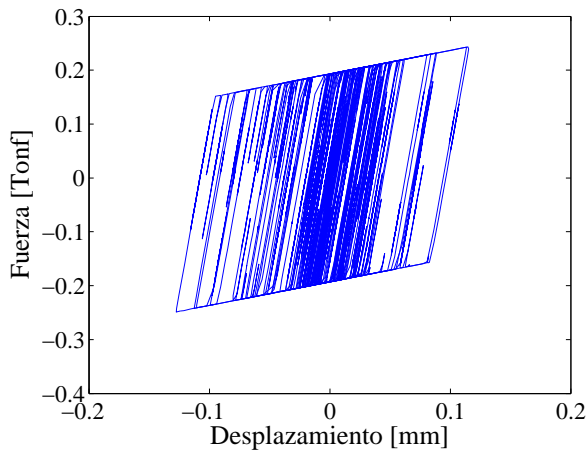
Los parámetros del modelo bilineal consideran una rigidez elástica del $k_i = 12500$ [Tonf/m], una razón de rigideces del 3.5 %, y un esfuerzo de fluencia $F_y = 0.2$ [Tonf]. Los últimos dos parámetros son estimados a partir de los datos experimentales de la curva fuerza-deformación de los aisladores mostrados en la Figura 50a. Mientras que las curvas de histéresis de los aisladores sujetos a las excitaciones sísmicas de distinta amplitud aplicadas al modelo MCAEA se muestran en la Figura 50b-d.



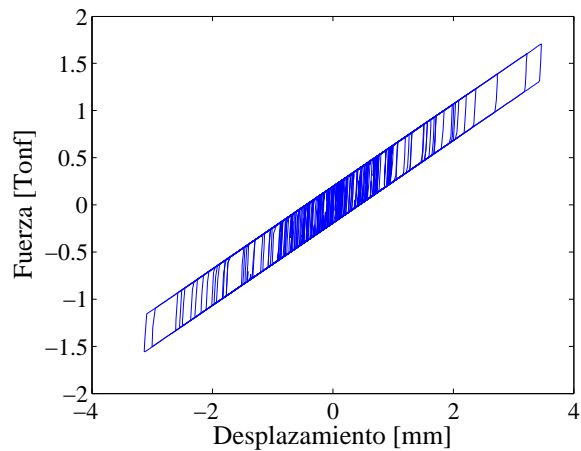
(a) Curva de Fuerza-Deformación obtenida por ensayo estático



(b) Histéresis Débil MCAEA



(c) Histéresis Media MCAEA



(d) Histéresis Fuerte MCAEA

Figura 50: Curvas de Histéresis Bilineales ante niveles de excitación sísmica a) Débil b) Medio y c) Fuerte, Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía

4.2.2. Datos Entrada y Salida del Sistema

Para llevar a cabo el proceso de identificación de los modelos mostrados en la sección 4.2.1, es necesario contar con señales de entrada (excitación externa actuando sobre el sistema) y de salida (respuesta del sistema debido a la excitación). Para esto, se genera un set de registros de aceleración, modelados como ruido blanco gaussiano (WGN), los que se aplican a nivel basal, simulando la excitación sísmica en una estructura aislada.

Con esto, se obtienen las respuestas de aceleración de los modelos, los que están sujetos a distintos niveles de no linealidad en la interfaz de aislación (Figuras 48 y 50). Esta condición se obtiene de dos formas, correspondiendo cada una a los modelos descritos anteriormente:

- **Condición para generar no linealidad - (Modelo)**

- a) Set de Esfuerzos de Fluencia $\{F_y\}_i$, con única excitación $\ddot{u}_g(t)$ - (Modelo Simple de Base Aislada - MSBA).
- b) Esfuerzo de Fluencia $F_y = \text{cte}$, con un set de excitaciones $\{\ddot{u}_g(t)\}_i$ con amplitud máxima variable - (Modelo Aislado de Edificio Comunidad Andalucía - MCAEA).

Los registros de aceleración basal aplicados en los modelos y sus características, se presentan en las Tablas 11-12 y en las Figuras 51-52. Para el análisis de resultados, el comportamiento de los aisladores ante estas excitaciones se clasifica acorde al grado de no linealidad que exhibe la respuesta del sistema, según el nivel de desplazamientos y desarrollo histerético como: Débil (Figura 48a-50a), Medio (Figura 48b-50b) y Fuerte (Figura 48c-50c).

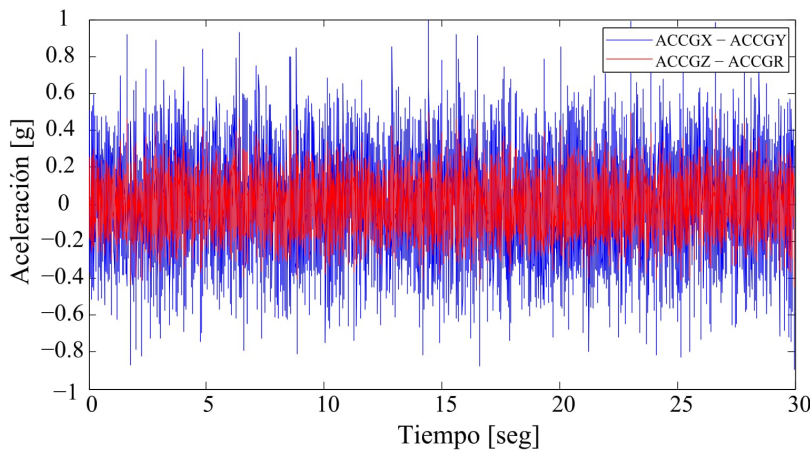


Figura 51: Excitación en Modelo Simple de Base Aislada

Tabla 11: Características Excitación Modelo Simple de Base Aislada

Dirección	PGA [g]
X, Y	1
XY, Z	0.5
Excitaciones Modeladas como Ruido Blanco Gaussiano	
$F_y = 1, 3, 10$ [Tonf]	

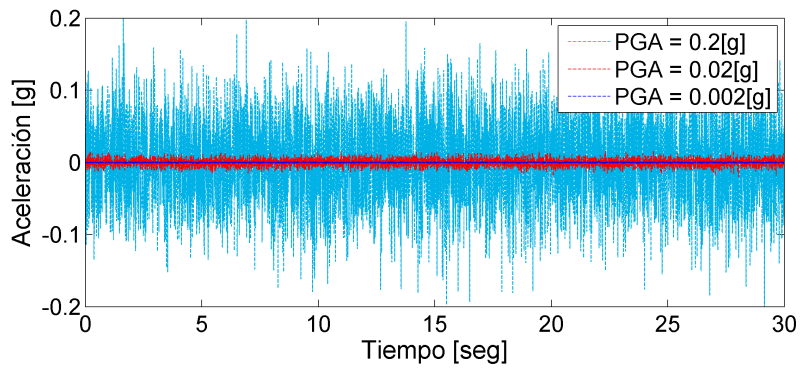
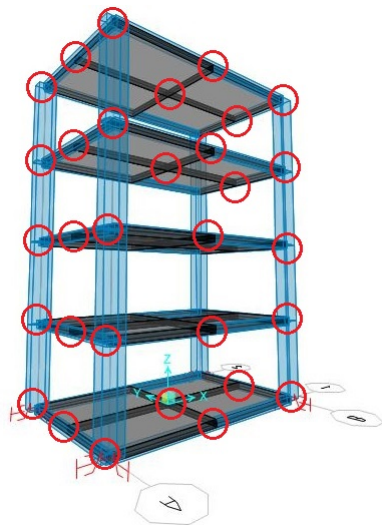


Figura 52: Excitaciones en Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía

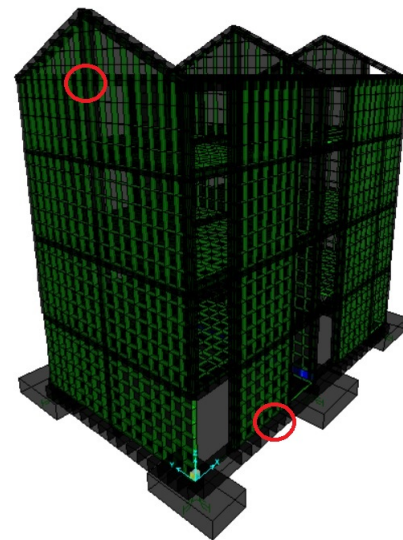
Tabla 12: Características de Excitación Modelo Edificio Aislado Comunidad Andalucía

Nivel de Excitación Horizontal	PGA [g]
Débil (D)	0.002
Medio (M)	0.02
Fuerte (F)	0.2
$F_y = 0.2$ [Tonf]	

Paralelamente, se incluyen distintas condiciones de disponibilidad de registros de respuesta para cada modelo, con el fin de tomar en cuenta la influencia de un número limitado de observaciones de este tipo de sistemas en el desempeño de los métodos de identificación a ser aplicados. En el caso del Modelo Simple de Base Aislada (MSBA), se considera una disponibilidad total de los registros de respuesta de aceleración, proveniente de cada nodo de la estructura (Figura 53a). Mientras que para el caso del Modelo del Edificio Aislado de la Comunidad Andalucía (MCAEA), solo se toman en cuenta las respuestas de aceleración, ubicadas a nivel de la losa de fundación (nodos 95, 1452, 1456, 1862) y el cuarto Piso (nodos 77 y 84), con el objetivo de representar las condiciones con las que se debe realizar la identificación para la estructura aislada existente (Figura 53b).



(a) Modelo Simple de Base Aislada (MSBA)



(b) Modelo Edificio Aislado (MCAEA)

Figura 53: Ubicación de registros de aceleración disponibles en modelos analíticos

4.3. PROGRAMACIÓN DE ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN

Las técnicas de identificación en estudio, son aplicadas mediante rutinas implementadas en el software Matlab. Estas utilizan las señales de entrada y salida del sistema, junto con parámetros iniciales particulares a cada técnica de identificación, para llevar a cabo la estimación de las propiedades dinámicas de los modelos presentados en la sección 4.2.1.

Los algoritmos considerados en este capítulo consisten en: PSD, MOESP-MV, RPEM- λ y Filtro de Partículas (PF). Los códigos correspondientes a cada algoritmo se adjuntan en el Anexo C, junto con una descripción referente a los parámetros de entrada - salida del método respectivo.

4.4. RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN EN MODELOS NUMÉRICOS

A continuación se realiza un análisis de los resultados obtenidos a partir de la identificación de los modelos analíticos presentados en la sección 4.2.1 utilizando los métodos mencionados anteriormente.

La sección 4.4.1 presenta las propiedades modales y estructurales a identificar para el modelo simple de base aislada (MSBA), el que considera un modelo histerético de Bouc-Wen para representar el comportamiento de los aisladores, contando con una disponibilidad total de registros de aceleración en cada nodo del sistema. Del mismo modo se muestran los parámetros del modelo de elementos finitos del edificio aislado de la Comunidad Andalucía (MCAEA), el que cuenta con una representación bilineal para modelar el comportamiento histerético de los aisladores, y que además asume una disponibilidad limitada de registros de aceleración, mediante el uso de nodos ubicados en los niveles donde se encuentran dispuestos los acelerómetros en la estructura aislada existente.

Las respuestas de aceleración de los modelos son generadas bajo estados de histéresis Débil (D), Media (M) y Fuerte (F) para el comportamiento horizontal en los aisladores, acorde a lo descrito en la sección 4.2.2, mientras que para la dirección vertical se define un comportamiento lineal de la estructura.

Los parámetros a estimar consisten en las **propiedades modales** de la estructura (frecuencias f , amortiguamientos β y formas modales ϕ) en el caso de PSD, MOESP-MV Y RPEM- λ . Mientras que mediante el Filtro de Partículas (PF) se estiman las **propiedades estructurales** asociadas a los aisladores, consistentes en: Esfuerzo de Fluencia F_y , Rigidez

Elástica k_i y Razón de Rigideces α (además del exponente de transición n para el caso particular del modelo hysterético de Bouc-Wen). Los resultados obtenidos de la identificación mediante el uso de estos métodos se presentan en las secciones 4.4.2 - 4.4.5.

Adicionalmente se realiza un análisis complementario de factores que afectan al desempeño de los algoritmos de identificación para la estimación de propiedades en la Sección 4.6.

El análisis de los resultados, considera variables tales como el nivel de excitación, el tipo de modelo asumido en cada procedimiento y las características de las observaciones utilizadas. También se comparan los valores estimados y se discute el alcance mostrado por los procedimientos, en la identificación de propiedades dinámicas de los modelos en la Sección 4.7, procediendo a los comentarios con respecto a los resultados mostrados en la Sección 4.8.

4.4.1. Propiedades dinámicas de los modelos numéricos

Las propiedades modales y estructurales del modelo simple de base aislada (MSBA) se presentan en las Tablas 13 y 14, en donde las frecuencias de la estructura son calculadas mediante análisis modal utilizando Vectores de Ritz (dependientes de la carga y mas adecuados para el análisis sísmico que el método de Valores y Vectores Propios) en el software SAP2000, a partir de la definición de la rigidez inicial de los aisladores k_i y la rigidez post fluencia k_f como “rigidez efectiva” para el análisis. Sus formas modales respectivas se presentan en las figuras 54 y 55

Modo	Frecuencia [Hz]	Dirección
1	5.03	UY
2	5.63	UX
3	6.79	RZ
4	17	UY
5	19.34	UZ
6	25.06	UZ
Amortiguamiento		5 % para todos los modos

(a)

Modo	Frecuencia [Hz]	Dirección
1	1.33	UY
2	1.34	UX
3	1.70	RZ
4	15	UY
5	19.34	UZ
6	23.81	RZ
Amortiguamiento		5 % para todos los modos

(b)

Tabla 13: Propiedades Modales MSBA calculadas con a) Rigidez Inicial y b) Rigidez Post-Fluencia

Parámetros 'Links'	
k_i [Tonf/m]	10500
α	0.05
n	0.5
F_y [Tonf]	1, 3 y 30

Tabla 14: Propiedades Estructurales MSBA

De forma análoga se obtienen las propiedades modales y estructurales del modelo del edificio aislado de Comunidad Andalucía (MCAEA), las que se presentan en las Tablas 15 y 16. Sus formas modales respectivas se muestran en las Figuras 56 y 57

Modo	Frecuencia [Hz]	Dirección
1	5.11	UX - RY
2	6.29	UY - RX
3	7.92	RZ - UY
4	11.43	UX - RY
5	15.25	UY - RX
6	15.73	UX / RY
7	16.58	RY
8	17.54	UZ
Amortiguamiento		2 % para todos los modos

(a)

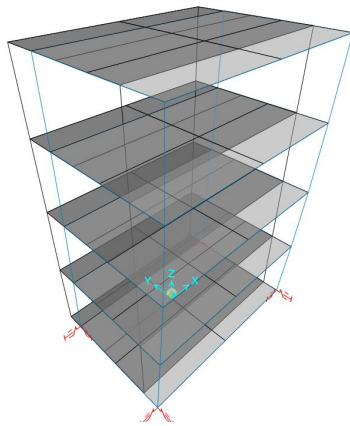
Modo	Frecuencia [Hz]	Dirección
1	1.90	UX
2	1.93	UY
3	2.19	RZ
4	8.08	RY
5	10.32	RX
6	12.28	RX / RY
7	13.11	RX
8	16.58	RY
9	17.33	UZ
Amortiguamiento		2 % para todos los modos

(b)

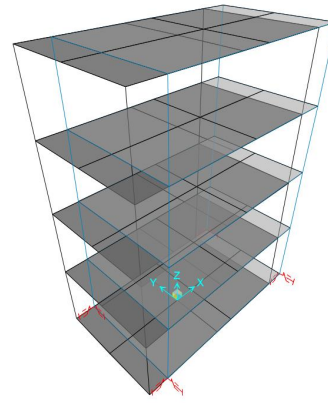
Tabla 15: Propiedades Modales MCAEA calculadas con a) Rigidez Inicial y b) Rigidez Post-Fluencia

Parámetros 'Links'	
k_i [Tonf/m]	12500
α	0.035
n	0.5
F_y [Tonf]	0.2

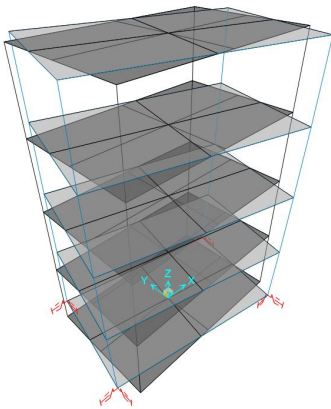
Tabla 16: Propiedades Estructurales MCAEA



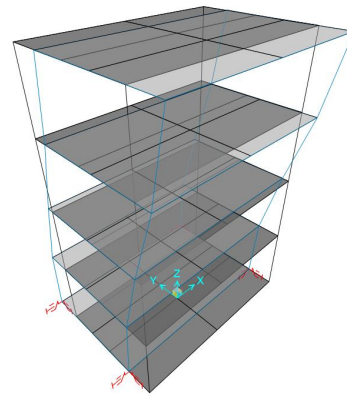
(a) Modo $f_1 = 5.03$ Hz



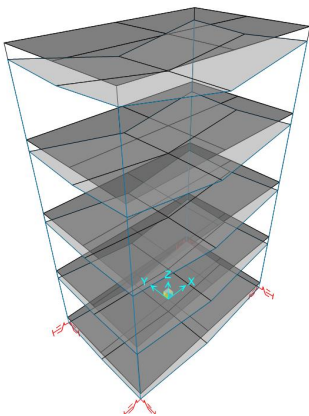
(b) Modo $f_2 = 5.63$ Hz



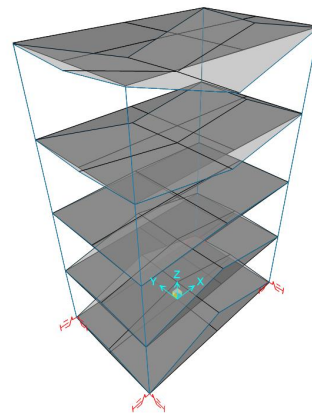
(c) Modo $f_3 = 6.79$ Hz



(d) Modo $f_4 = 17$ Hz

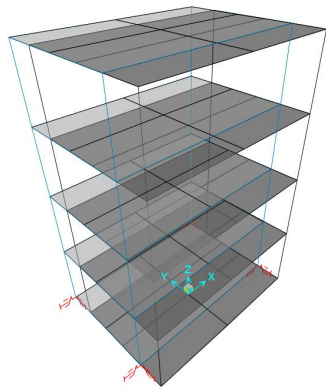


(e) Modo $f_5 = 19.34$ Hz

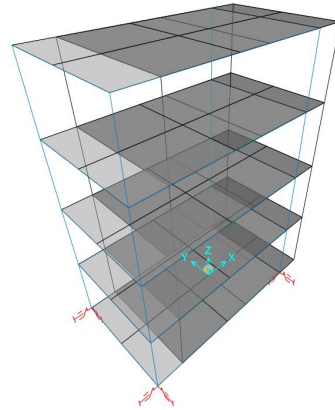


(f) Modo $f_6 = 25.06$ Hz

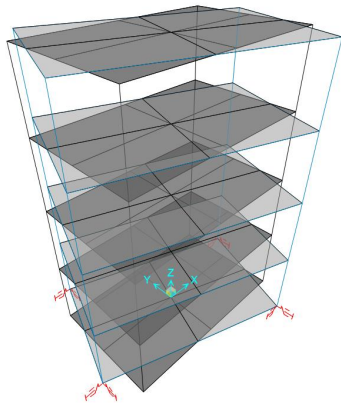
Figura 54: Formas Modales Modelo MSBA calculadas utilizando rigidez inicial como rigidez equivalente



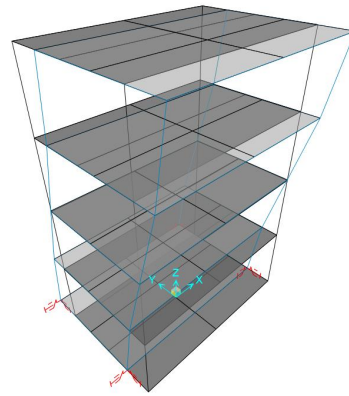
(a) Modo $f_1 = 1.33$ Hz



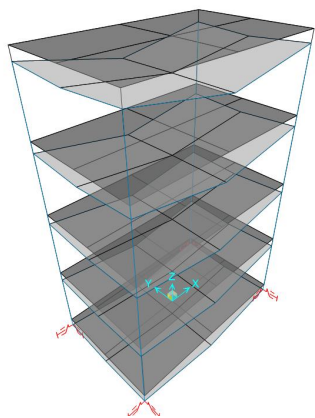
(b) Modo $f_2 = 1.34$ Hz



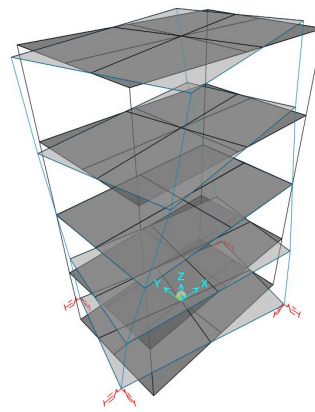
(c) Modo $f_3 = 1.70$ Hz



(d) Modo $f_4 = 15$ Hz

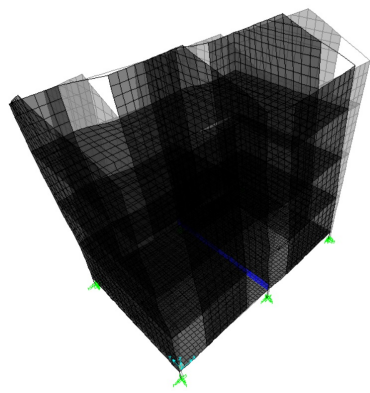


(e) Modo $f_5 = 19.34$ Hz

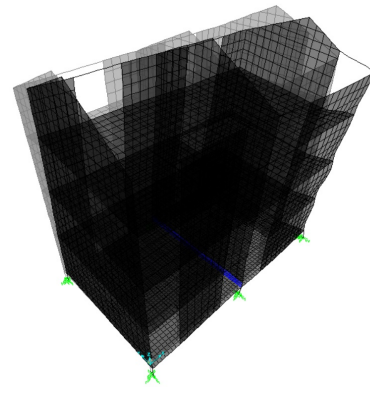


(f) Modo $f_6 = 23.81$ Hz

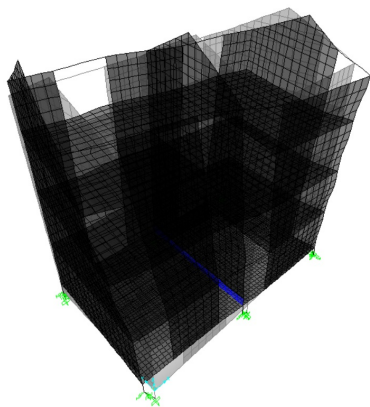
Figura 55: Formas Modales Modelo MSBA calculadas utilizando rigidez post fluencia como rigidez equivalente



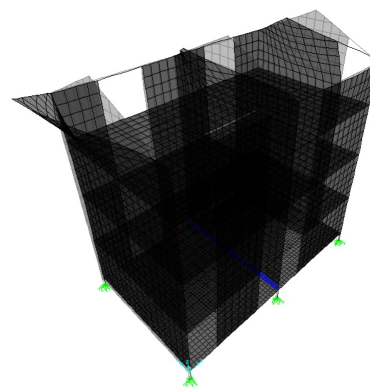
(a) Modo $f_1 = 5.11$ Hz



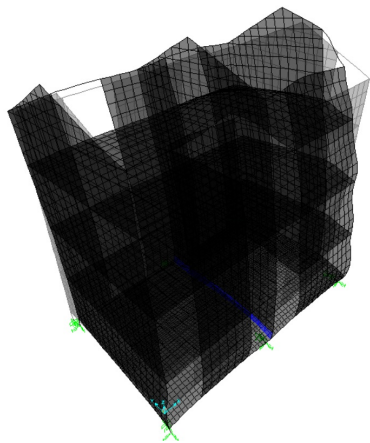
(b) Modo $f_2 = 6.29$ Hz



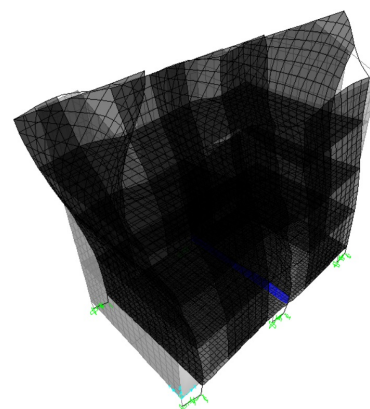
(c) Modo $f_3 = 7.92$ Hz



(d) Modo $f_4 = 11.43$ Hz

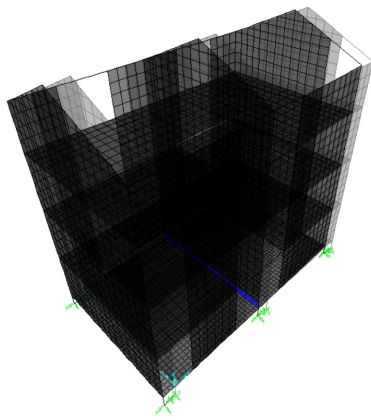


(e) Modo $f_5 = 15.25$ Hz

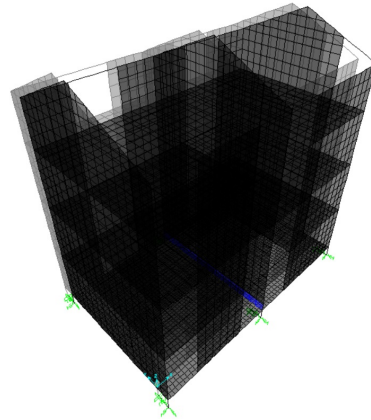


(f) Modo $f_6 = 15.73$ Hz

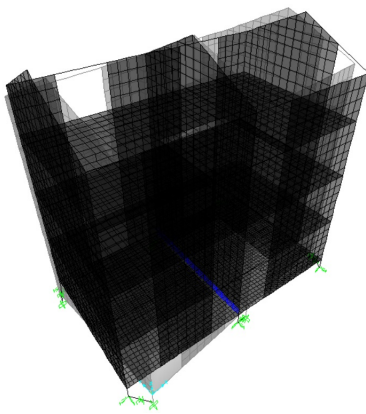
Figura 56: Formas Modales Modelo MCAEA calculadas utilizando rigidez inicial como rigidez equivalente



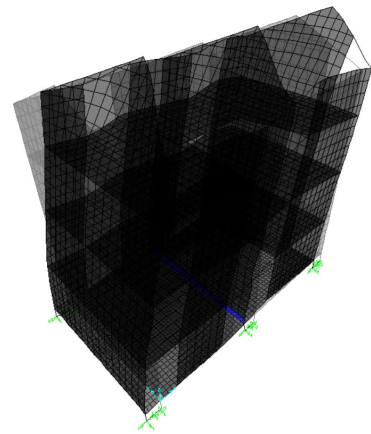
(a) Modo $f_1 = 1.90$ Hz



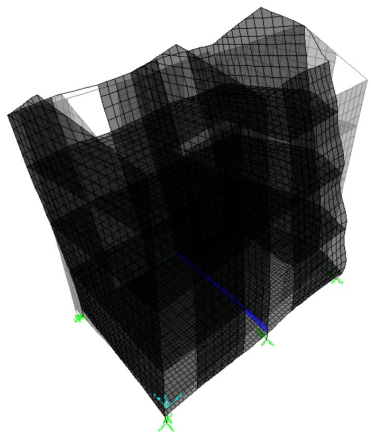
(b) Modo $f_2 = 1.93$ Hz



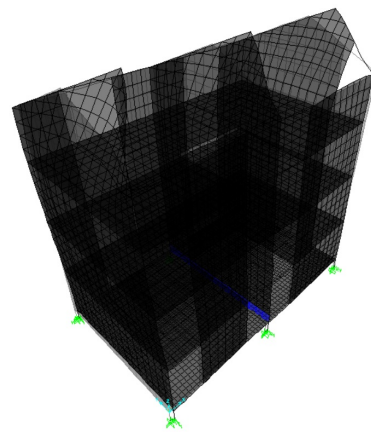
(c) Modo $f_3 = 2.19$ Hz



(d) Modo $f_4 = 8.08$ Hz



(e) Modo $f_5 = 10.32$ Hz



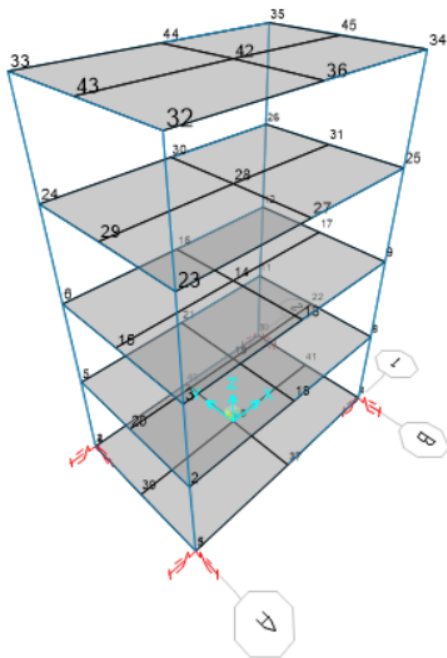
(f) Modo $f_6 = 12.28$ Hz

Figura 57: Formas Modales Modelo MCAEA calculadas utilizando rigidez post fluencia como rigidez equivalente

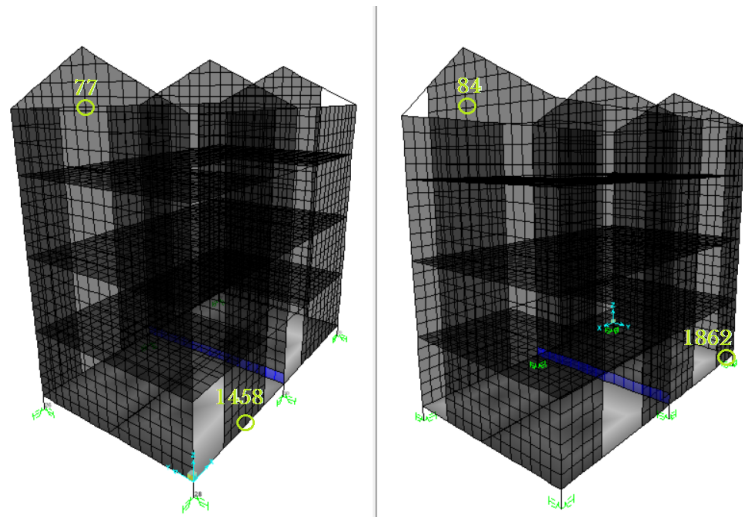
Para llevar a cabo la identificación de los modelos, se utilizaron los registros de aceleración relativa provenientes de los nodos presentes en el modelo, los cuales son clasificados en **centrales** y **laterales** (Figura 58) según su posición en la estructura y dirección de excitación, acorde a la Tabla 17.

Tabla 17: Nodos centrales y laterales en modelos analíticos MSBA y MCAEA

Nodos	Modelo			
	MSBA		MCAEA	
	X	Y	X	Y
Centrales	14, 15, 17, 19, 20, 22, 28, 29, 31, 38, 39, 41, 42, 43, 45	13, 14, 16, 18, 19, 21, 27, 28, 30, 36, 37, 38, 40, 42, 44	77, 84	95
Laterales	1-13, 16, 18, 21, 23-27, 30, 32-37 40, 44	1-12, 15, 17, 20, 22-26, 29, 31-35, 39, 41, 43, 45	95, 1452 1456, 1836	77, 84, 1452 1456, 1862



(a) Nodos modelo MSBA



(b) Nodos modelo MCAEA

Figura 58: Nodos centrales y laterales en modelos analíticos

4.4.2 IDENTIFICACION MEDIANTE PSD

4.4.2.1 Modelo MSBA

Los espectros de frecuencia obtenidos mediante la aplicación del algoritmo PSD a los registros de aceleración horizontal del sistema, generados para los distintos estados histéricos del modelo MSBA, se muestran en la Figura 59. Los niveles de respuesta débil (D) y media (M) exhiben valores similares de frecuencias identificadas para el primer modo de la estructura ($f_y = 5.04$ Hz y $f_x = 5.64$ Hz). Este comportamiento se produce debido a la predominancia de los tramos donde la rigidez inicial de la curva de histéresis toma parte en la respuesta, identificando dichas frecuencias aún cuando se producen desplazamientos mayores al de fluencia u_y (Figuras 59c-d).

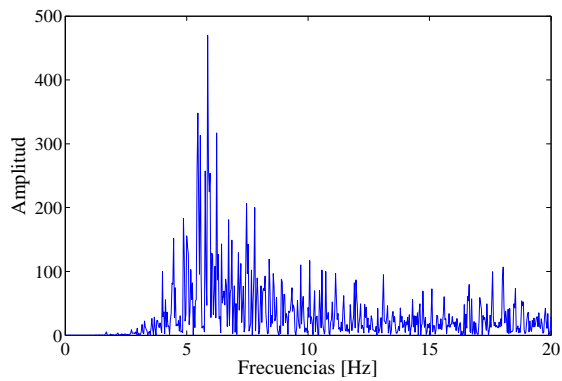
Por otra parte, el caso de histéresis fuerte (F) muestra una disminución notoria en el valor de la frecuencia fundamental en relación a los casos anteriores (Figuras 59e-f), alcanzando valores cercanos a los calculados mediante análisis modal ($f_y = 1.34-1.66$ Hz y $f_x = 1.35-1.68$ Hz), donde se consideró la rigidez post-fluencia que define el comportamiento plástico como rigidez inicial equivalente de los aisladores.

Tomando en cuenta lo anterior, se observa que la respuesta del sistema queda controlada por la rigidez predominante presente en la curva histérica ante distintos niveles de excitación. Esto produce una transición discreta de la frecuencia asociada al primer modo horizontal de la estructura entre los valores identificados para los casos histéricos débil y medio (D y M) hasta los estimados en el caso extremo (F) cuando el nivel de no linealidad en la respuesta aumenta. Este comportamiento particular se asocia a la definición de la curva de histéresis a partir de la rigidez inicial y de post fluencia asociada a los elementos de aislación.

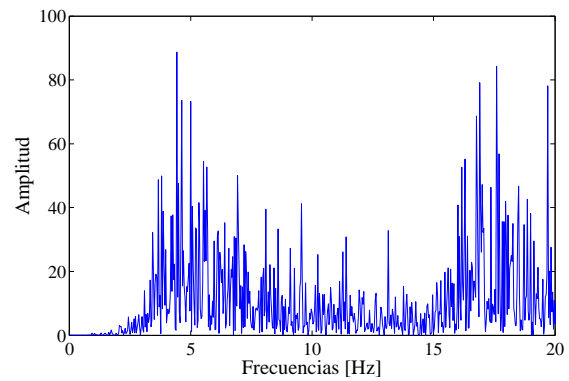
Un aumento en el nivel de no linealidad también produce que la energía del primer modo tienda a decrecer entre los dos primeros casos, aumentando a la vez su ancho de banda debido a un cambio en el amortiguamiento viscoso equivalente del modo, el cual trata de incorporar el fenómeno de disipación por histéresis. Los modos superiores no resultan mayormente afectados, confirmando que la adición de un elemento no lineal de este tipo a nivel basal de la superestructura modifica principalmente los primeros modos horizontales, los que presentan una mayor participación en la respuesta de este tipo de estructuras.

En este método tanto la amplitud como los valores de las frecuencias de los modos identificados, varía con su nivel de participación en la ubicación de los registros utilizados para el análisis. Esto se observa en la detección de modos principalmente traslacionales en los nodos ubicados en ejes que pasan por el centro de gravedad en el plano horizontal (no-

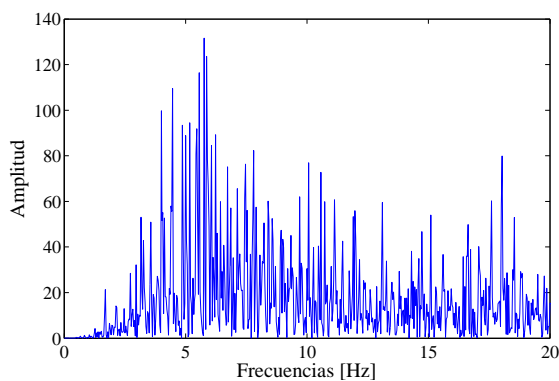
dos centrales), o bien en la identificación de modos rotacionales en registros provenientes de nodos desplazados de dicha ubicación (nodos laterales). También los modos identificados tienden a ausentarse en posiciones “nodales”, donde la amplitud de las formas modales para la frecuencia respectiva resulta ser nula.



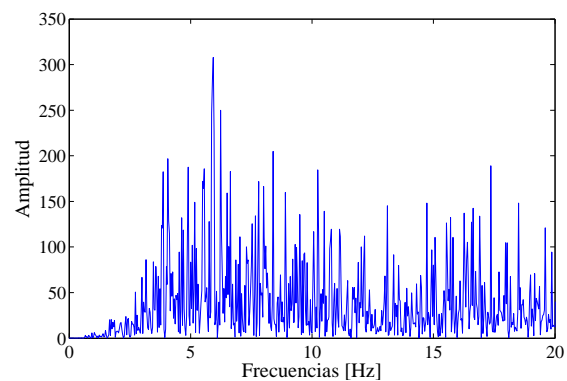
(a) Espectro PSD DX - nodo 16



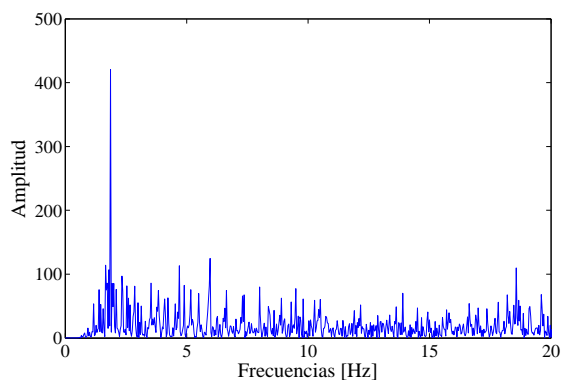
(b) Espectro PSD DY - nodo 21



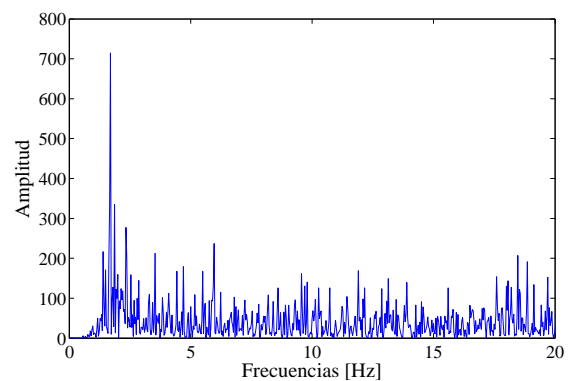
(c) Espectro PSD MX - nodo 10



(d) Espectro PSD MY - nodo 22



(e) Espectro PSD FX - nodo 27



(f) Espectro PSD FY - nodo 15

Figura 59: Espectro PSD para Modelo Simple de Base Aislada con Histéresis Débil (a-b), Medio (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X e Y, Modelo MSBA

Otro factor que puede modificar el valor de las frecuencias identificadas en el espectro es la razón entre los niveles máximos de excitación traslacional y rotacional aplicadas en el modelo. En la Figura 59e-f, se obtienen frecuencias del primer modo para el caso histerético fuerte cercanos a los 1.7 Hz, lo cual difiere en cierta medida con el valor teórico obtenido mediante análisis modal de 1.3 Hz. Esto es debido a que la razón entre las aceleraciones máximas traslacional y rotacional ($\text{máx}(\ddot{u}_{gr})/\text{máx}(\ddot{u}_{gt}) = 0.5$) es lo suficientemente grande para que el modelo muestre una componente rotacional en la respuesta no despreciable, cuyo modo en el caso histerético fuerte corresponde a los 1.7 Hz. La cercanía de este modo a los valores de frecuencias traslacionales se ve facilitada por la alta simetría que presenta el modelo MSBA.

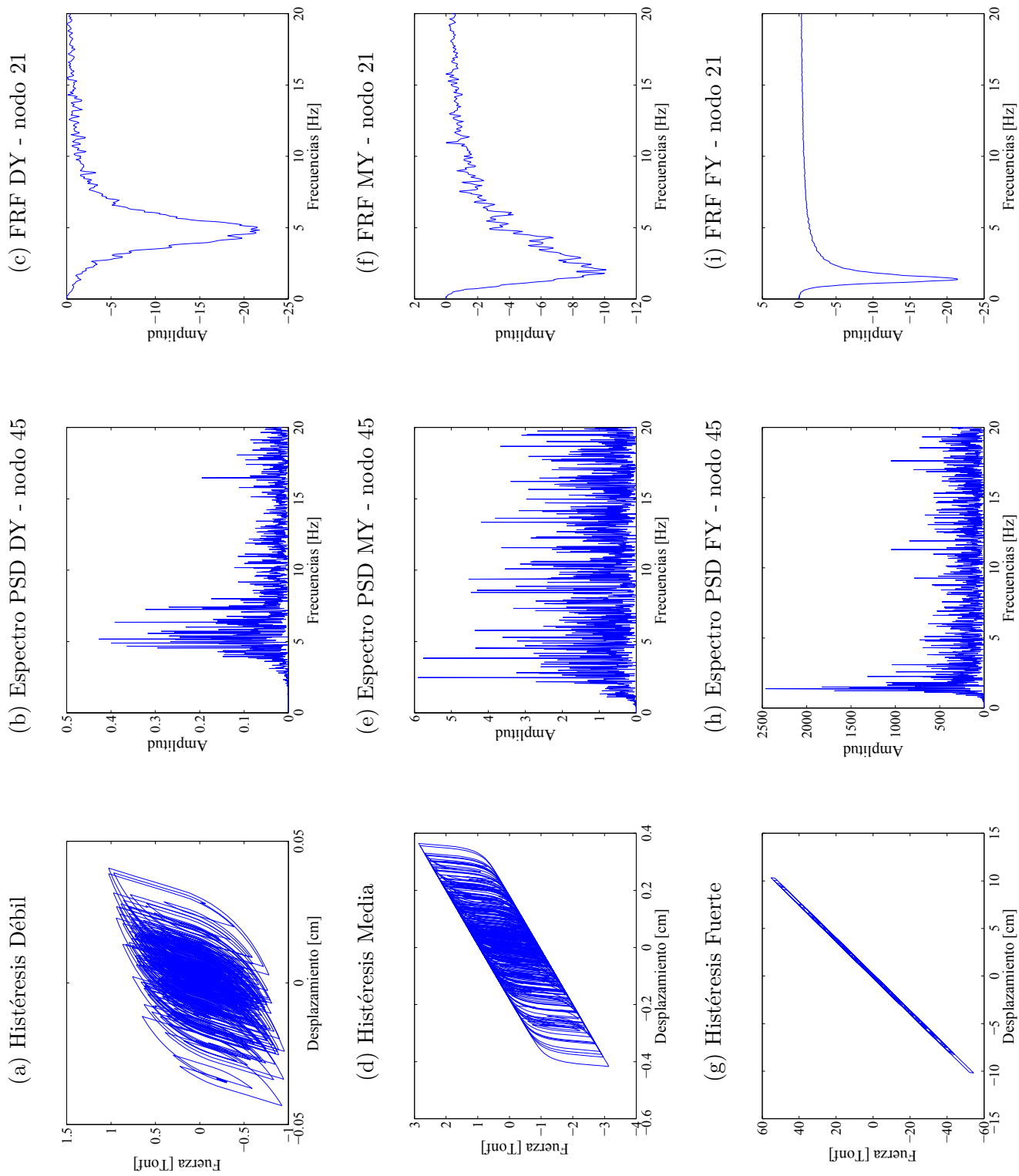
La condición de excitación rotacional no es del todo representativa de los sistemas estructurales, encontrándose en la práctica configuraciones que permiten diferenciar de mejor forma los primeros modos traslacionales con respecto al rotacional en el espectro de frecuencias, acorde al nivel de simetría que presenta la estructura en estudio (acorde a la diferencia entre el centro de masa con respecto al de rigidez).

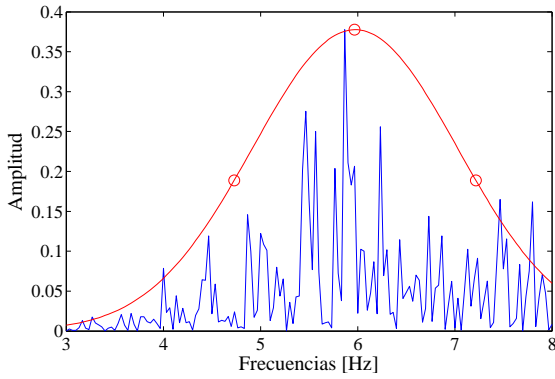
Por otra parte, la aplicación de aceleración basal predominantemente traslacional, donde se da que $\text{máx}(\ddot{u}_{gr})/\text{máx}(\ddot{u}_{gt}) \ll 1$, favorece la identificación de los modos traslacionales en la estructura por sobre los rotacionales, los cuales, para este caso particular, no se ven mayormente excitados ya sea en posiciones centrales o laterales. Esta última condición es apreciable tanto en los espectros de frecuencia como en las funciones de respuesta en frecuencia (FRF), las que exhiben un peak marcado cuando la respuesta de la estructura obedece a un comportamiento de este tipo (Figura 60b-e-h). Esto a su vez permite identificar los modos traslacionales de la estructura en el espectro de frecuencias para el caso en estudio, dentro de un rango de valores comprendidos entre los 1.3 - 1.6 Hz dependiendo de la excitación.

Mientras que en sus posiciones laterales, las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) se tornan irregulares con el aumento de participación rotacional en la respuesta, al no poder compatibilizar la entrada de aceleración puramente traslacional con la respuesta observada, cuyo contenido incluye componentes traslacionales generadas por el movimiento de rotación (Figura 63b-d-f).

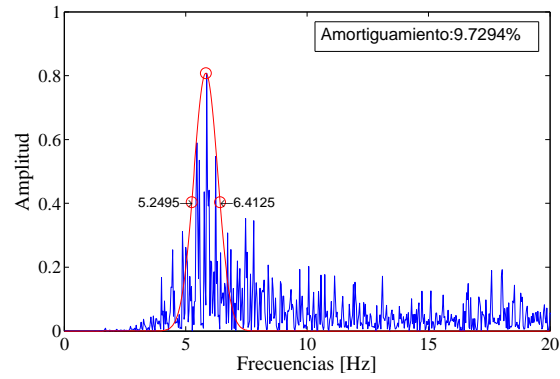
Aún así la función de respuesta en frecuencia calculado en las posiciones centrales, muestra un buen desempeño en la detección del cambio del comportamiento en la estructura, donde para distintos niveles de excitación se aprecia de forma consistente la transición desde los valores de frecuencias del primer modo correspondientes a niveles bajos de no linealidad en la respuesta hasta aquellos asociados a un nivel histerético fuerte (Figura 60c-f-i).

Figura 60: Identificación de modelo MSBA con excitación traslacional predominante con $\max(\ddot{u}_{gr})/\max(\ddot{u}_{gt}) = 0.01$



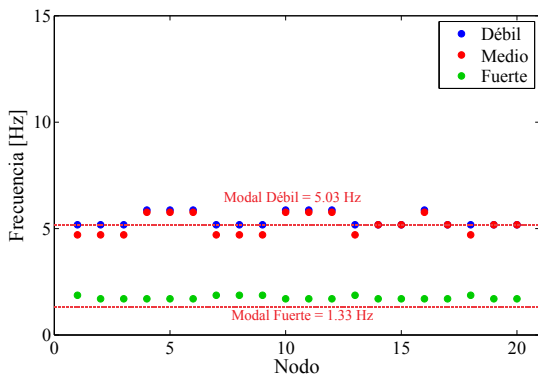


(a) Aproximación mediante curva gaussiana

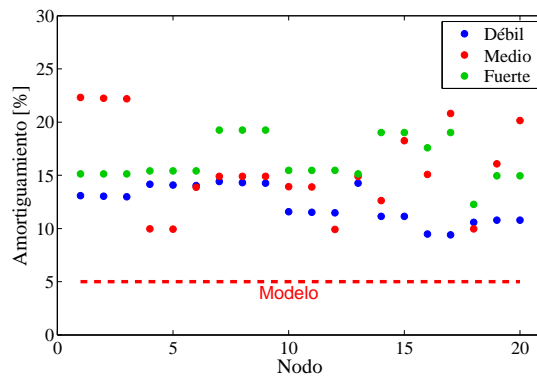


(b) Valores estimados con $H(f) = H_{max}/2$

Figura 61: Cálculo de amortiguamiento mediante método de ancho de banda, Modelo MSBA



(a) Frecuencias primer modo



(b) Amortiguamientos primer modo

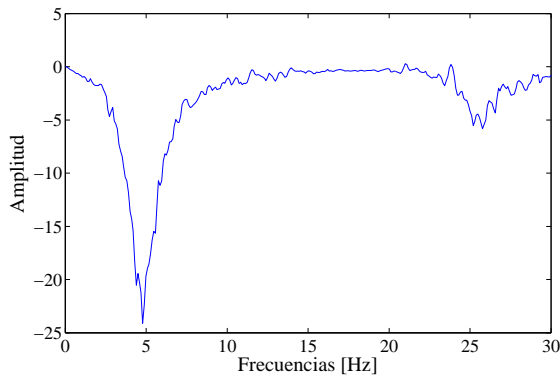
Figura 62: Frecuencias y amortiguamientos identificados por PSD en MSBA dirección X

Una comparación entre los valores de frecuencias y amortiguamientos identificados para el primer modo, utilizando un grupo de nodos ubicados en posiciones arbitrarias del modelo se muestran en la Figura 62. Las frecuencias identificadas muestran una tendencia decreciente con el nivel de no linealidad en la estructura, variando desde un rango de valores comprendido entre los 4.7 - 5.86 Hz para los casos de histéresis débil (D) y media (M), hasta los 1.7 - 1.87 Hz en el caso de histéresis fuerte (F).

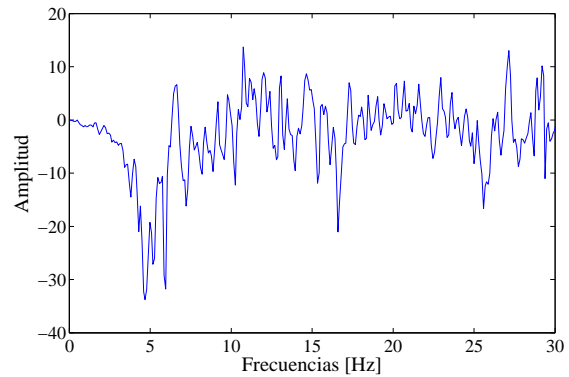
Los valores del amortiguamiento, calculados mediante el método de ancho de banda (Figura 61) muestran una diferencia considerable en relación al 5% definido en el modelo para todos los modos de la estructura. Sin embargo una tendencia creciente se observa en la transición desde el caso histerético débil (D), donde se identifican rangos de amortiguamientos entre los 10-15% hasta el caso de histéresis fuerte (F), el que presenta valores comprendidos entre un 15-20%. El caso de histéresis media presenta una dispersión considerable en

el cálculo de este parámetro, no permitiendo obtener un resultado consistente, alcanzando valores por sobre el 20 % dependiendo del nodo analizado.

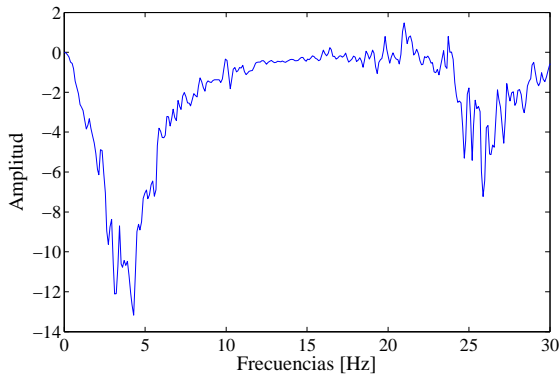
La notoria diferencia entre el amortiguamiento identificado y el asignado al modelo se asocia a la incorporación del comportamiento disipativo del sistema aislado, en la forma de un valor de amortiguamiento lineal viscoso equivalente.



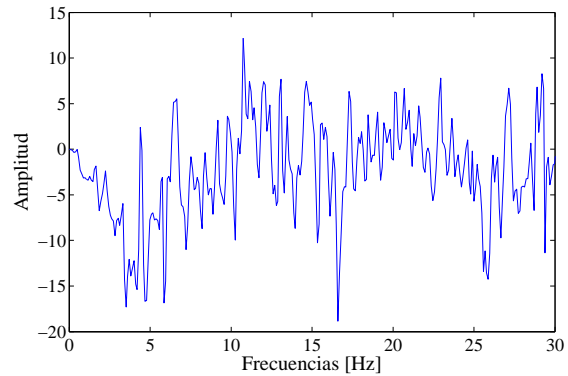
(a) FRF DX - nodo 19



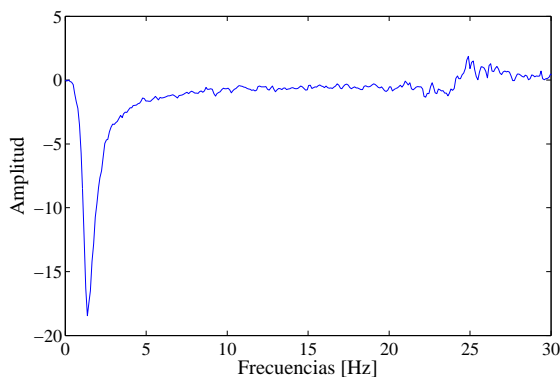
(b) FRF DX - nodo 18



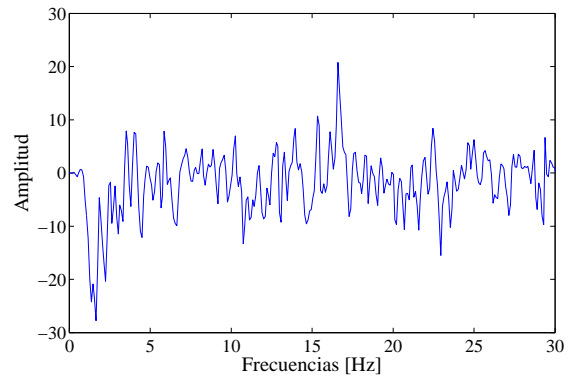
(c) FRF MX - nodo 41



(d) FRF MX - nodo 37



(e) FRF FX - nodo 45



(f) FRF FX - nodo 44

Figura 63: Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) de Modelo Simple de Base Aislada con Histéresis Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X, Modelo MSBA

La funciones de respuesta en frecuencia (FRF) obtenidas mediante los pares de registros de excitación y respuesta en un nodo determinado, utilizadas para la identificación de las formas modales de la estructura se muestran en la Figura 63. Las funciones muestran consistencia con los valores observados para los espectros de frecuencia, donde para los casos de histéresis débil (D) y media (M) exhiben valores similares de frecuencias, confirmando que en estos casos predomina un comportamiento asociado a la rigidez inicial.

Por otra parte, para el nivel histérico fuerte (F), solo es posible identificar un peak predominante asociado al primer modo de vibración cercano a los 1.36 Hz en ambas direcciones. Se observa que la forma de la FRF exhibe irregularidades en el uso de registros ubicados en nodos laterales (Figuras 63b-d-f) y una disminución en la amplitud asociada a los modos superiores con el aumento de no linealidad en la respuesta, indicando una baja participación de estos últimos y una mayor influencia del primer modo de vibración (Figuras 63a-c-e).

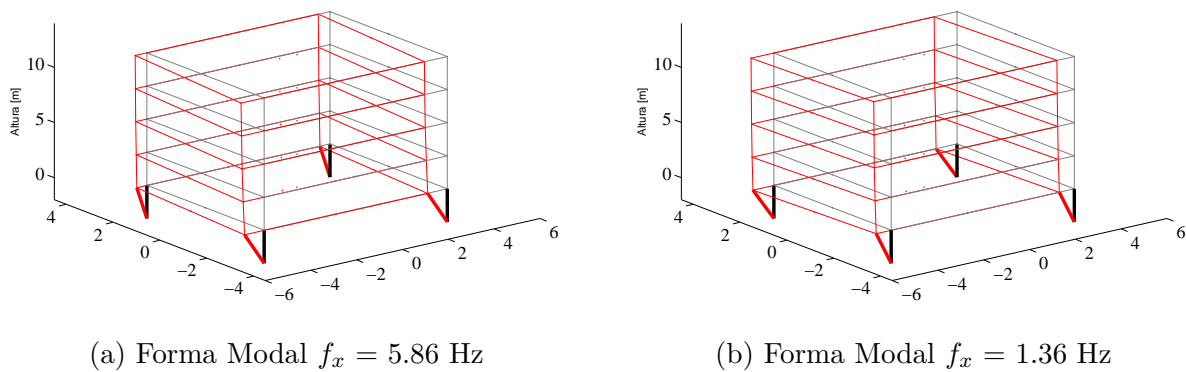
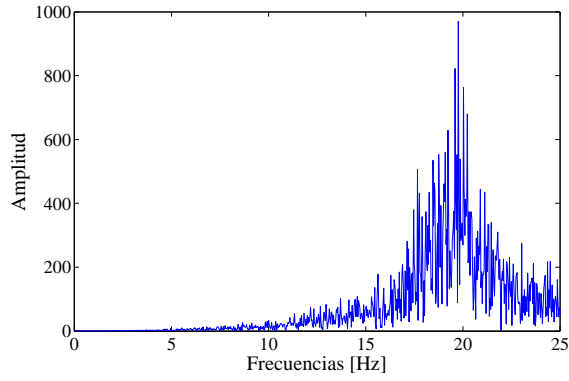


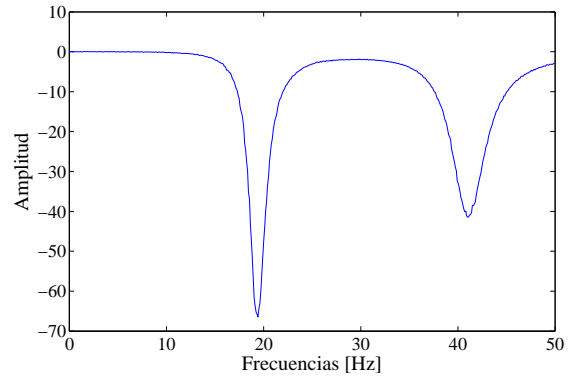
Figura 64: Formas Modales Identificadas con FRF en Modelo Simple de Base Aislada con Respuest: a) Débil y b) Extrema en dirección X, Modelo MSBA

La Figura 64 muestra las formas modales identificadas a partir de las FRF en la dirección X para los niveles de excitación débil y fuerte. Con el aumento aumento de no linealidad solo la forma modal asociada al primer modo de vibración es identificada de forma consistente mediante los registros ubicados en nodos centrales de la estructura. El método muestra ser eficiente cuando la respuesta de la estructura se encuentra en un nodo no afectado por la traslación generada por el movimiento rotacional en la base, permitiendo solo estimar formas modales traslacionales.

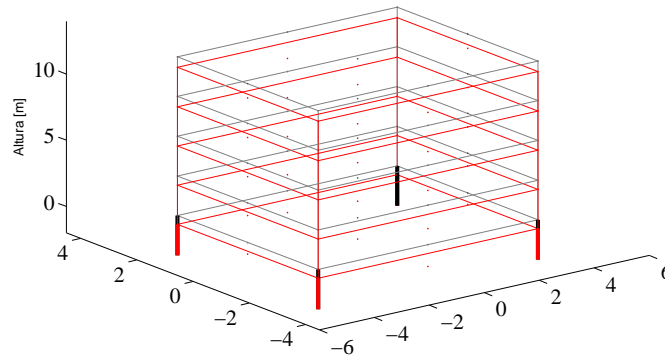
Un resumen comparativo de las propiedades modales identificadas para el modelo se muestra en la Tabla 18, al igual que una parte de los resultados obtenidos para la dirección vertical en la Figura 65, adjuntándose el resto en el Anexo D.



(a) Espectro PSD Vertical - Nodo 1



(b) FRF Vertical - Nodo 1



(c) Forma Modal $f_v = 19.5$ Hz

Figura 65: Propiedades Modales Identificadas en dirección vertical mediante PSD, Modelo MSBA

Tabla 18: Propiedades Modales Identificadas Modelo MSBA mediante PSD

Caso	Prop. reales k_i		Prop. reales k_{py}		Debil		Medio		Fuerte		
	dir	f [Hz]	dir	f [Hz]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]	
1	UY	5.03	UY	1.33	4.53	13.6-15.2	4.1	20.1	1.3-1.66	21.5-24.2	
2	UX	5.63	UX	1.34	5.16	11-13	5.1-5.3	18.2-21	1.34-1.66	17.94-23.2	
3	RZ	6.79	RZ	1.70	5.96	9	5.7	12.5	1.8	12.1	
4	UY	17	UY	15	15.46	5.1	16.5	6	14.7	5.22	
5	UZ	19.34	UZ	19.34	19.5	3-5.5	19.5	3-5.5	19.5	3-5.5	
β [%]	5										

4.4.2.2 Modelo MCAEA

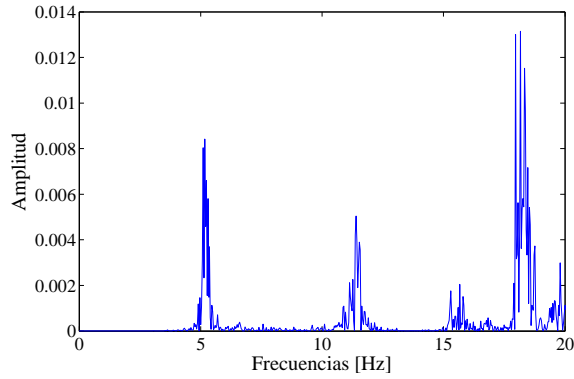
La identificación del modelo MCAEA exhibe valores de frecuencias consistentes con las propiedades calculadas mediante análisis modal. Al igual que en el caso del modelo MSBA, se identifican frecuencias del primer modo similares para los niveles de respuesta débil (D) y media (M), cercanas a los 5.11 Hz y 6.29 Hz en las direcciones X e Y respectivamente. Dichos modos se identifican aún cuando los desplazamientos a nivel de interfaz de aislación superan al de fluencia, presentando una amplitud notoriamente dependiente de la participación del modo en la posición del nodo seleccionado (Figura 66a-d).

Por otra parte, el caso de histéresis fuerte (F) muestra una disminución en el valor de la frecuencia fundamental de vibración hasta valores comprendidos entre los 1.9 - 2 Hz (Figura 66e-f). El comportamiento exhibido se asocia a la predominancia de los tramos definidos por la rigidez inicial y de post fluencia definiendo la curva histerética en la respuesta del sistema.

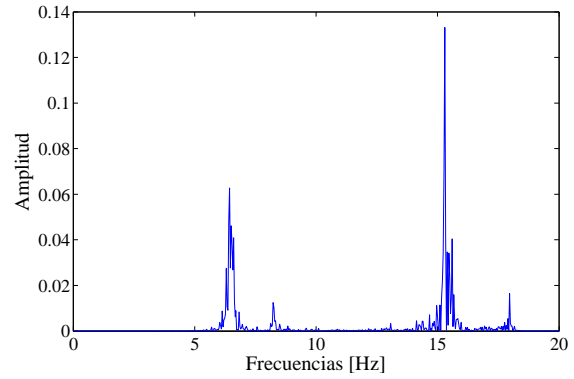
Una disminución en la energía del primer modo se presenta con el aumento de no linealidad entre los casos de histéresis débil (D) y medio (M), aumentando su ancho de banda respectivo debido a un incremento en el amortiguamiento del modo. Este comportamiento en el amortiguamiento se presenta con un mayor claridad en relación al exhibido en el modelo histerético de Bouc-Wen debido al carácter lineal elástico del tramo inicial de la curva histerética, lo cual permite estimar con mayor precisión el valor de amortiguamiento inicial definido para los modos en el modelo.

Por otra parte, los modos superiores no se ven mayormente afectados por el aumento de no linealidad. Sin embargo estos tienden a disminuir su energía y nivel de participación en la respuesta en relación al primer modo, el cual muestra una mayor amplitud en el estado histerético extremo, presentando un mayor grado de participación en la respuesta.

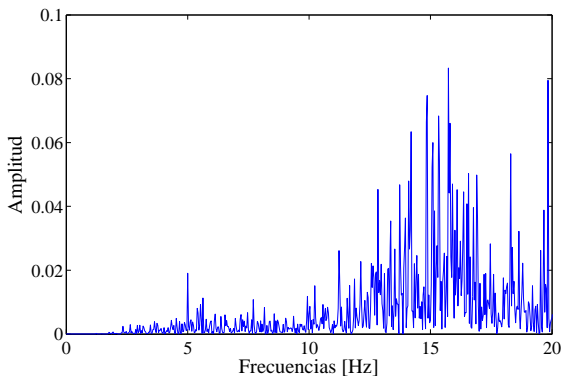
Se observa que los nodos 77-84 (centrales según X) y 95 (central según Y) identifican principalmente modos traslacionales en dichas direcciones. Mientras que el resto de los nodos permiten identificar modos rotacionales o de rocking. Aún así, la participación acoplada en 2 grados de libertad (principalmente UX-RY y UY-RX) en gran parte de los modos del modelo, permite la identificación de estos mediante los espectros de los registros asociados a más de una dirección traslacional, debido a que estos generan componentes de movimientos tanto en plano horizontal como en la dirección vertical, siendo observados en las Figuras 66 y 71.



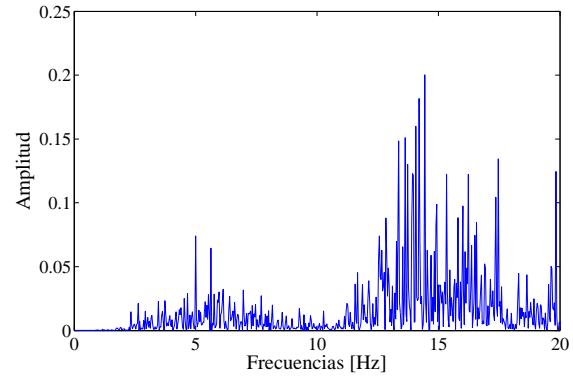
(a) Espectro PSD DX - nodo 77



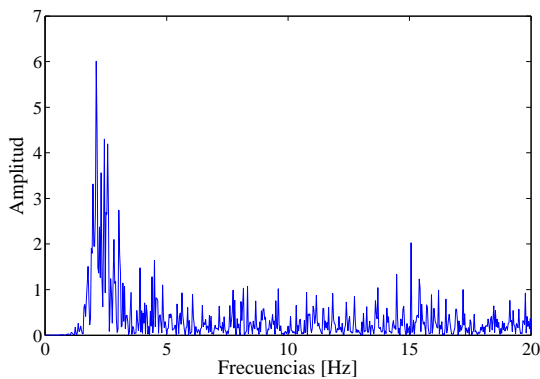
(b) Espectro PSD DY - nodo 77



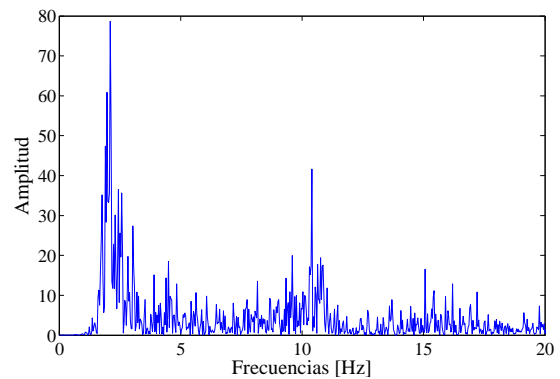
(c) Espectro PSD MX - nodo 95



(d) Espectro PSD MY - nodo 95



(e) Espectro PSD FX - nodo 95



(f) Espectro PSD FY - nodo 1458

Figura 66: Espectro PSD para Modelo MCAEA con Histéresis Débil (a-b), Medio (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X

Un aumento en el ancho de banda del primer modo en la transición desde el caso histerético débil al fuerte (Figura 67) provoca estimaciones del amortiguamiento crecientes en su valor, a diferencia de lo observado en el caso del modelo MSBA. Se estiman valores cercanos al 2 % mientras la respuesta se mantiene en el rango lineal elástico, siendo consistente con los valores asignados al modelo. Este aumenta hasta alrededor del 10 % para el caso de histéresis media

(M), y alcanza valores comprendidos entre el 20 y el 30 % para el caso histerético fuerte (F). Las frecuencias identificadas para los distintos niveles de no linealidad con los canales utilizados se muestran en la Figura 68a, donde se observa el comportamiento decreciente para el primer modo y valore similares para los modos superiores, los cuales no son mayormente afectados por el fenómeno histerético.

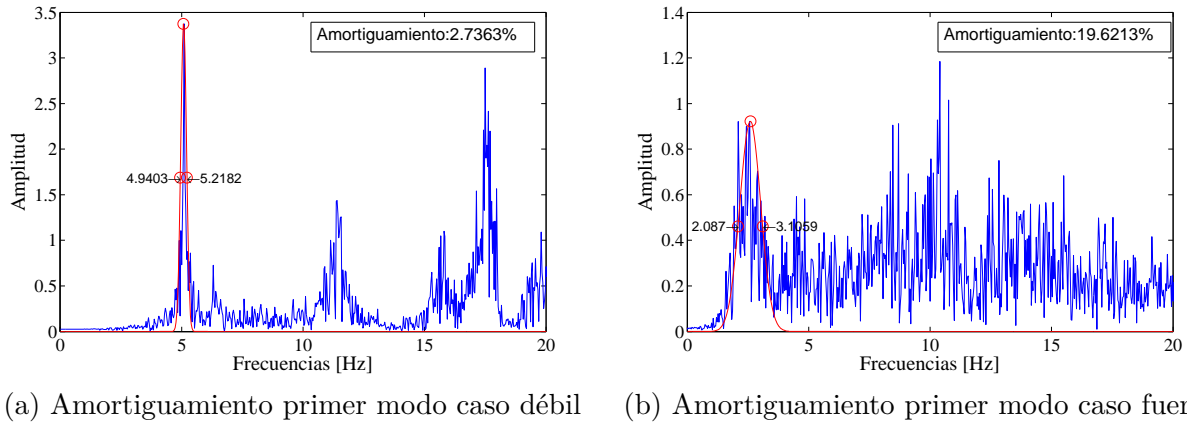


Figura 67: Calculo de Amortiguamientos basado en espectro de frecuencia PSD, Modelo MCAEA

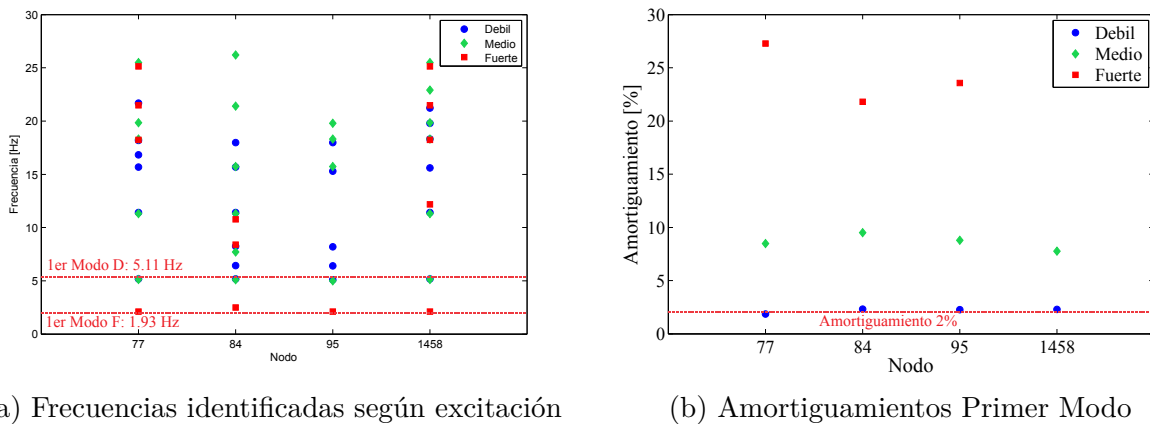


Figura 68: Resumen de a) frecuencias y b) amortiguamientos identificados con PSD en Modelo MCAEA con Histéresis Débil, Media y Extrema en dirección X

Las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) de los registros para cada caso se observan en la Figura 69, las que muestran consistencia con respecto a las frecuencias identificadas por los espectros PSD. Tanto el incremento en la no linealidad como el uso de nodos laterales producen irregularidades en su forma. Mientras que una amplitud predominante para el primer modo en relación a los modos superiores se obtiene en el caso histerético fuerte en los registros posicionados en nodos centrales.

Dada la condición de observación de la respuesta del sistema en solo 2 posiciones, las formas modales a identificar poseen una baja resolución, mostrándose algunas de estas en la Figura 70. La consistencia de las formas modales dependerá en gran parte de la posición del canal utilizado para la identificación, pudiendo obtener formas físicamente no coherentes como en el caso del par de nodos 77 y 95 (Figuras 70b-d).

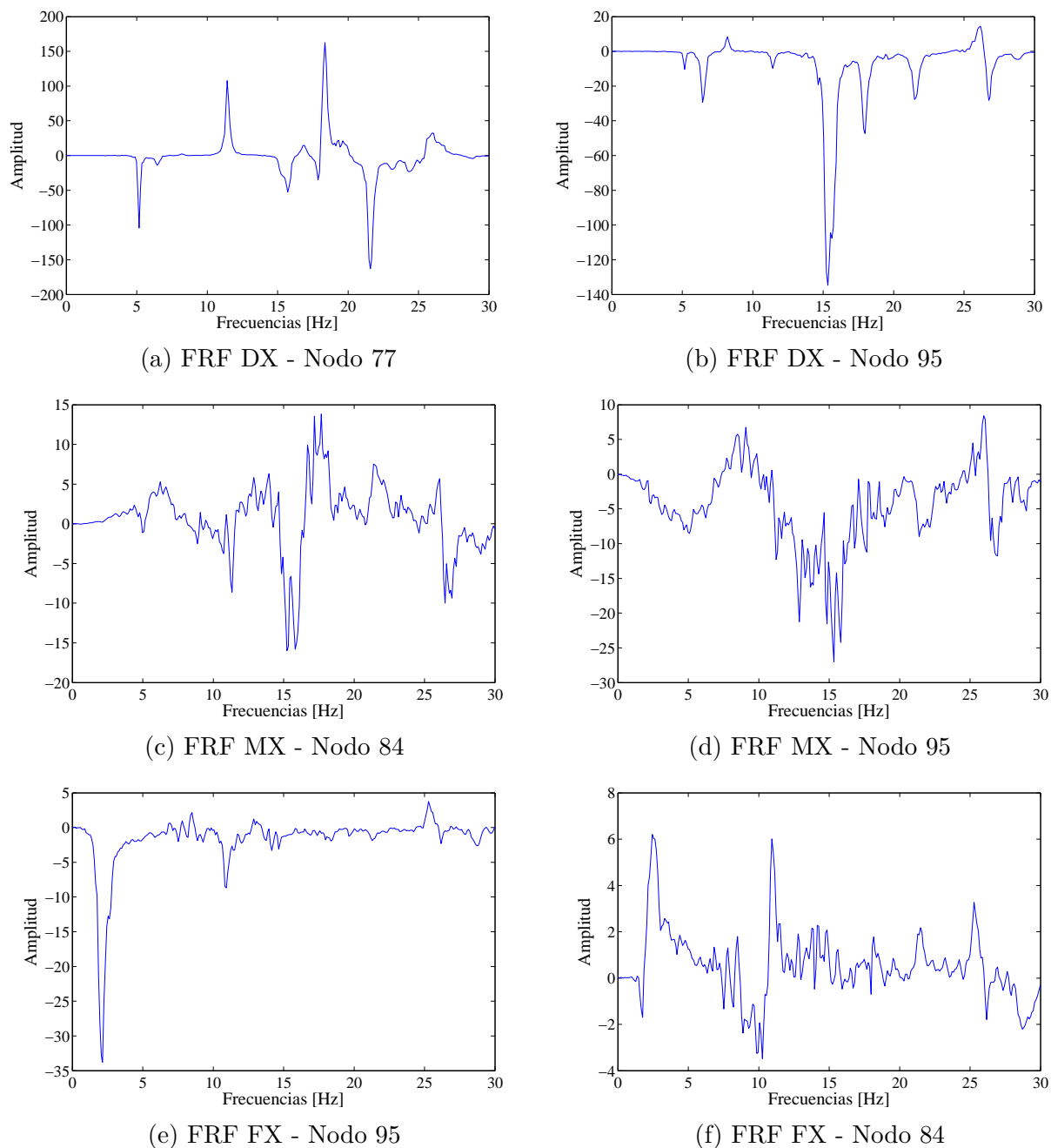


Figura 69: Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) de Modelo MCAEA con Histéresis Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X

Un resumen comparativo de las propiedades modales identificadas para el modelo MCAEA se muestra en la Tabla 19 mientras que algunos de los resultados para la identificación en la dirección vertical se muestra en la Figura 71, adjuntándose el resto de los resultados en el Anexo D.

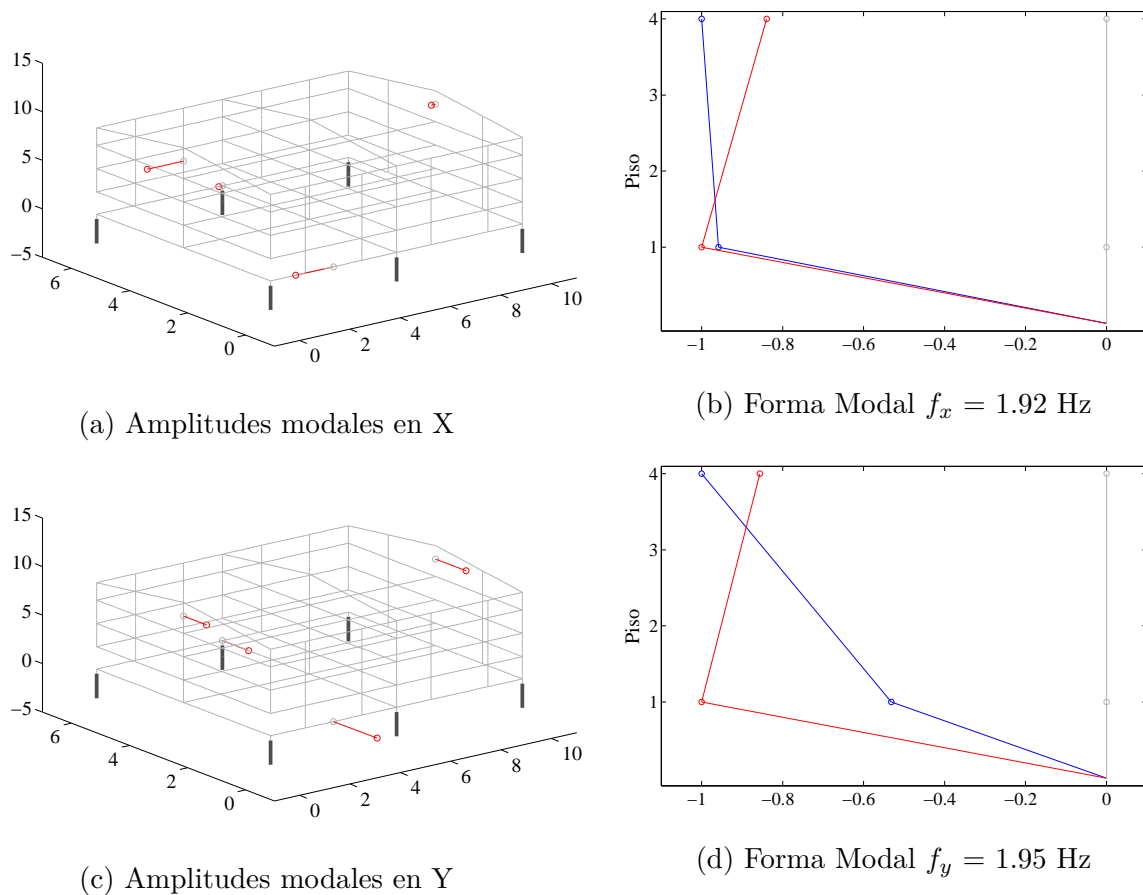
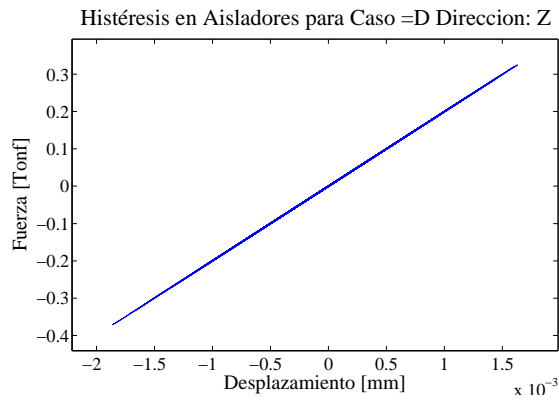


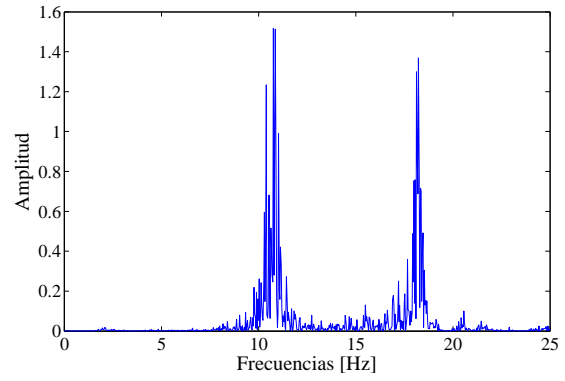
Figura 70: Formas Modales Identificadas con FRF en Modelo MCAEA con Histéresis: a) Débil, b) Media y c) Extrema, Dirección X

Tabla 19: Propiedades Modales Identificadas Modelo MCAEA mediante PSD

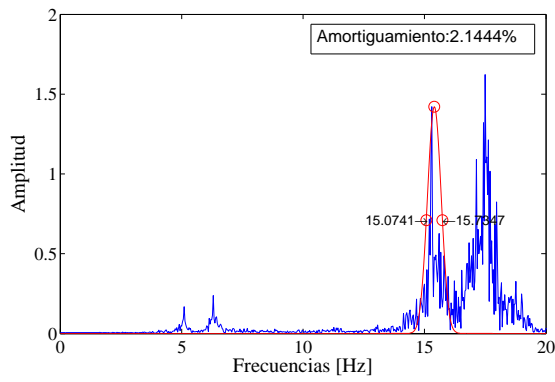
Caso	Prop. reales ki		Prop. reales kpy		Debil		Medio		Fuerte	
	dir	f [Hz]	dir	f [Hz]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]
1	UX/RX	5.11	UX	1.90	5.11	1.67	5.03	3.6	2.2-2.4	13.1-14.2
2	UY/RX	6.29	UY	1.93	6.3	3.92	5.43	11.7	2.1	9.56
3	RZ/UY	7.92	RZ	2.19	8.1	3.8	N/I	N/I	N/I	N/I
4	UX/RX	11.43	RY	8.08	11.43	2.1	11.43	1.7	8.6	6.4
5	UY/RX	15.25	RX	10.32	15.16*	2.5*	N/I	N/I	10.36*	2.89*
β [%]	2				*: Detectado con registro vertical					



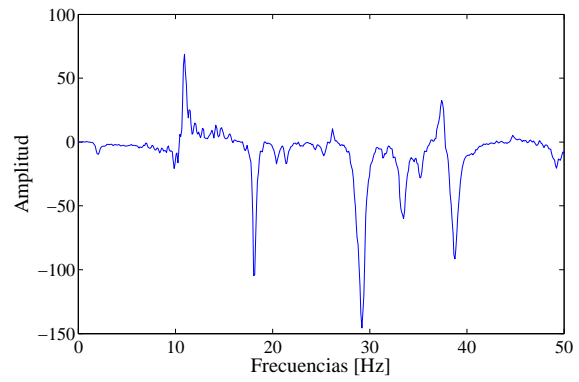
(a) Fuerza restitutiva vertical



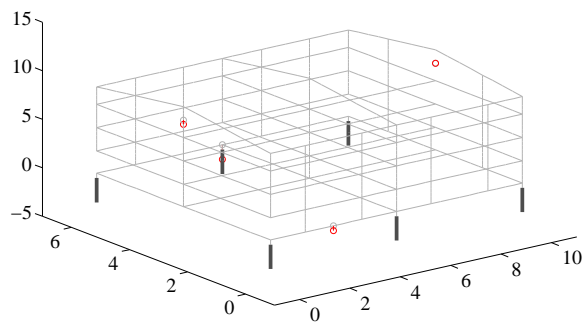
(b) Espectro PSD Vertical Nudo 1458



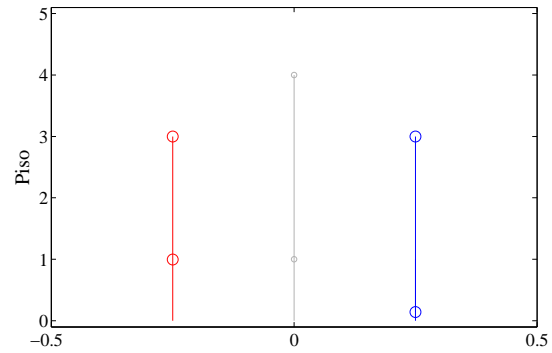
(c) Calculo Amortiguamiento Vertical



(d) FRF Vertical Nudo 1458



(e) Cálculo de amplitudes modales vertical



(f) Forma Modal Vertical $f_v = 17.5$ Hz

Figura 71: Propiedades modales identificadas en dirección vertical mediante PSD, Modelo MCAEA

4.4.3 IDENTIFICACION MEDIANTE MOESP - MV

Para llevar a cabo la identificación mediante MOESP - MW se consideró una duración de ventana de identificación de al menos 2 veces el período fundamental estimado para el modelo, con el objetivo de tomar en cuenta los datos de al menos 2 ciclos de vibración del modelo por ventana.

En este caso, los valores del período se conocen de antemano mediante análisis modal, considerando la rigidez inicial y de post-fluencia como rigideces efectivas, siendo $T = 0.2$ [seg] ($f \sim 5$ Hz) para el caso lineal y $T = 0.8$ [seg] ($f \sim 1.3$ [Hz]) en el caso no lineal. Estos períodos representan valores críticos para la elección de la longitud de ventana. En la práctica se pueden realizar estimaciones mediante técnicas no paramétricas como PSD para escoger un tamaño de ventana apropiado. Para los resultados mostrados se utilizó una ventana de $T_w = 4$ [seg] con un 90 % de traslapo entre ventanas sucesivas.

Los hiperparámetros tales como el amortiguamiento admisible, los valores límites para las diferencias porcentuales entre frecuencias, amortiguamientos y razones MAC en las formas modales de cada polo, los anchos del bin y cantidad de polos estables por bin del histograma fueron escogidos basados en valores estándar para los casos con un menor nivel de no linealidad. Mientras que con el aumento de la misma, se escogen valores con un menor grado de restricción, debido a la pérdida en la estabilidad de las columnas de los diagramas con el aumento de no linealidad en el sistema, con el objetivo de detectar una mayor cantidad de polos estables, presentando dichos valores en la Tabla 20.

Tabla 20: Parámetros escogidos para identificación con MOESP-MW

Casos	Parámetros Identificación con $T_w = 4$ [seg]					
	β_{max}	Δf	$\Delta \beta$	ΔMAC	c_{bin}	w_{bin}
Histéresis Débil	30	0.05	0.1	0.25	4-5	0.2-0.4
Histéresis Media y Fuerte	80-100	0.1	0.2	0.7	4	0.4
Lineal Vertical	10	0.01	0.08	0.02	5	0.2

Además se seleccionó un umbral de $MPC = 0.7$ con el objetivo de descartar aquellos modos locales con un valor bajo este límite. El amortiguamiento admisible se escoge basado en el comportamiento creciente que presenta este parámetro al incorporar el fenómeno histerético. Mientras que el resto de los parámetros fueron seleccionados a partir de la calidad de los resultados obtenidos y la capacidad de discriminar los modos físicos de los espurios en la identificación, siendo el ancho de bin w_{bin} y la cantidad de polos estables por bin c_{bin} los parámetros respecto a los cuales los resultados presentan una mayor variabilidad.

4.4.3.1 Modelo MSBA

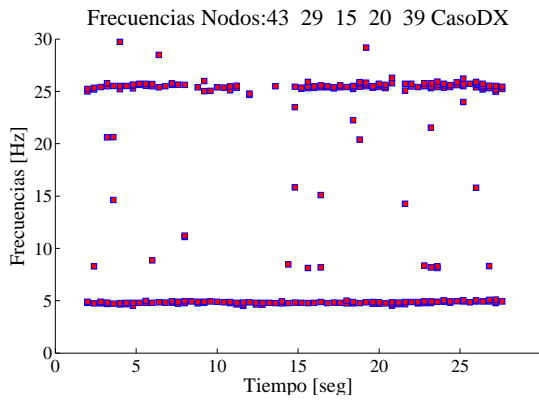
Las Figuras 72 - 73 muestran las frecuencias y amortiguamientos identificados en el modelo MSBA, para los distintos niveles de no linealidad en la respuesta, correspondiendo a los resultados obtenidos mediante el uso de nodos centrales del modelo.

Se observa que para los niveles de respuesta débil (D) y medio (M), los valores de las frecuencias del primer modo se encuentran en un rango entre los 4-5 Hz, presentando una mayor diferencia entre casos en comparación a lo observado en PSD. Dichos modos se encuentran principalmente diferenciados por el amortiguamiento identificado, el cual aumenta desde un 20-25 % (muy superior al 5 % asignado en el modelo, pero consistente con el comportamiento observado para el modelo histérico de Bouc-Wen) hasta un 40 % aproximadamente para el caso de histéresis media.

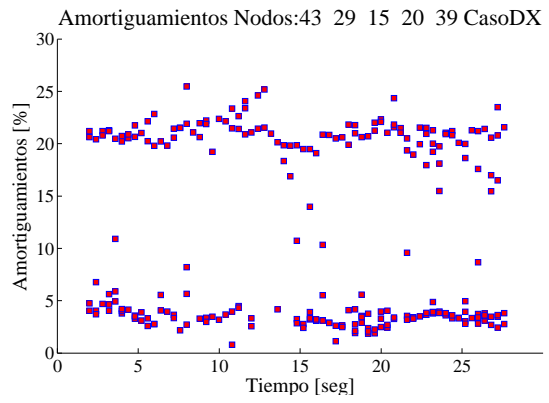
Para el caso de histéresis fuerte (F), se detecta una disminución en la frecuencia del primer modo en relación a los casos anteriores, identificando un valor aproximado de 1.3 [Hz], con un amortiguamiento comprendido entre el 20-40 % en cada dirección, lo que responde a una respuesta dominada por la rigidez post-fluencia del modelo de histéresis al presentar un nivel elevado de no linealidad en el sistema.

Los valores identificados para los modos superiores, presentan cambios menores con el aumento de no linealidad, mostrando frecuencias cercanas a los 25 Hz en la dirección X y dos modos entre los 15-16 Hz y 28 Hz en la dirección Y. Estos modos se encuentran asociados a valores de amortiguamiento cercanos al 5 %, siendo coherente con las propiedades del modelo numérico y confirmando que la ocurrencia del fenómeno histérico no afecta mayormente las propiedades modales correspondientes a los modos superiores.

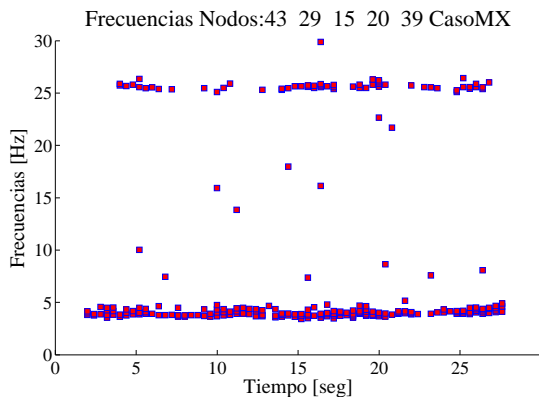
Al tratarse de un procedimiento de identificación “vectorial”, el método puede incorporar un conjunto de registros de aceleración asociadas a distintas direcciones y ubicaciones del modelo en estudio, permitiendo efectuar la identificación de las mismas propiedades modales obtenidas tanto en las direcciones traslacionales como rotacionales, como se muestra en la Figura 74. Con esta condición, el método no resulta tan sensible a la ubicación de los registros como en el caso de los procedimientos con entrada y salida única, produciendo menor variabilidad en los resultados en comparación a aquellos obtenidos mediante el uso de registros en una sola dirección (Figura 75).



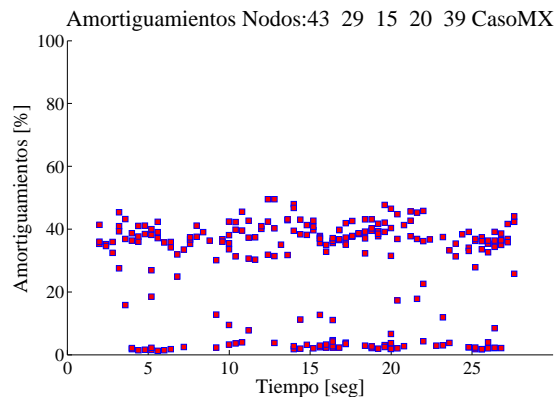
(a) Frecuencias Caso DX



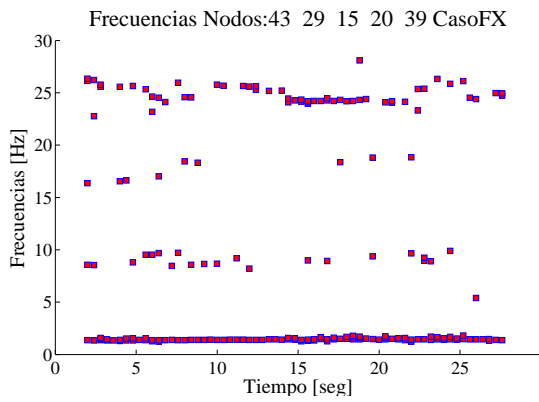
(b) Amortiguamientos Caso DX



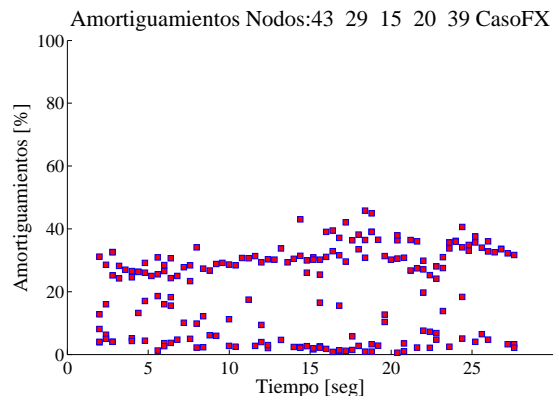
(c) Frecuencias Caso MX



(d) Amortiguamientos Caso MX

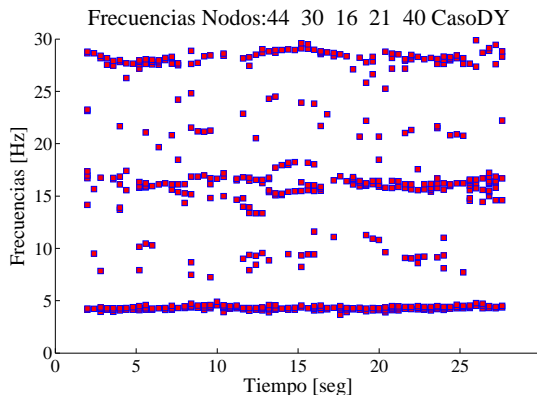


(e) Frecuencias Caso FX

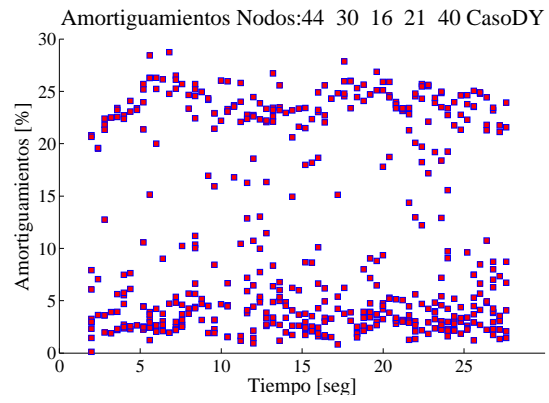


(f) Amortiguamientos Caso FX

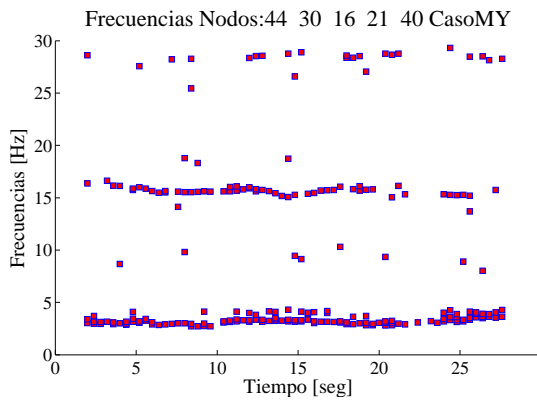
Figura 72: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X, Nodos Centrales



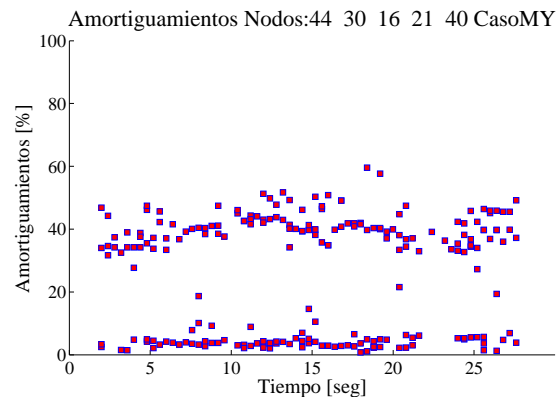
(a) Frecuencias Caso DY



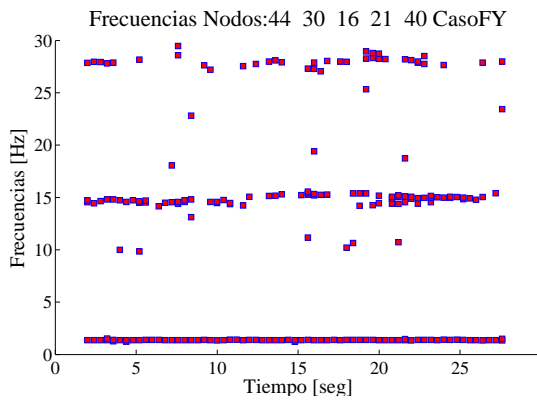
(b) Amortiguamientos Caso DY



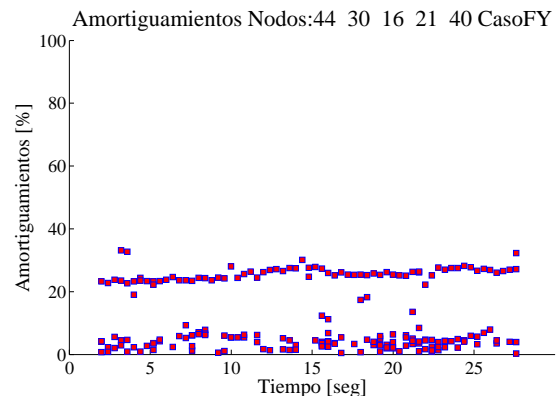
(c) Frecuencias Caso MY



(d) Amortiguamientos Caso MY

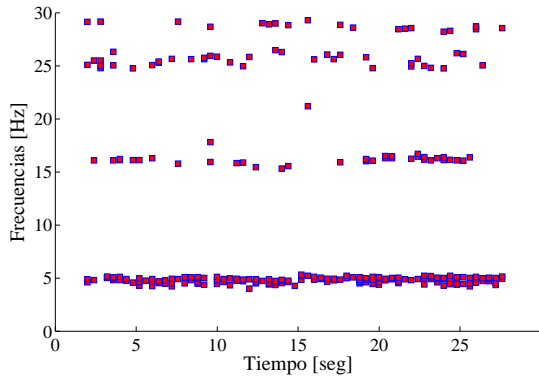


(e) Frecuencias Caso FY

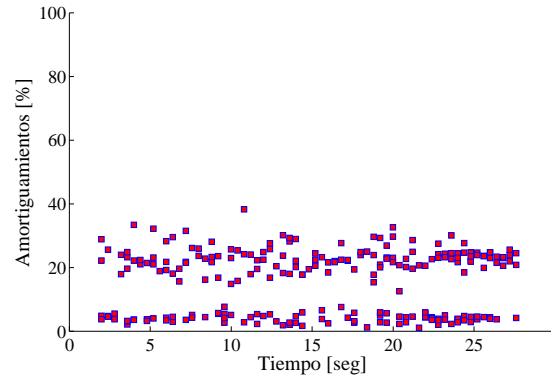


(f) Amortiguamientos Caso FY

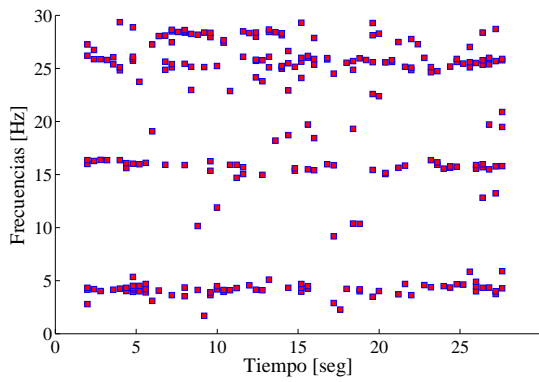
Figura 73: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección Y, Nodos Centrales



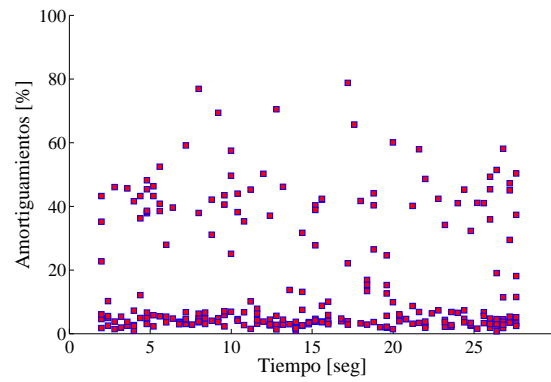
(a) Frecuencias Caso D X-Y



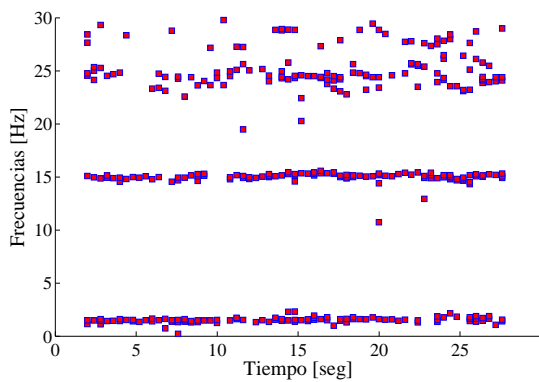
(b) Amortiguamientos Caso D X-Y



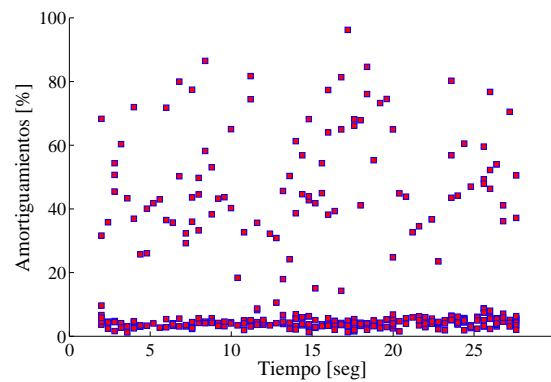
(c) Frecuencias Caso M X-Y



(d) Amortiguamientos Caso M X-Y



(e) Frecuencias Caso F X-Y



(f) Amortiguamientos Caso F X-Y

Figura 74: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X-Y, Nodos centrales y laterales

Para una identificación unidireccional, llevada a cabo mediante un grupo de registros ubicados en un subconjunto de nodos del sistema, se obtienen dos tipos de resultados con respecto a las frecuencias y amortiguamientos encontrados. En el primer caso, el uso de nodos centrales favorece la identificación de las propiedades principalmente traslacionales como la que se muestran en la Figura 75a-b, la cuales muestran un notorio cambio en la frecuencia del primer modo, presentando un amortiguamiento superior al 20 % variando con el nivel de no linealidad.

Por otra parte, el uso de nodos laterales, permite la identificación de propiedades rotacionales del modelo, como se muestra en la Figura 75c-d, donde se presenta una frecuencia comprendida entre los 6.5 - 6.9 Hz (la frecuencia rotacional del modelo corresponde a $f_{rz} = 6.79$ Hz) asociada a un amortiguamiento menor al 10 %. El uso de esta configuración particular de nodos produce que la identificación de este modo resulte mas dificultosa con el aumento de no linealidad del modelo, en comparación a la obtenida mediante la identificación con registros en múltiples direcciones.

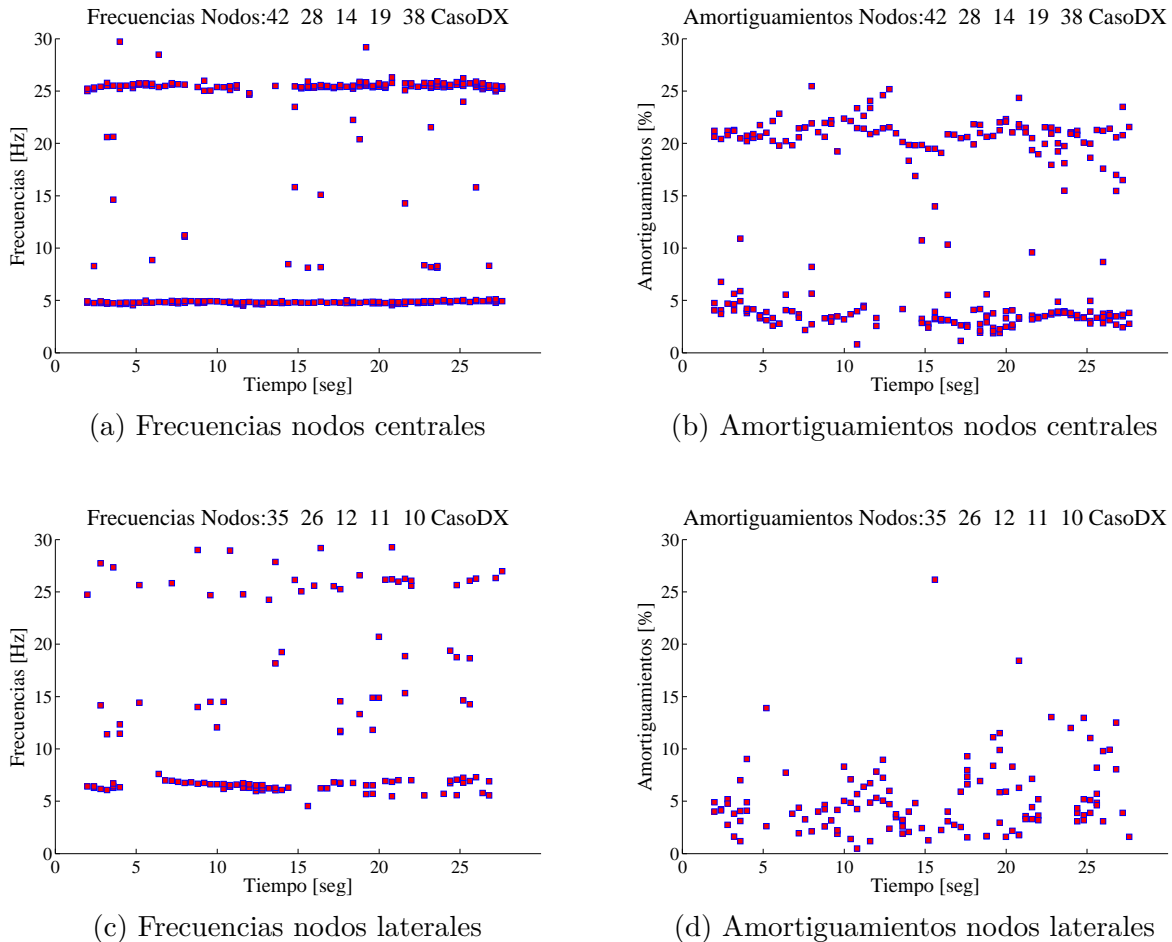
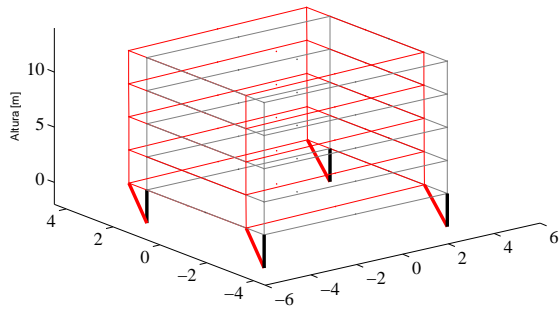
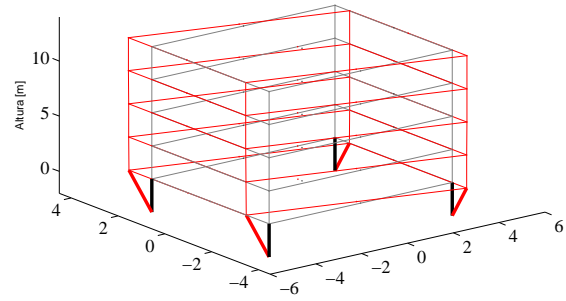


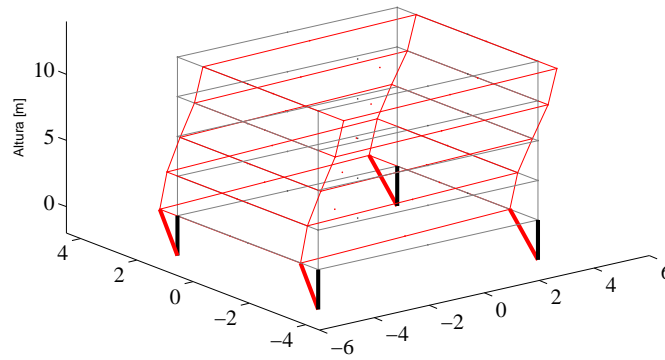
Figura 75: Variación de desempeño en identificación con ubicación de nodos en MOESPMV



(a) Forma modal $f_y = 1.3$ Hz



(b) Forma modal $f_{rz} = 1.75$ Hz



(c) Forma modal $f_y = 15.2$ Hz

Figura 76: Formas Modales Identificadas con MOESP-MV en Modelo Simple de Base Aislada con Respuesta Fuerte, Dirección Y

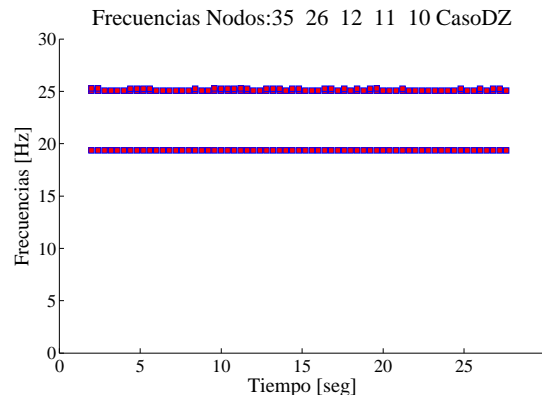
Las Figuras 76a y 76c muestran las formas modales identificadas con los registros de respuesta en la dirección Y, para el nivel de excitación fuerte con MOESP-MV. Al ser un algoritmo vectorial, este permite identificar las formas modales rotacionales mediante la incorporación de los registros en ambas direcciones horizontales (Figura 76-b) mostrando cierta ventaja en comparación a los algoritmos de entrada y salida única.

Aún así, gran parte de las propiedades modales estimadas mediante distintas ventanas en el mismo registro no muestran una consistencia clara en la obtención de las formas modales cuando el nivel de no linealidad aumenta, quedando limitada su identificación parcialmente al conocimiento previo de la forma por parte del usuario y a una elección adecuada de los parámetros iniciales del método.

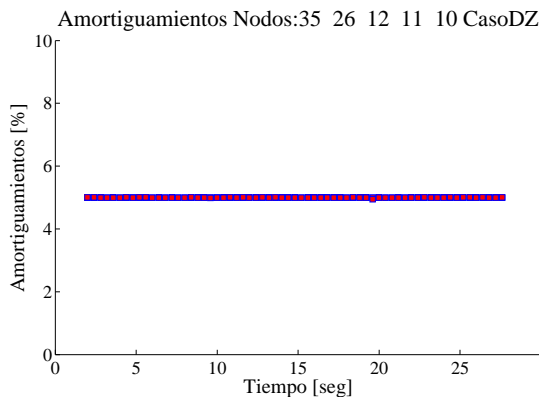
Un resumen de las propiedades modales identificadas se muestra en la Tabla 21. Por otra parte, algunos de los resultados obtenidos mediante el uso de registros verticales se muestran en la Figura 77, adjuntándose el resto de los resultados en el Anexo D.



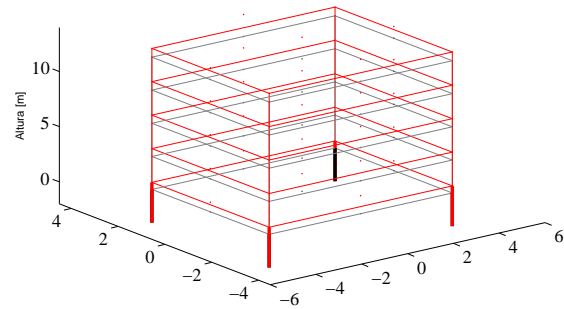
(a) Fuerza Restitutiva en dirección vertical



(b) Frecuencias modos verticales



(c) Amortiguamientos modos verticales



(d) Forma modal $f_v = 19.4$ Hz

Figura 77: Propiedades modales identificadas mediante MOESP-MW con registros verticales, Modelo MSBA

Tabla 21: Propiedades Modales Identificadas Modelo MSBA mediante MOESP-MW

Caso	Prop. reales k_i		Prop. reales k_{py}		Debil		Medio		Fuerte	
	dir	f [Hz]	dir	f [Hz]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]
1	UY	5.03	UY	1.33	4-4.4	20-27	2.8-3.8	32-46	1.34-1.4	23-28
2	UX	5.63	UX	1.34	4.6-5	20-23	3.6-4.6	35-45	1.34-1.5	25-40
3	RZ	6.79	RZ	1.70	6-7	2-6	N/I	N/I	N/I	N/I
4	UY	17	UY	15	15.5-16.7	2-7	15.2-16.2	2-6	14.3-15.5	2-6
5	UZ	19.34	UZ	19.34	19.35	5	19.35	5	19.35	5
β [%]	5				N/I: No identificado					

4.4.3.2 Modelo MCAEA

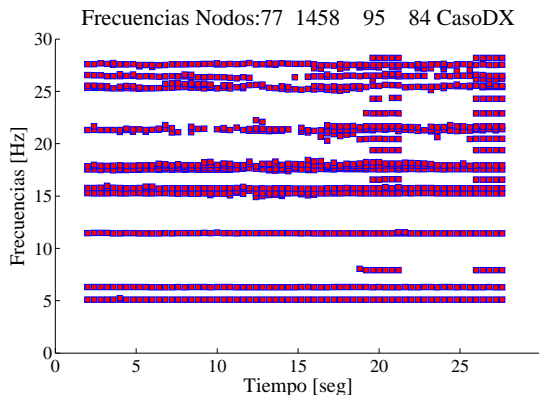
Las frecuencias identificadas muestran un valor cercano a los 5.1 [Hz] para el primer modo horizontal en la dirección X del modelo, para los casos histéreticos débil (D) y medio (M), los cuales quedan diferenciados por el amortiguamiento correspondiente, donde el primer caso muestra valores del orden del 2-3 %, obedeciendo a un comportamiento que se mantiene en el rango lineal elástico. Mientras que el segundo caso muestra un aumento, alcanzando valores comprendidos entre el 5-10 %, dando cuenta de la ocurrencia de un comportamiento histéretico en el modelo (Figura 78a-d)).

Por otra parte, la identificación para el caso de histéresis fuerte exhibe una frecuencia menor para el primer modo en comparación a los casos anteriores, alcanzando los 2.1 Hz, con un amortiguamiento acotado entre un 10 - 20 %, indicando la predominancia la rama de histéresis asociada al comportamiento de post-fluencia (Figura 78e-f).

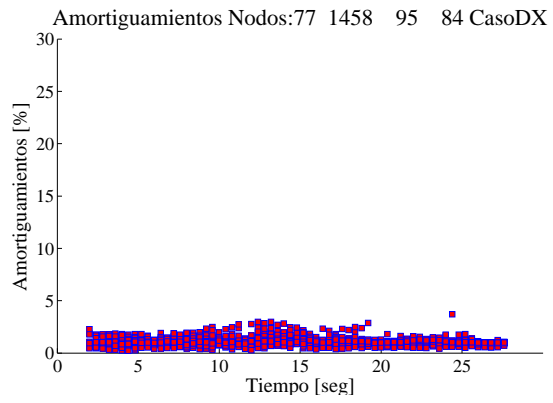
También se observa que en el caso de respuesta ante excitaciones débiles, el método logra identificar de forma precisa todas las frecuencias que corresponden a los modos con componentes predominantes en las direcciones ortogonales, respecto a las del registro utilizado. Esto se debe a que todos los modos del modelo, poseen componentes acopladas en las distintas direcciones (principalmente en UX-RY, UY-RX), siendo posible identificar frecuencias no asociadas solamente a la dirección de análisis. Sin embargo, lo anterior cambia con el aumento de no linealidad, en donde gran parte de los modos identificados predomina en la dirección del registro.

En el caso particular del modelo, la identificación en la dirección X presenta resultados con mejor resolución en relación a los expuestos para la dirección Y, principalmente para el caso de histéresis media (M). Lo anterior se asocia a la ubicación de los registros utilizados, los cuales se encuentra en la zona lateral de la dirección mas larga del edificio, viéndose favorecido el movimiento en esta dirección en dicho caso. Aún así, el nivel de excitación aplicada al modelo permite identificar modos rotacionales y verticales, asociados a movimientos de cabeceo o “rocking” de los modos superiores.

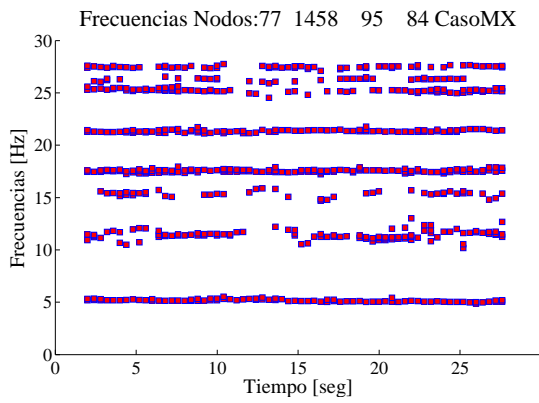
Como es de esperarse, los modos superiores no sufren mayores cambios en sus valores con el aumento de no linealidad en la estructura, tendiendo solo a una disminución menor cuando estos presentan una componente modal horizontal predominante. Los resultados mostrados en las Figuras 78 y 79 corresponden a una identificación unidireccional utilizando 4 nodos (2 centrales y 2 laterales), encontrándose los valores de las propiedades identificadas en la Tabla 22.



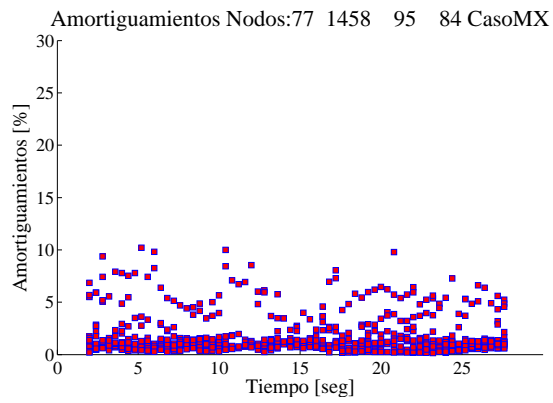
(a) Frecuencias Caso DX



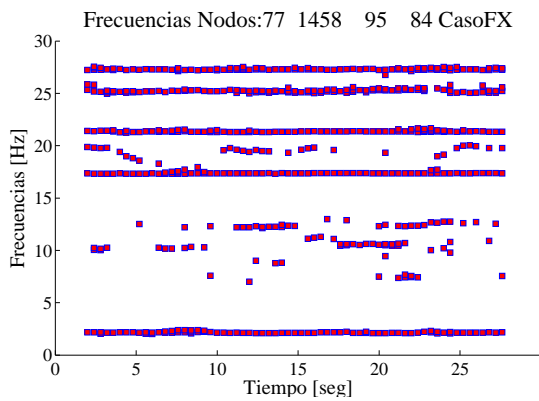
(b) Amortiguamientos Caso DX



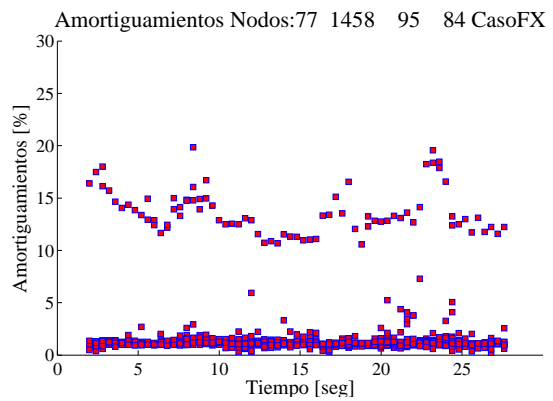
(c) Frecuencias Caso MX



(d) Amortiguamientos Caso MX

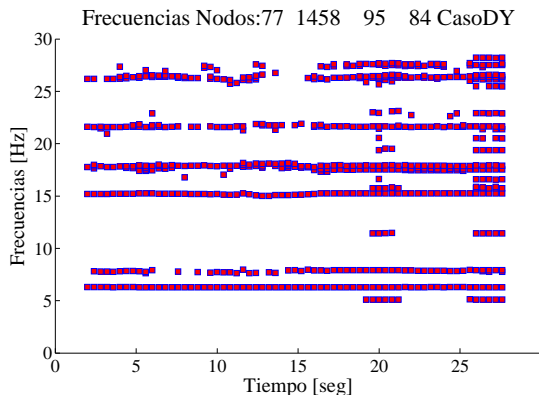


(e) Frecuencias Caso FX

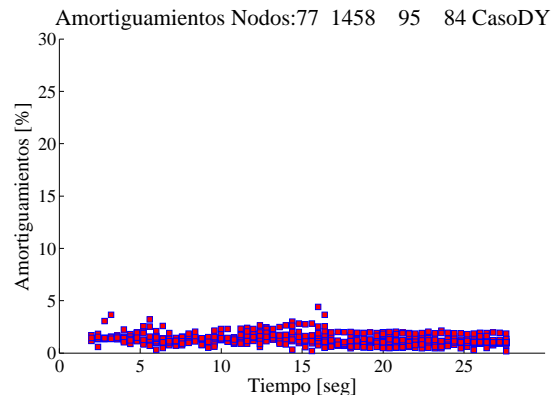


(f) Amortiguamientos Caso FX

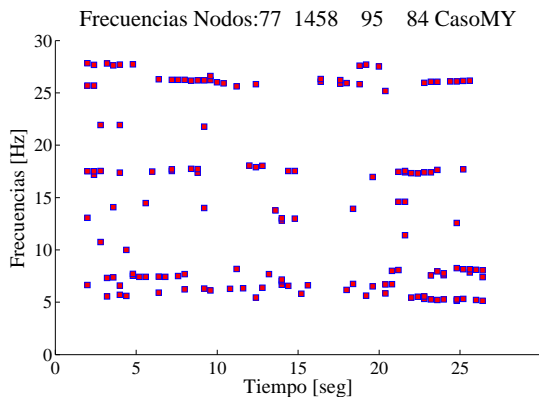
Figura 78: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MCAEA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X



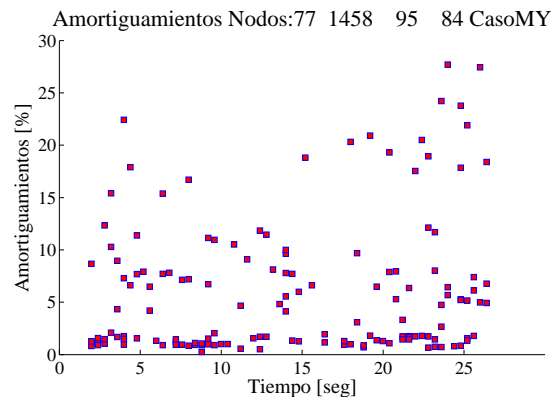
(a) Frecuencias Caso DX



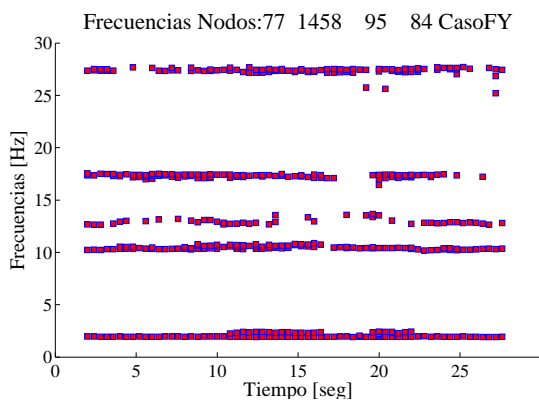
(b) Amortiguamientos Caso DY



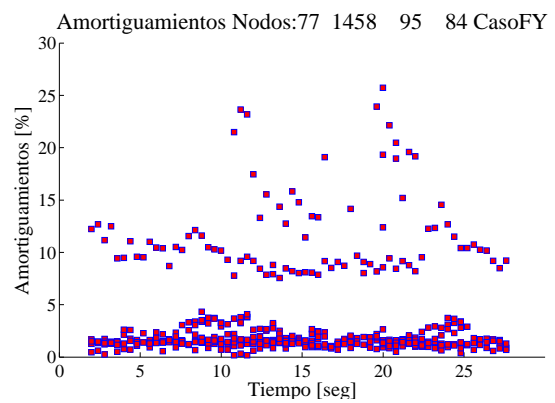
(c) Frecuencias Caso MY



(d) Amortiguamientos Caso MY

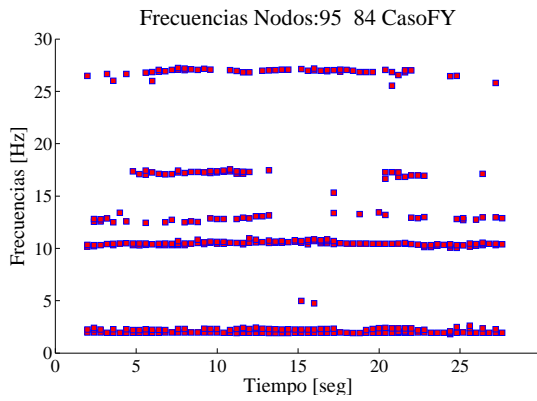


(e) Frecuencias Caso FY

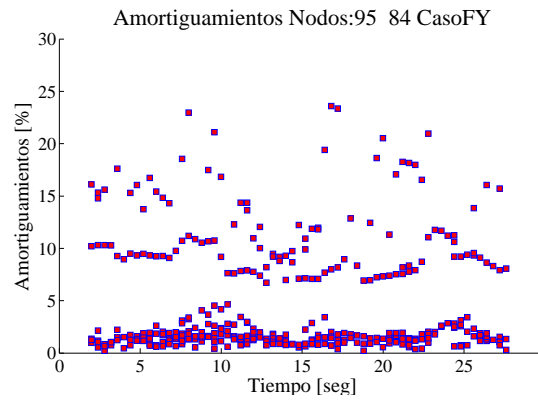


(f) Amortiguamientos Caso FY

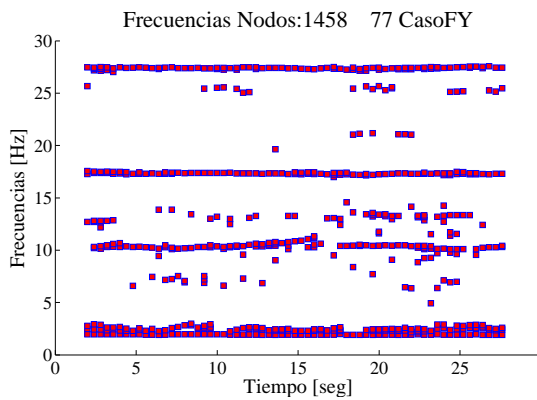
Figura 79: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con MOESP-MV en Modelo MCAEA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección Y



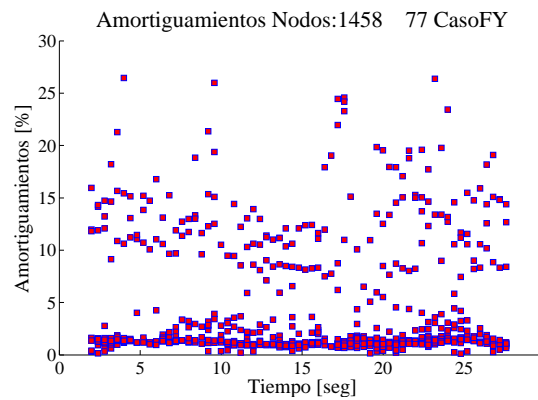
(a) Frecuencias caso FY, nodos 84-95



(b) Amortiguamientos caso FY, nodos 84-95



(c) Frecuencias caso FY, nodos 77-1458

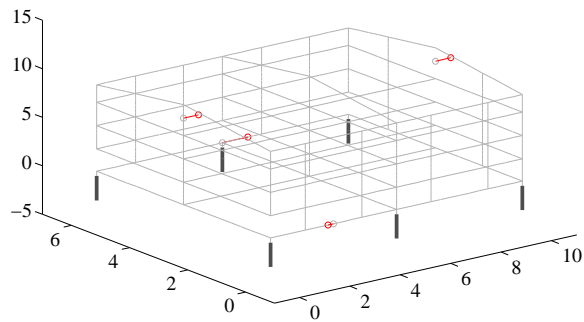


(d) Amortiguamientos caso FY, nodos 77-1458

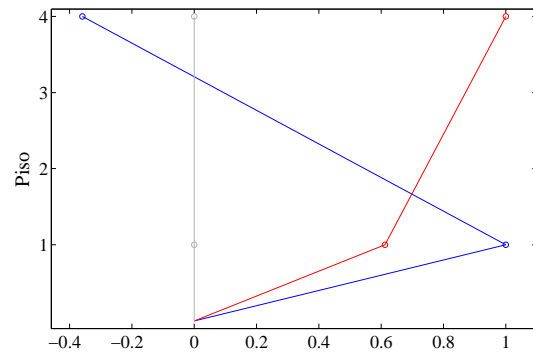
Figura 80: Variación de desempeño en identificación mediante MOESPMV con distintos pares de nodos, Modelo MCAEA

La identificación unidireccional mediante dos nodos muestra resultados satisfactorios, presentando una diferencia principalmente en la capacidad de estimación de modos superiores, debido a las posiciones de los registros utilizados (Figura 80). Sin embargo, en ambos se observa la presencia del primer modo en forma consistente, exhibiendo el comportamiento esperado para el amortiguamiento de dicho modo en el caso histerético fuerte (F), tendiendo a un aumento comprendido entre el 10-20 %, rango obtenido anteriormente para la identificación con 4 nodos.

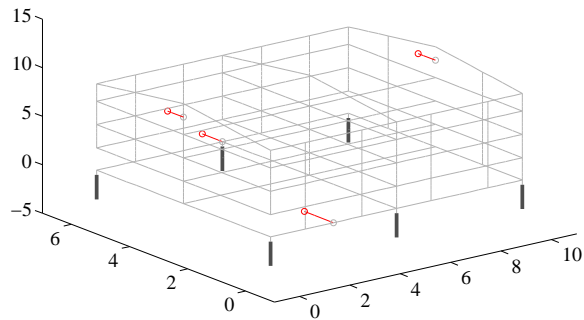
Por otra parte, la resolución de las formas modales identificadas queda fuertemente limitada por el número de registros disponibles. Sin embargo es posible obtener una estimación de la forma modal asociada al primer modo como se observa en la Figura 81. Aún así, los resultados quedan sujetos al desempeño del método con el aumento de la no linealidad y a la ubicación de registros utilizados, pudiendo obtener en un gran número de ventanas formas modales no coherentes físicamente, como en el caso de los nodos 77 y 95 (Figura 81b).



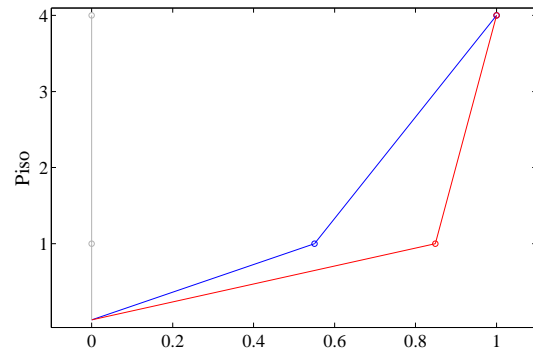
(a) Amplitudes de forma modal en X



(b) Forma Modal $f_x = 1.93$ Hz



(c) Amplitudes de forma modal en Y

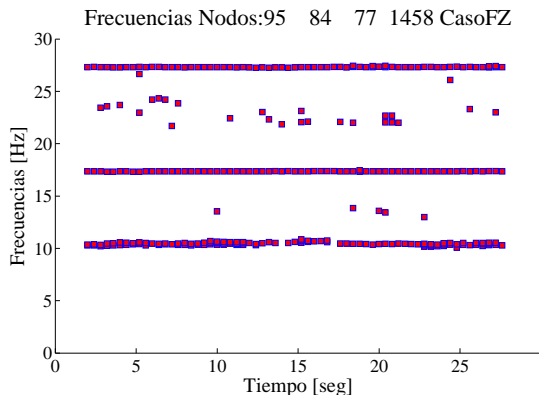


(d) Forma Modal $f_y = 1.9$ Hz

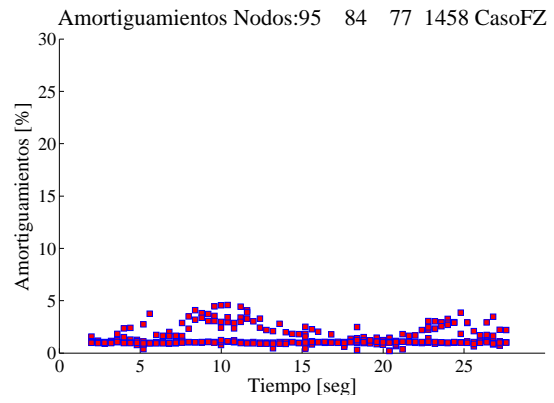
Figura 81: Formas Modales Identificadas con MOESP-MV en Modelo MCAEA con Histéresis: a) Débil (Lineal), b) Media y c) Extrema, Dirección X

Los propiedades modales obtenidas mediante los registros de aceleración vertical se muestran en la Figura 82. En esta se observa una estimación efectiva debido al comportamiento lineal del modelo definido en dicha dirección, identificando frecuencias correspondientes a modos con componentes acopladas en 11.5, 17 y 27 Hz, con amortiguamientos menores al 5 %. También se obtienen formas modales consistentes con las amplitudes esperadas para la forma modal completa, pero presentando una baja resolución.

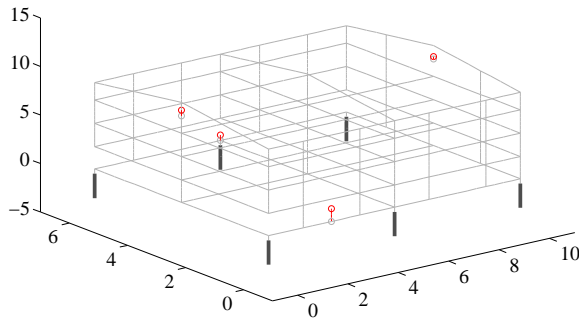
Un resumen comparativo de las propiedades modales identificadas para el modelo se muestra en la Tabla 22, mientras que el resto de los resultados se adjunta en el Anexo D.



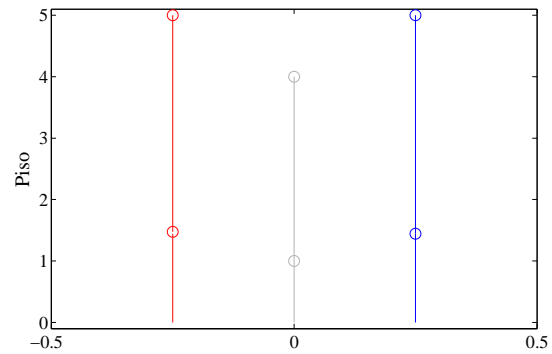
(a) Frecuencias identificadas



(b) Amortiguamientos identificados



(c) Amplitudes de forma modal vertical



(d) Forma Modal $f_v = 17.5$ Hz

Figura 82: Propiedades modales identificadas con registros verticales mediante MOESP-MW, Modelo MCAEA

Tabla 22: Propiedades Modales Identificadas Modelo MCAEA mediante MOESP-MW

Caso	Prop. reales ki		Prop. reales kpy		Debil		Medio		Fuerte		
	dir	f [Hz]	dir	f [Hz]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]	
1	UX/RY	5.11	UX	1.90	5.11	0.5-2	5-5.3	5-9	1.9-2.1	11-17	
2	UY/RX	6.29	UY	1.93	6.28	0.5-2	5.2-6.5	6-11	1.93	8-20	
3	RZ/UY	7.92	RZ	2.19	7.92	0.5-2	7.4-8.2	0.7-2	2.3-2.5	1-2	
4	UX/RY	11.43	RY	8.08	11.43	0.5-2	11.2-11.8	0.4-1.8	7.1-7.7	0.5-2.5	
5	UY/RX	15.25	RX	10.32	15.26	0.5-2	15-15.6	0.4-2	10.1-10.8	0.5-2.5	
β [%]	2										

4.4.4 - IDENTIFICACION MEDIANTE RPEM- λ

El método RPEM identifica las propiedades modales de un sistema a partir de la selección de un modelo polinomial ARX ($n_c = 0$) o ARMAX ($n_c \geq 1$) comprendido dentro de un grupo de candidatos que se definen mediante un rango de ordenes del sistema.

En la obtención de los resultados mostrados se consideran los rangos $n_a = n_b = 15:5:30$ para el modelo MSBA y $n_a = n_b = 15:5:60$ para el modelo MCAEA, con $n_c = 0:3$. Además se emplea un factor de olvido $\lambda = 0.995$ y una covarianza inicial de coeficientes alta $P = 10^5$. Los últimos dos parámetros proveen de la capacidad de “tracking” al algoritmo y asumen un no conocimiento a priori de los coeficientes polinomiales iniciales θ_0 , los cuales se definen como nulos.

Al tratarse de un método “escalar”, el procedimiento aplicado a los distintos canales de observación puede detectar diferentes ordenes para el polinomio autorregresivo $A(q)$, el cual se selecciona basado en los criterios AIC, BIC y FPE detallados en el Capítulo II. El número de modos estimados se asocia al orden de dicho polinomio de la forma $n_{modos} = n_a/2$.

Sin embargo el método a priori no discrimina entre modos físicos y numéricos, por lo que se recurre a la definición de rangos admisibles y restricciones del sistema para la identificación de sus propiedades modales. Para los sistemas en estudio se definen los siguientes

$$1) f \in [0, 30] \text{ Hz} \quad 2) \beta \in [0, 80] \% \quad 3) \bar{\beta}_1 \geq \bar{\beta}_{lim} > \bar{\beta}_i \quad \forall i \neq 1$$

Los primeros dos corresponden a rangos de interés de los parámetros a identificar, limitándose el análisis para frecuencias menores a 30 Hz y amortiguamientos menores al 80 % buscando incluir el efecto histerético de disipación incorporado en el amortiguamiento modal β , el cual tiende a aumentar de forma inestable ante un mayor nivel de no linealidad en el sistema.

Mientras que la tercera corresponde a una condición particular de sistemas con aislación sísmica, donde se espera que la no linealidad provista por el fenómeno de histéresis afecte principalmente al amortiguamiento del primer modo de vibración y que no presente un efecto considerable en las propiedades asociadas a los modos superiores. Para esto, se define un valor límite del amortiguamiento promedio de los modos superiores igual a $\bar{\beta}_{lim} \approx 10 \%$, tomando en cuenta que los valores definidos para el modelo MSBA Y MCAEA corresponden al 5 y al 2 % respectivamente.

4.4.4.1 Modelo MSBA

Las Figuras 84 - 85 muestran las frecuencias y amortiguamientos horizontales identificados para el modelo MSBA. Se observa que el método identifica frecuencias similares para el primer modo de vibración en los casos débil (D) y medio (M), cercanos a un valor de 4.6-4.8 Hz y 5.7-6.4 Hz en la dirección X e Y respectivamente. Estos se diferencian por el amortiguamiento asociado, el cual en el caso de excitación débil alcanza valores entre un 30-40 %, mientras que para el caso de excitación media tiende a un aumento hasta valores comprendidos en un rango del 50-60 %.

Por otro lado, el caso de histéresis fuerte (F) exhibe una frecuencia fundamental cercana a los 1.5 Hz, con un amortiguamiento inestable que alcanza valores entre el 60-70 %. Los modos superiores estimados presentan cambios menores con el aumento de no linealidad y sus amortiguamientos permanecen estables en un valor cercano al 5 % asignado para el modelo.

Las frecuencias son estimadas en forma consistente utilizando registros ubicados en nodos centrales. Mientras que para nodos laterales el desempeño en la estimación se ve afectada con el aumento de no linealidad, debido a la adición de la componente traslacional en la respuesta generada por el movimiento rotacional de la estructura (Figura 86). Esto produce que la estimación en la respuesta predicha por el modelo escogido sea menos precisa en dichas posiciones, al no poder compatibilizar completamente la entrada y salida del sistema mediante los parámetros del polinomio (Figuras 87-88).

La selección del modelo mediante los criterios AIC, BIC y FPE produce candidatos cuyas propiedades modales contienen modos numéricos o espurios. Sin embargo, estas son efectivamente eliminadas considerando los rangos admisibles para el amortiguamiento promedio asociado a los modos superiores, permitiendo identificar de forma precisa las frecuencias correspondientes al modelo en estudio ante cualquier nivel de no linealidad en el sistema (Figura 83).

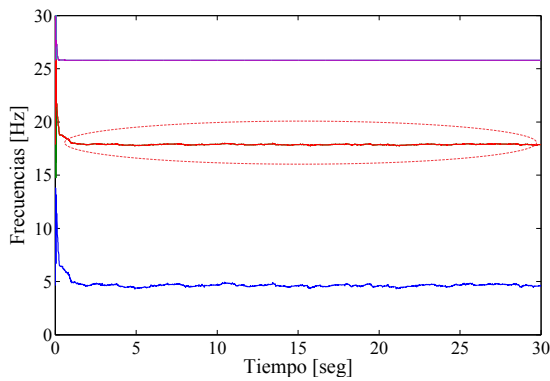
El orden de los modelos seleccionados para el polinomio autorregresivo $A(q)$ y de entrada exógena $B(q)$ varían entre $n_A = n_B = 15-20$ y $n_c = 0$ para todos los casos de histéresis del modelo. Esto implica que en el rango de valores candidatos para la selección del modelo, un mínimo de 7-8 modos es necesario para identificar correctamente las propiedades del sistema.

Sin embargo con el aumento de no linealidad y el uso de registros en nodos laterales, los mejores candidatos a modelos seleccionados bajo los criterios AIC y BIC constituyen estructuras polinomiales que no capturan las propiedades físicas de la estructura, e incluso presentan pesos muy cercanos acorde al criterio FPE, por lo que el conocimiento previo del sistema en dichos casos es necesario para la selección del modelo en dicha condición.

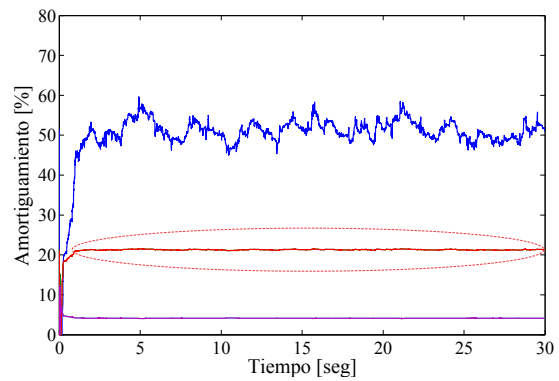
Identificación con RPEM escalas FF = 0.995 Criterio : AIC/BIC/FPE --- CANAL #1

File	Edit	View	Insert	Tools	Desktop	Window	Help	Indice_Modelo_BIC	BIC	na	nb	nc	w_BIC	Razon_BIC	Indice_Modelo_AIC	AIC	na	nb	nc	w_AIC	Razon_AIC	Indice_Modelo_FPE	FPE
1								44.0749	15	15	15	0	1	Inf	156.1106	15	15	15	0	1	Inf	0.0570	
2								8.8884e+03	20	20	0	0	NaN	5	8.8205e+03	20	20	0	0	NaN	5	0.2463	
3								1.3524e+04	25	25	0	0	NaN	9	1.3189e+04	25	25	0	0	NaN	9	0.5275	
4								1.4585e+04	30	30	0	0	NaN	13	1.4183e+04	30	30	0	0	NaN	13	0.6225	
5								1.5417e+04	35	35	0	0	NaN	17	1.4948e+04	35	35	0	0	NaN	17	0.7071	
6								1.5831e+04	40	40	0	0	NaN	21	1.5095e+04	40	40	0	0	NaN	21	0.7247	
7								1.5968e+04	45	45	0	0	NaN	25	1.5365e+04	45	45	0	0	NaN	25	0.7581	
8								1.6118e+04	50	50	0	0	NaN	29	1.5448e+04	50	50	0	0	NaN	29	0.7686	
9								7.5032e+04	15	15	3	0	NaN	4	7.4811e+04	15	15	3	0	NaN	4	1.5223e+04	
10								7.6285e+04	50	50	1	0	NaN	30	7.5608e+04	50	50	1	0	NaN	30	1.7387e+04	
11								7.6914e+04	45	45	1	0	NaN	26	7.6304e+04	45	45	1	0	NaN	26	1.9526e+04	
12								7.7564e+04	45	45	3	0	NaN	28	7.6941e+04	45	45	3	0	NaN	28	2.1712e+04	
13								7.7948e+04	35	35	1	0	NaN	18	7.7472e+04	35	35	1	0	NaN	18	2.3722e+04	
14								7.8689e+04	35	35	3	0	NaN	20	7.8199e+04	35	35	3	0	NaN	20	2.6779e+04	
15								8.0298e+04	15	15	1	0	NaN	2	8.0090e+04	15	15	1	0	NaN	2	3.6699e+04	
16								8.0789e+04	30	30	1	0	NaN	14	8.0380e+04	30	30	1	0	NaN	14	3.8514e+04	
17								8.2192e+04	50	50	2	0	NaN	31	8.1508e+04	50	50	2	0	NaN	31	4.6483e+04	
18								8.3077e+04	50	50	3	0	NaN	32	8.2387e+04	50	50	3	0	NaN	32	5.3818e+04	
19								8.3334e+04	20	20	2	0	NaN	7	8.3053e+04	20	20	2	0	NaN	7	6.0128e+04	
20								8.4478e+04	25	25	1	0	NaN	10	8.4136e+04	25	25	1	0	NaN	10	7.2039e+04	
21								8.4979e+04	25	25	3	0	NaN	12	8.4623e+04	25	25	3	0	NaN	12	7.8120e+04	
22								8.5575e+04	30	30	2	0	NaN	15	8.5159e+04	30	30	2	0	NaN	15	8.5419e+04	
23								8.6034e+04	30	30	3	0	NaN	16	8.5612e+04	30	30	3	0	NaN	16	9.2112e+04	
24								8.6660e+04	40	40	2	0	NaN	23	8.6110e+04	40	40	2	0	NaN	23	1.0009e+05	
25								8.6942e+04	20	20	1	0	NaN	6	8.6937e+04	20	20	1	0	NaN	6	1.7224e+05	
26								9.0424e+04	40	40	1	0	NaN	22	8.9881e+04	40	40	1	0	NaN	22	1.8764e+05	

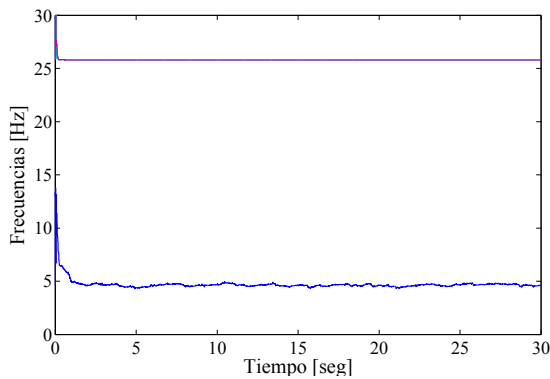
(a) Ejemplo de cálculo de AIC, BIC y FPE para modelos candidatos



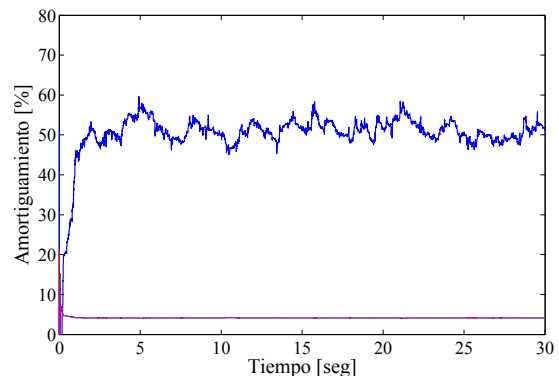
(b) Frecuencias Caso MX pre filtrado



(c) Amortiguamientos Caso MX pre filtrado

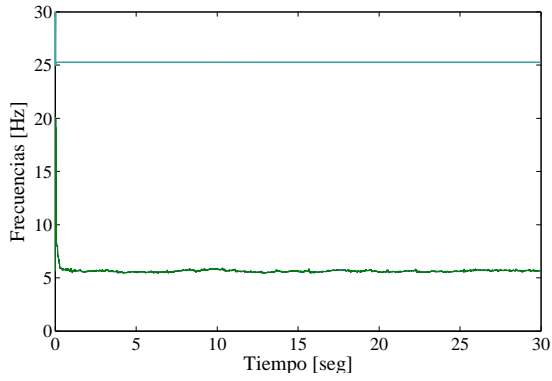


(d) Frecuencias Caso MX post filtrado

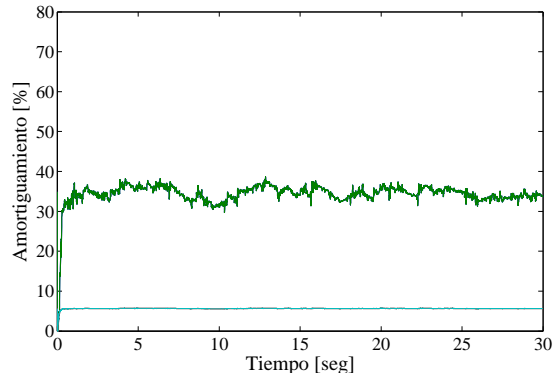


(e) Amortiguamientos Caso MX post filtrado

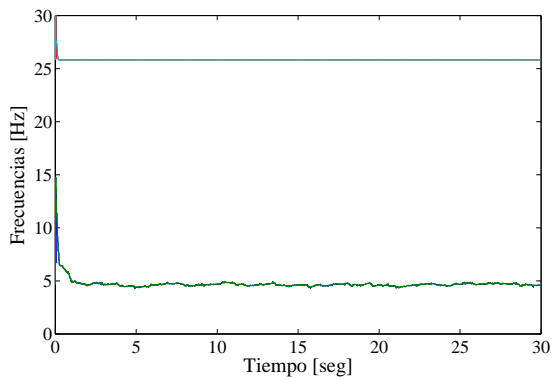
Figura 83: Selección de modelo polinomial y eliminación de propiedades modales espurias obtenidas con RPEM-λ, Nodo 42 X



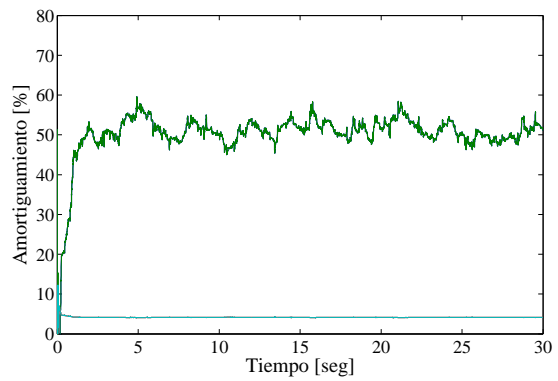
(a) Frecuencias Caso DX



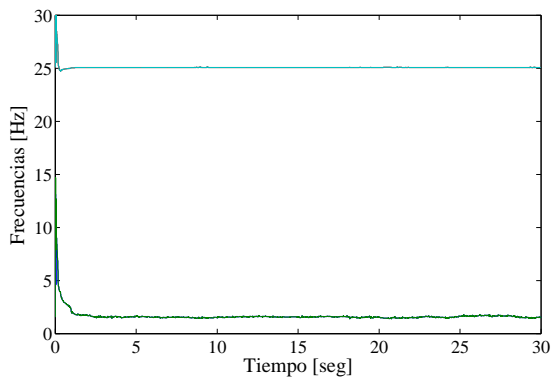
(b) Amortiguamientos Caso DX



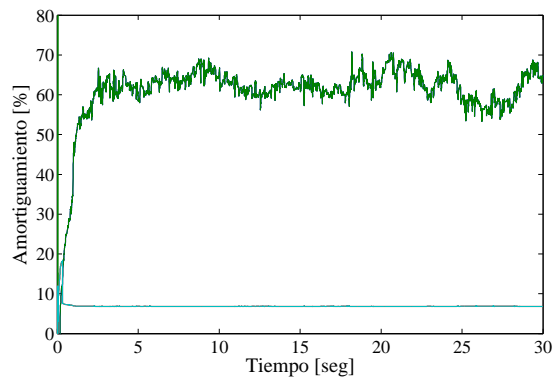
(c) Frecuencias Caso MX



(d) Amortiguamientos Caso MX

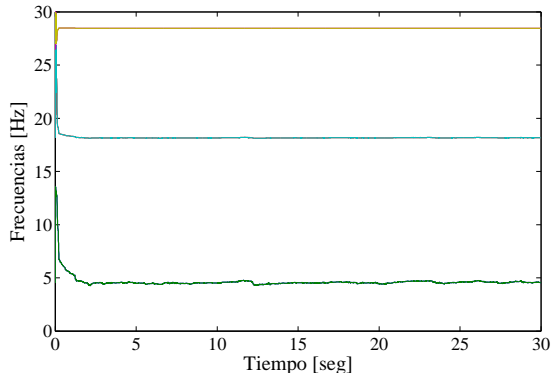


(e) Frecuencias Caso FX

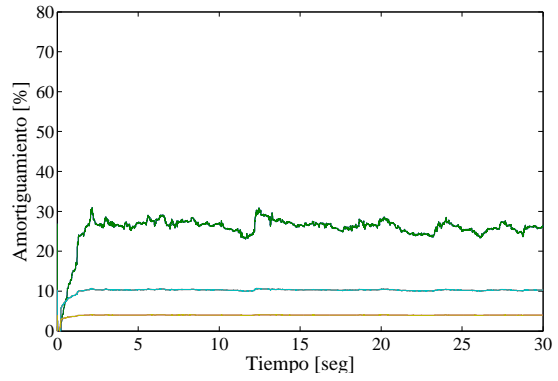


(f) Amortiguamientos Caso FX

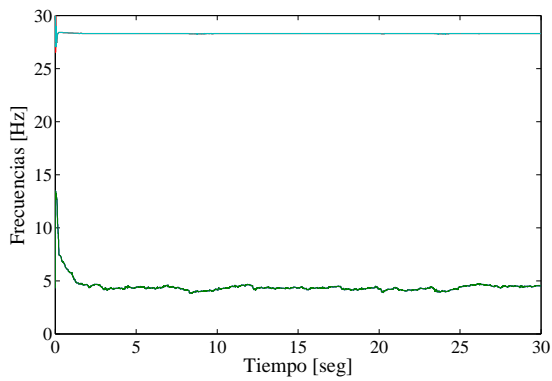
Figura 84: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con RPEM- λ en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X, Nodo 45



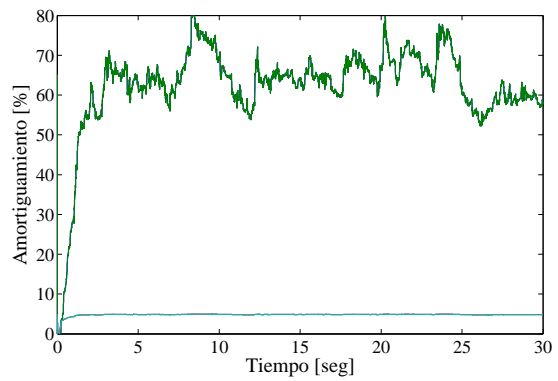
(a) Frecuencias Caso DY



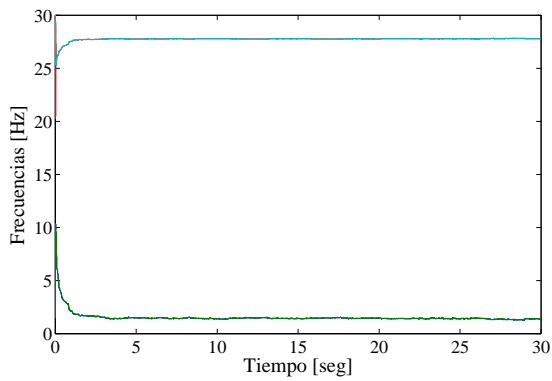
(b) Amortiguamientos Caso DY



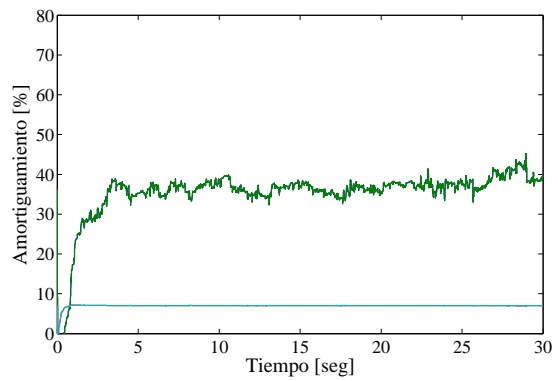
(c) Frecuencias Caso MY



(d) Amortiguamientos Caso MY

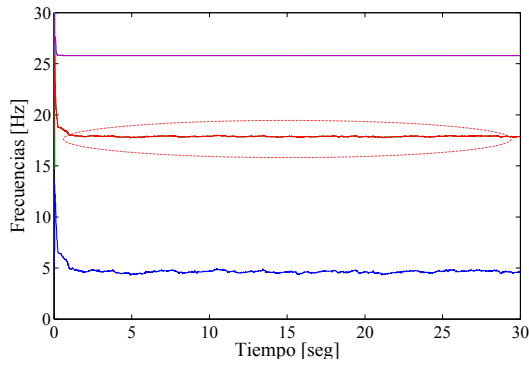


(e) Frecuencias Caso FY

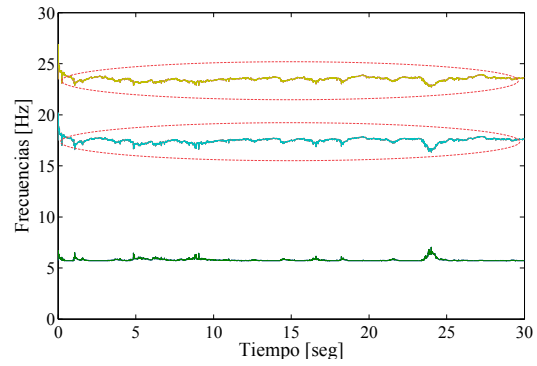


(f) Amortiguamientos Caso FY

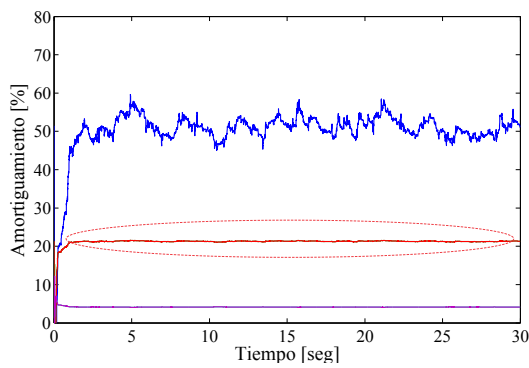
Figura 85: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con RPEM- λ en Modelo MSBA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección Y, Nodo 13



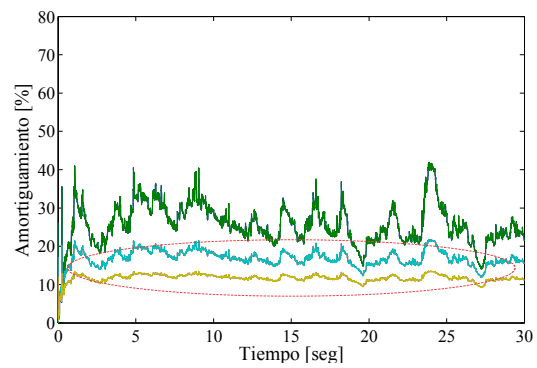
(a) Frecuencias Nodo Central 43 Caso MX



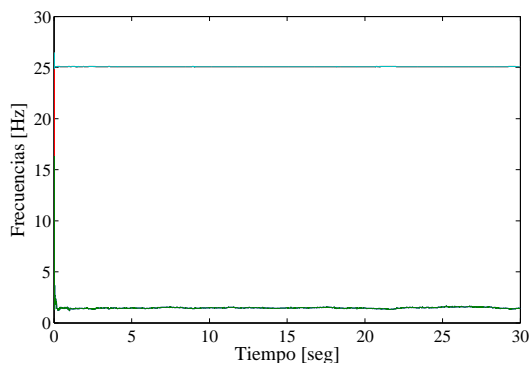
(b) Frecuencias Nodo Lateral 30 Caso MX



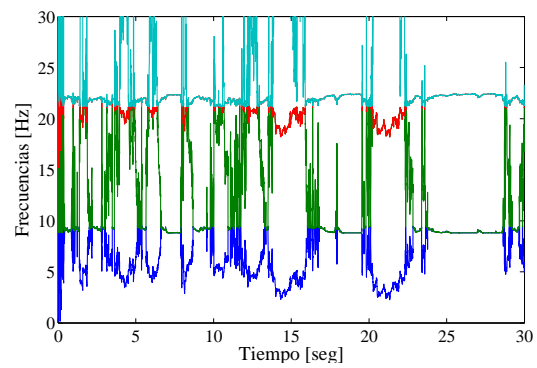
(c) Amortiguamientos Nodo Central 43 Caso MX



(d) Amortiguamientos Nodo Lateral 30 Caso MX

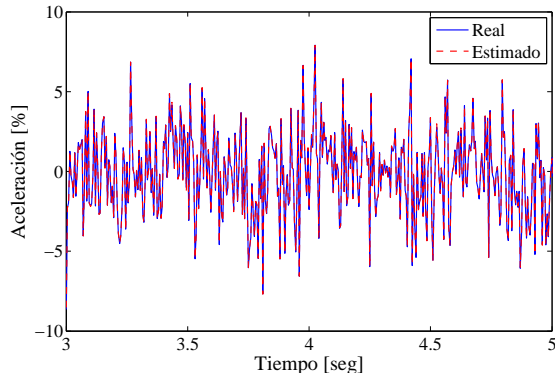


(e) Frecuencias Caso FX sin rotación Nodo Lateral 23

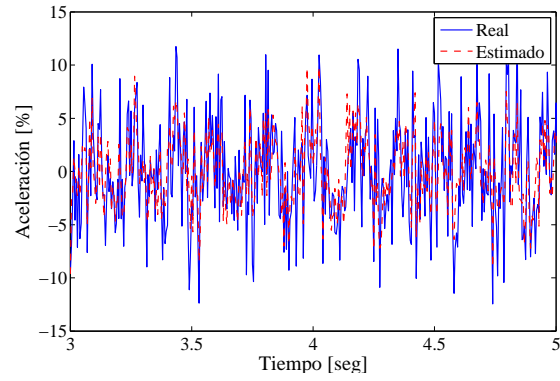


(f) Frecuencias Caso FX con rotación Nodo Lateral 23

Figura 86: Efecto de ubicación de nodo en estimaciones de Frecuencias y Amortiguamientos mediante RPEM- λ en Modelo MSBA

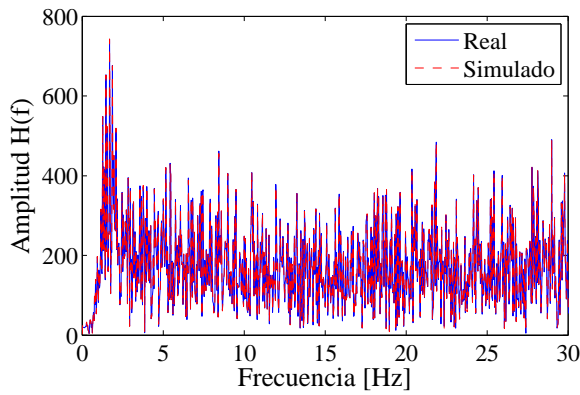


(a) Nodos centrales

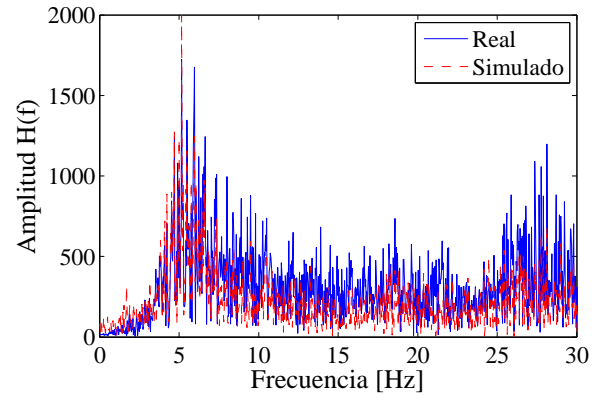


(b) Nodos laterales

Figura 87: Ajuste de Respuestas Modelo MSBA mediante RPEM



(a) FFT de respuestas en nodos centrales

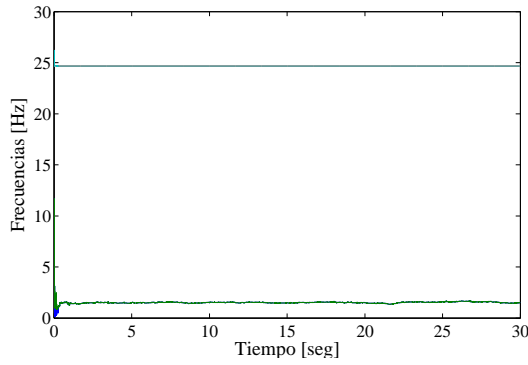


(b) FFT de respuestas en nodos laterales

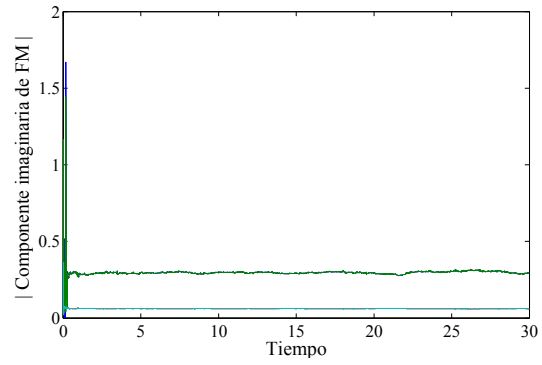
Figura 88: Comparación de espectros de frecuencias de respuestas, Modelo MSBA

Las formas modales identificadas se muestran en la Figura 89. Estas se obtienen a partir de los residuos asociados a cada polo en la función de transferencia del modelo escogido 89a-b. Al tratarse de un procedimiento con entrada y salida única, el cálculo de las formas modales resulta dependiente de la consistencia en la identificación de los modos para cada canal, resultando mucho más estable con el uso de nodos centrales. Por otra parte, un incremento del comportamiento rotacional del sistema provoca dificultades en la identificación de la amplitud de las formas modales de los nodos laterales, siendo solo posible identificar modos traslacionales a partir del conjunto de nodos centrales del modelo.

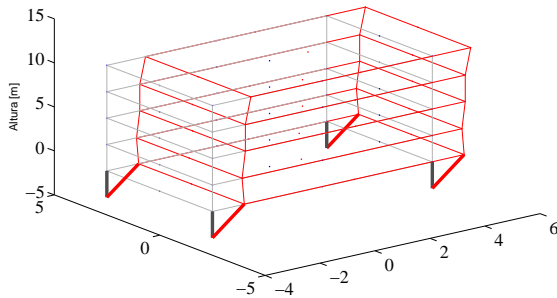
Un resumen comparativo de las propiedades modales identificadas para el modelo se muestra en la Tabla 23. Mientras que los resultados correspondiente a las propiedades obtenidas con registros en la dirección vertical se muestra en la Figura 90, adjuntándose el resto de los resultados en el Anexo D.



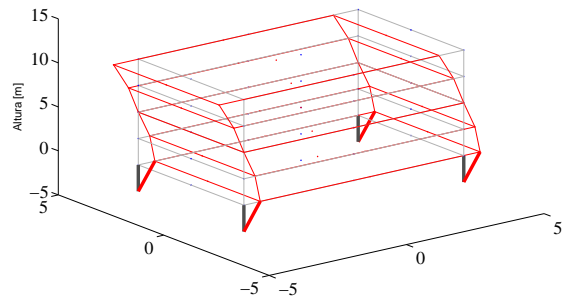
(a) Frecuencias Identificadas Caso FX - Nodo 38



(b) Amplitudes de formas modales Caso FX - Nodo 38



(c) Forma Modal $f_x = 1.53$ Hz

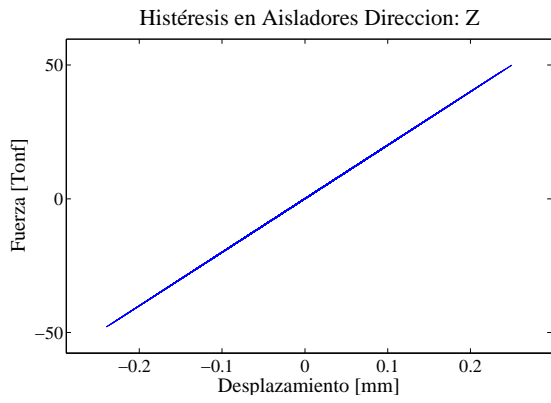


(d) Forma Modal $f_x = 24.6$ Hz

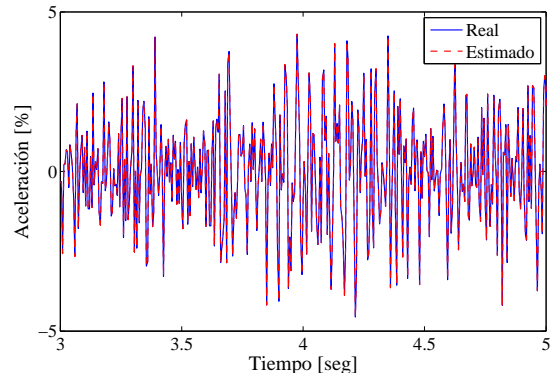
Figura 89: Formas Modales Identificadas con RPEM- λ en Modelo Simple de Base Aislada con Respuesta Fuerte, Dirección X

Tabla 23: Propiedades Modales Identificadas Modelo MSBA mediante RPEM- λ

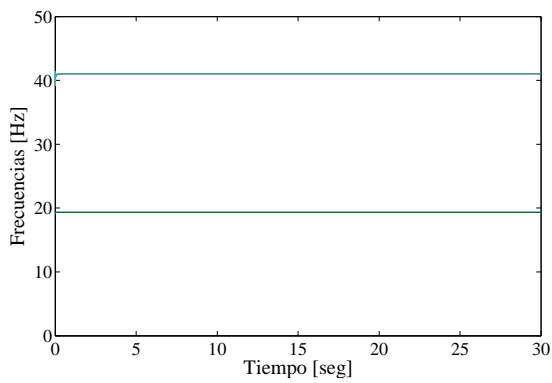
Caso	Prop. reales k_i		Prop. reales k_{py}		Debil		Medio		Fuerte	
	dir	f [Hz]	dir	f [Hz]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]
1	UY	5.03	UY	1.33	4.3-4.5	18-28	3.9-4.6	55-80	1.3-1.5	34-42
2	UX	5.63	UX	1.34	4.84	20-21	4.4-4.8	48.56	1.5-1.7	60-65
3	RZ	6.79	RZ	1.70	6-6.5*	7-10*	N/I	N/I	N/I	N/I
4	UY	17	UY	15	17.28	6.5-7.4	N/I	N/I	N/I	N/I
5	UZ	19.34	UZ	19.34	19.37	4.9	19.37	4.9	19.37	4.9
β [%]	5				N/I: No identificado		*:No ajustan observación			



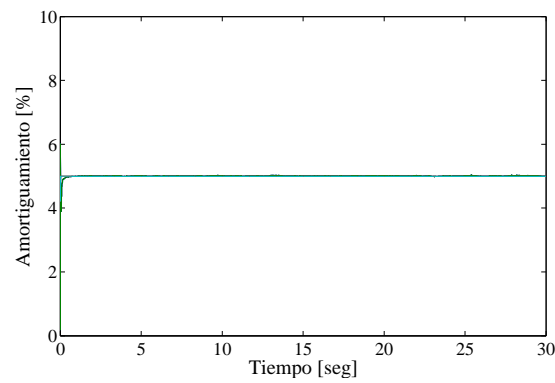
(a) Fuerza Restitutiva vertical



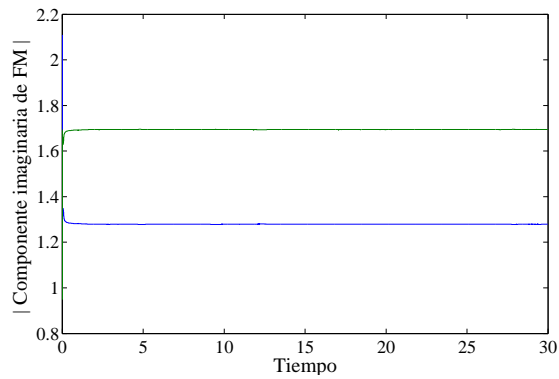
(b) Respuesta Estimada Nodo 1



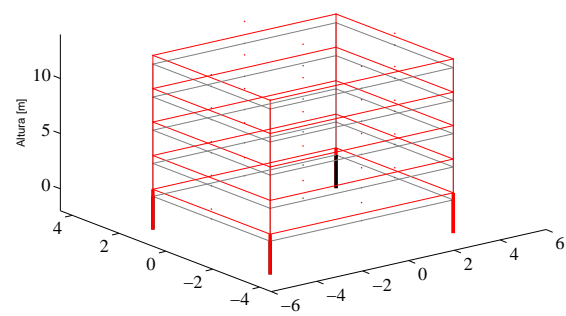
(c) Frecuencias identificadas



(d) Amortiguamientos identificados



(e) Amplitudes de Formas Modales Nodo 1



(f) Forma Modal $f_v = 19.35$ Hz

Figura 90: Propiedades Modales identificadas con registros verticales mediante RPEM- λ en Modelo MSBA

4.4.4.2 Modelo MCAEA

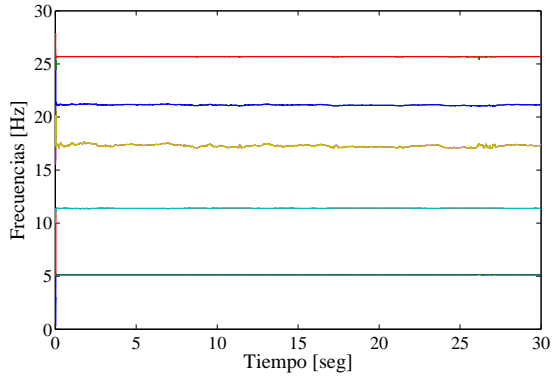
Las Figuras 91 - 92 muestran las frecuencias y amortiguamientos horizontales identificados para el modelo MCAEA. Las frecuencias del primer modo para los casos débil (D) y medio (M) presentan valores similares, cercanos a un valor de 5.12 Hz y 5.4-6.2 Hz en la dirección X e Y respectivamente. Estos modos se diferencian por el amortiguamiento el cual alcanza valores entre un 2-3 %, consistente con los amortiguamientos definidos para el comportamiento lineal elástico en el modelo, mientras que para el caso de excitación media(M), este parámetro tiende a aumentar hasta valores comprendidos en un rango del 10-20 %.

En el caso de histéresis fuerte (F) se identifica una frecuencia fundamental cercana a los 1.9 Hz, con un amortiguamiento inestable que alcanza valores entre el 8-30 %. Los modos superiores estimados muestran cambios menores con el aumento de no linealidad, presentando valores de amortiguamientos estables cercanos al 2 % asignado para el modelo.

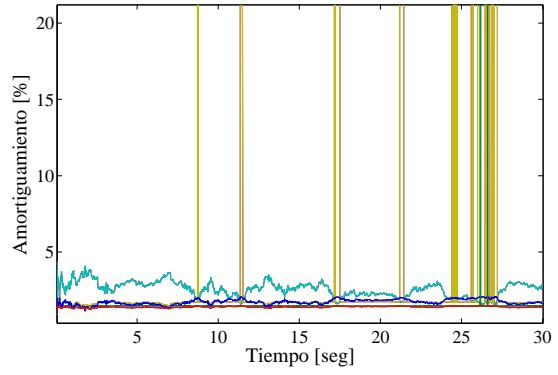
Las propiedades modales son estimadas de forma precisa realizando la identificación mediante registros ubicados en nodos centrales, para los cuales la estimación en la respuesta predicha por el modelo escogido resulta bastante precisa (Figuras 93-94). Mientras que para nodos laterales el desempeño en la estimación se ve fuertemente afectada con el aumento de no linealidad, lo que se asocia a la adición de la componente traslacional debido al movimiento rotacional aplicado, produciendo para los casos de menor excitación la identificación de frecuencias alejadas a las del sistema.

La selección del modelo mediante los criterios AIC, BIC y FPE produce modelos cuyas propiedades modales contienen modos numéricos o espurios, siendo estos eliminados de forma efectiva mediante los valores admisibles definidos para las propiedades del sistema, permitiendo identificar las frecuencias correspondientes al modelo en estudio.

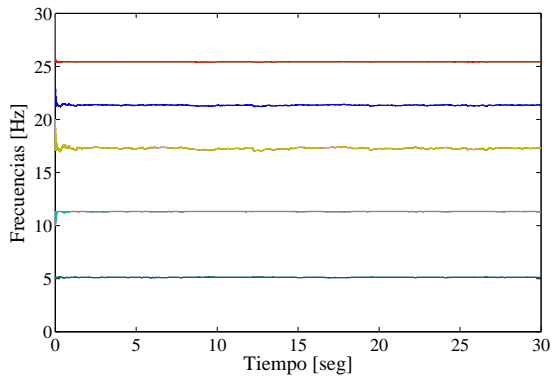
El orden de los modelos seleccionados para el polinomio autorregresivo $A(q)$ y de entrada exógena $B(q)$ corresponden a $n_A = n_B = 15-30$, $n_c = 0$ en el caso de registros con nodos centrales y $n_A = n_B \sim 60$ para los nodos laterales, requiriendo una estructura polinomial asociada a un mínimo de 7-8 y 30 modos respectivamente para identificar correctamente las propiedades del sistema. Sin embargo el aumento de no linealidad junto con el uso de registros ubicados en nodos laterales, produce que los mejores candidatos a modelos seleccionados bajo los criterios AIC y BIC no estimen de forma precisa las propiedades físicas de la estructura.



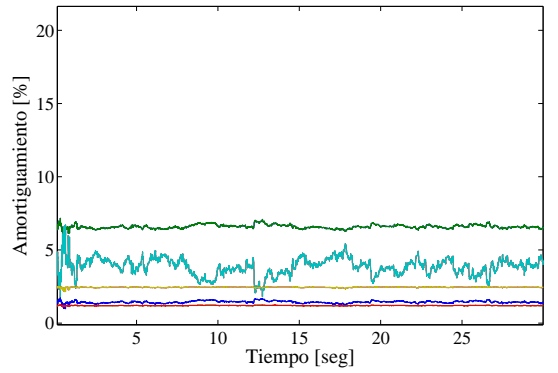
(a) Frecuencias Caso DX



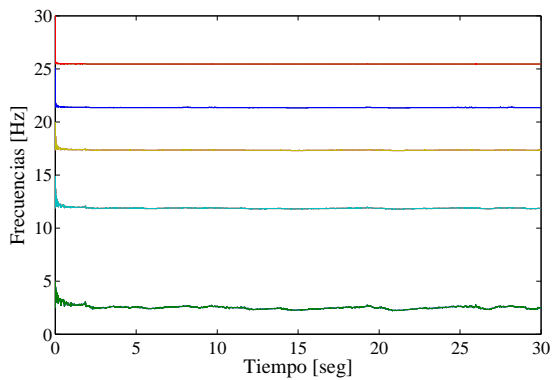
(b) Amortiguamientos Caso DX



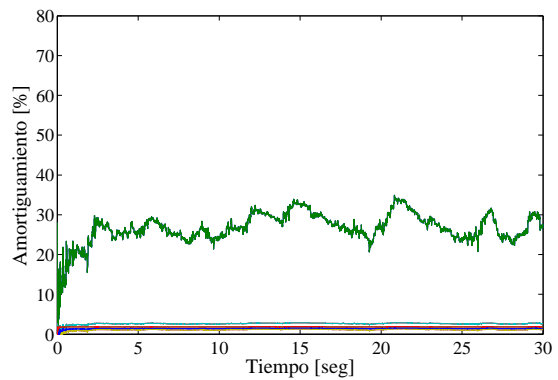
(c) Frecuencias Caso MX



(d) Amortiguamientos Caso MX

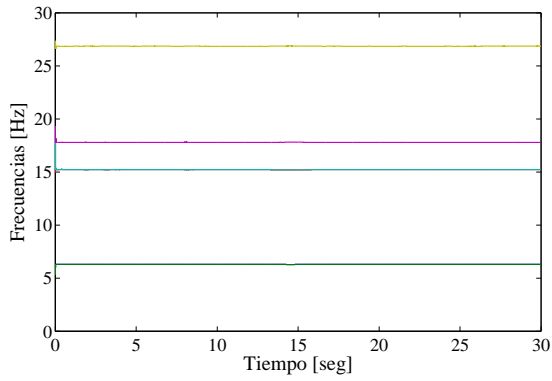


(e) Frecuencias Caso FX

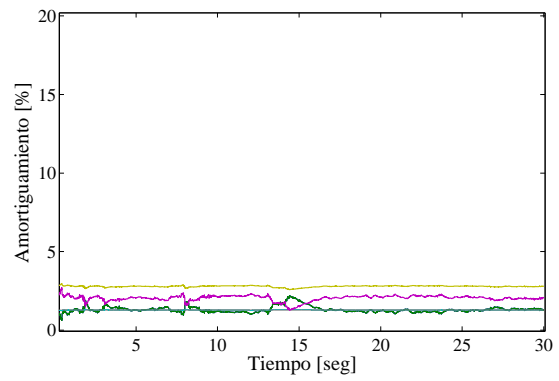


(f) Amortiguamientos Caso FX

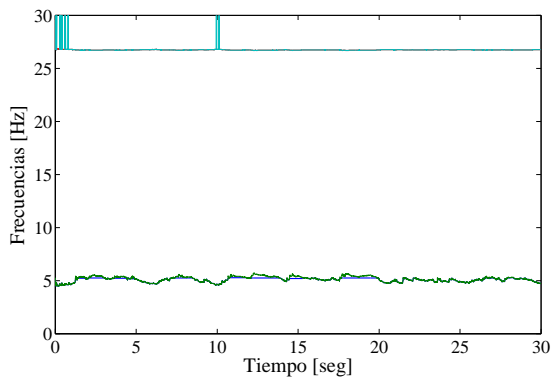
Figura 91: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con RPEM- λ en Modelo MCAEA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X, Nodo 77



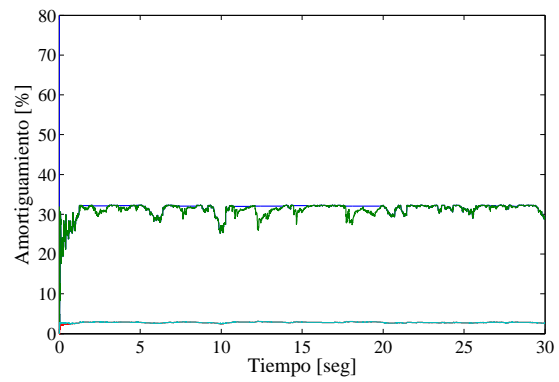
(a) Frecuencias Caso DY



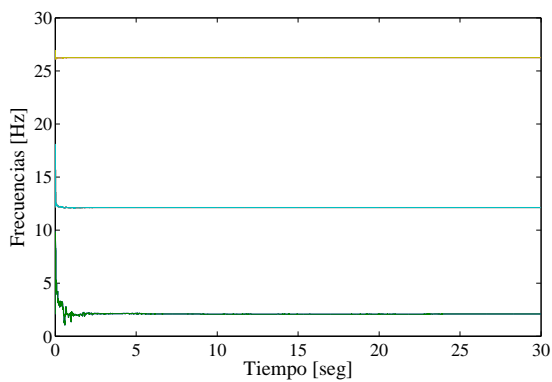
(b) Amortiguamientos Caso DY



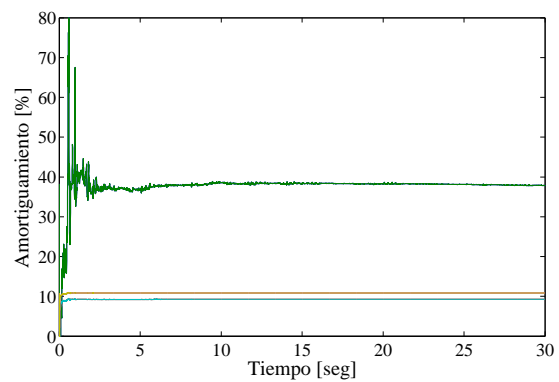
(c) Frecuencias Caso MY



(d) Amortiguamientos Caso MY

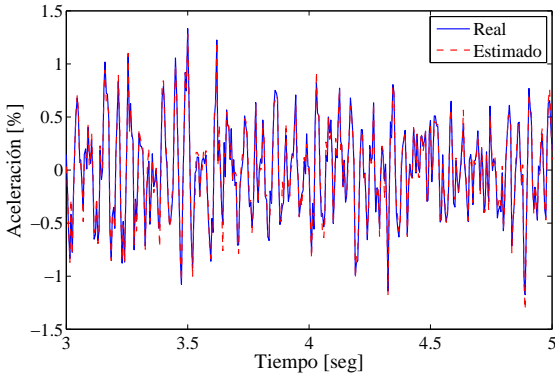


(e) Frecuencias Caso FY

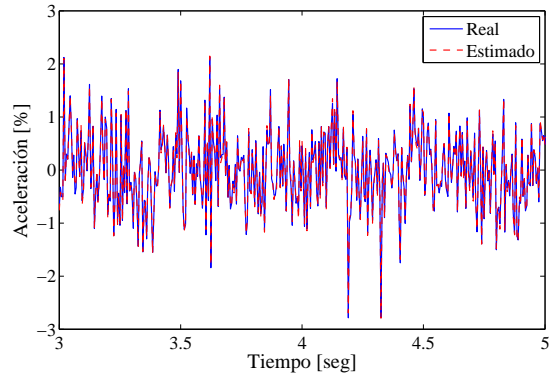


(f) Amortiguamientos Caso FY

Figura 92: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con RPEM- λ en Modelo MCAEA con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección Y, Nodo 95

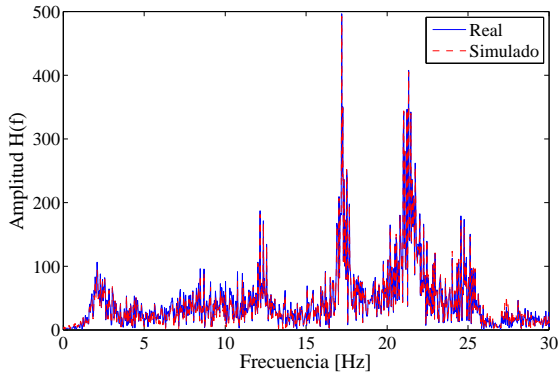


(a) Nodo 77 Caso FX

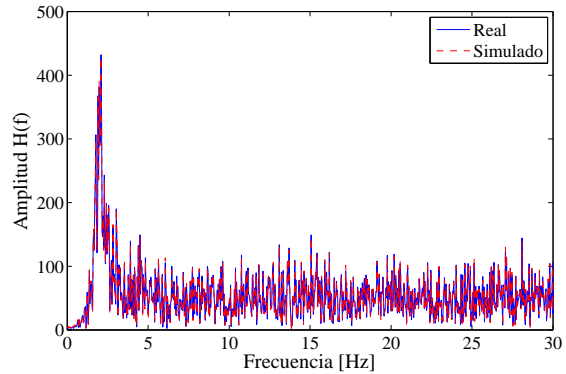


(b) Nodo 95 Caso FY

Figura 93: Ajuste de Respuestas Modelo MCAEA mediante RPEM



(a) FFT de respuesta en Nodo 77 Caso FX

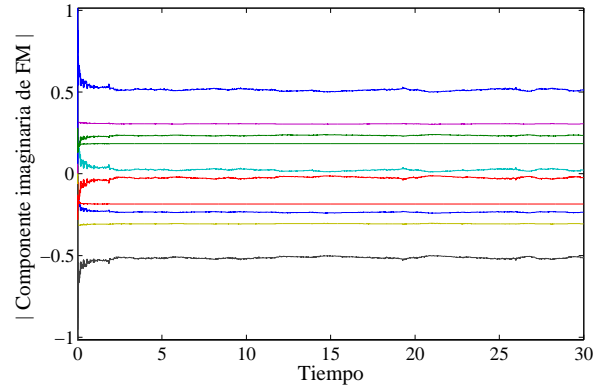
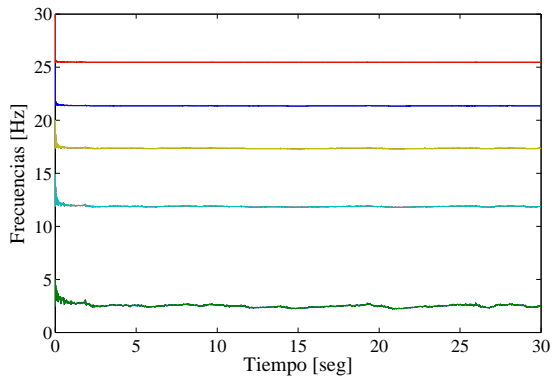


(b) FFT de respuesta en Nodo 95 Caso FY

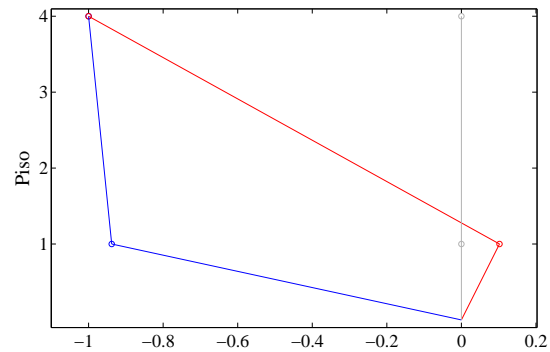
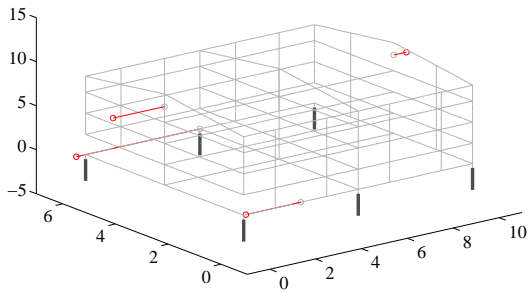
Figura 94: Comparación de espectros de frecuencias de respuestas, Modelo MCAEA

Las formas modales identificadas se muestran en la Figura 89. Estas se obtienen a partir de los valores de los residuos de la función de transferencia del sistema escogido, asociado a cada modo de vibración identificado 89a-b. Al tratarse de un procedimiento con entrada y salida única, el cálculo de las formas modales resulta dependiente de la consistencia en la identificación de los modos para cada canal, resultando mucho más estable en la medida en que el comportamiento del sistema permanece en un rango lineal. Por otra parte, un incremento en la no linealidad del sistema, provoca dificultades en la identificación de la amplitud de las formas modales respectivas, siendo solo posible identificar el primer modo de vibración a partir del subconjunto de nodos centrales del modelo.

Un resumen comparativo de las propiedades modales identificadas para el modelo se muestra en la Tabla 23. Mientras que los resultados correspondientes a las propiedades obtenidas con registros en la dirección vertical se muestra en la Figura 90, adjuntándose el resto de los resultados en el Anexo D.



(a) Frecuencias Identificadas Caso FX Nodo 77 (b) Amplitudes de formas modales Caso FX Nodo 77



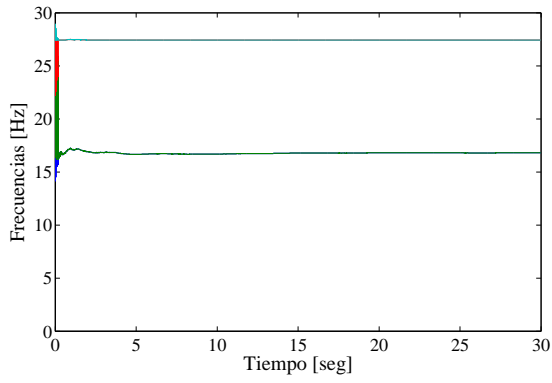
(c) Amplitudes de forma modal

(d) Forma Modal $f_x = 2.2$ Hz

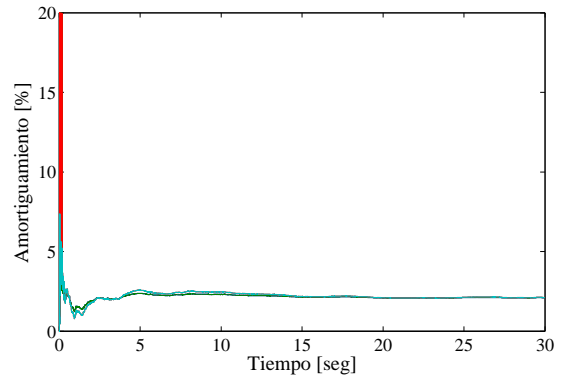
Figura 95: Formas Modales Identificadas con RPEM- λ en Modelo MCAEA con Histéresis : a) Débil (Lineal), b) Media y c) Extrema, Dirección X

Tabla 24: Propiedades Modales Identificadas Modelo MCAEA mediante RPEM- λ

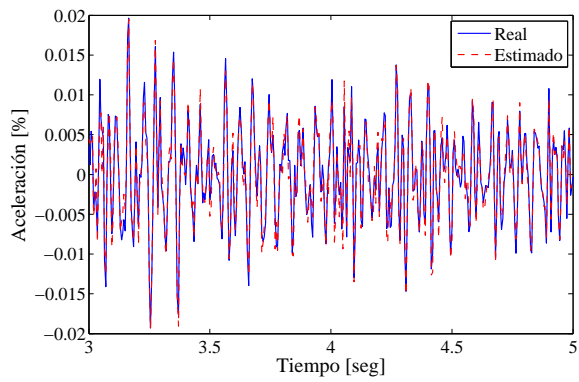
Caso	Prop. reales ki		Prop. reales kpy		Débil		Medio		Fuerte	
	dir	f [Hz]	dir	f [Hz]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]	f [Hz]	β [%]
1	UX/RX	5.11	UX	1.90	5.11	1.43-1.46	5.1-5.12	6.6-10	1.9-2.1	11.8-20
2	UY/RX	6.29	UY	1.93	6.29	1.1-2	4.5-5.5	25-30	1.95	7.2-7.7
3	RZ/UY	7.92	RZ	2.19	N/I*	N/I*	N/I*	N/I*	N/I*	N/I*
4	UX/RX	11.43	RY	8.08	11.38	1.6-4	11.31	2.5-5	7.1	5.3
5	UY/RX	15.25	RX	10.32	15.21	1.3	N/I*	N/I*	10.38	6.1
β [%]	2				N/I*: No identificado con los nodos considerados					



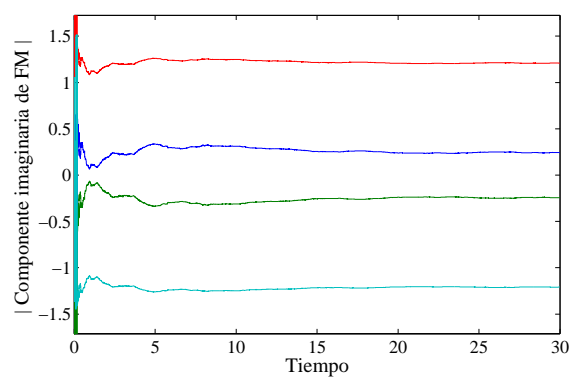
(a) Frecuencias Identificadas



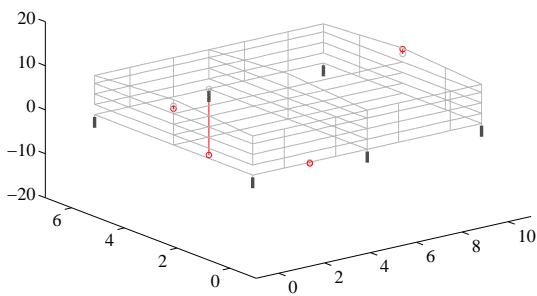
(b) Amortiguamientos Identificados



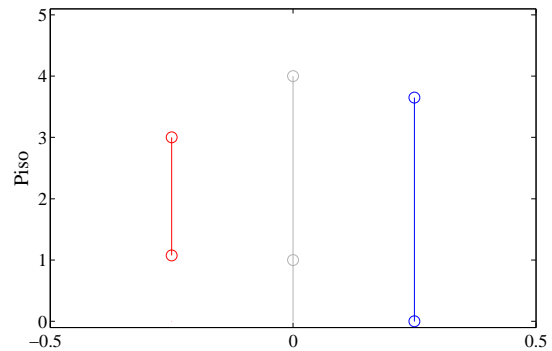
(c) Respuesta Estimada Nodo 77



(d) Amplitudes de Formas Modales Nodo 77



(e) Amplitudes de forma modal estimada



(f) Forma Modal $f_v = 17.5$ Hz

Figura 96: Propiedades Modales identificadas con registros verticales mediante RPEM- λ en Modelo MCAEA

4.4.5 IDENTIFICACION MEDIANTE FILTRO DE PARTICULAS (PF)

El procedimiento de identificación mediante Filtro de Partículas asume los modelos numéricos MSBA y MCAEA como la representación “real” que controla el comportamiento del sistema a partir del cual se generan las señales utilizadas como observación, encontrándose detallados en la sección 4.2.1. La superestructura de estos modelos se asume lineal con parámetros previamente asignados asociados al material y a la geometría de la estructura, lo cual constituye un supuesto común debido al bajo nivel de desplazamiento entre pisos que se presenta en este tipo de sistemas estructurales.

El algoritmo permite abordar un enfoque multivariable, incorporando un grupo arbitrario de observaciones del sistema ubicadas en distintas posiciones del modelo (estas pueden ser respuestas de desplazamiento, velocidad y/o aceleración). Los parámetros a estimar en este caso consisten en la rigidez inicial k_i , razón de rigideces α , esfuerzo de fluencia F_y y exponente de transición n , los que definen la curva histerética del modelo analítico utilizado para representar el comportamiento de los aisladores presentados en el Capítulo II. Dichos parámetros poseen rangos de valores admisibles que son considerados en el procedimiento de identificación.

El número de partículas utilizado para la estimación varía desde 200 a 4000 partículas con el objetivo de estudiar la influencia en la efectividad de la búsqueda de parámetros, mientras que el número de observaciones define el valor donde la función de verosimilitud, utilizada para actualizar los pesos de cada partícula, se maximiza (Sección 2.2.6). El método también requiere la definición de un nivel de ruido de observación σ_{obs} , el que se asigna tal que el SNR (signal-to-noise-ratio) de la señal sea superior a 2, asumiendo una observación con un nivel aceptable de ruido incorporado para efectuar la identificación.

Los rangos iniciales para los parámetros a estimar se definen mediante una distribución inicial de probabilidad uniforme con matriz de covarianza diagonal (i.e. parámetros independientes). Los límites superiores e inferiores para realizar el muestreo de las partículas son definidos basados en el conocimiento previo que se tiene del modelo, aspecto que puede parecer contraintuitivo si se considera que en un caso práctico los valores de las propiedades dinámicas de los aisladores presentan un nivel no despreciable de dispersión, dependiendo de los tipos de ensayos y excitaciones que se utilicen para su estimación (Sección 2.4.2).

Para efectos del estudio analítico, se escogen los valores iniciales de la distribución uniforme indicados en las Tablas 25 - 31, las cuales también muestran el valor de la solución a encontrar y las restricciones que debe satisfacer cada componente del vector de parámetros buscado.

Conocer los valores de la solución como en el presente caso, puede facilitar la selección valores límites de búsqueda para los parámetros del sistema. Sin embargo, sin un conocimiento a priori, el parámetro que presenta mayor dificultad en la definición de un rango de búsqueda lo constituye la rigidez inicial $k_i > 0$, debido a su bajo nivel de restricción.

Una alternativa a este problema consiste en realizar una identificación no paramétrica considerando una excitación lo suficientemente pequeña (como en el caso de microvibraciones), de modo que mantenga la respuesta del sistema predominantemente en el tramo inicial de histéresis (cuasi-lineal), ya que esta dependerá principalmente de la rigidez inicial y no de los parámetros restantes (puesto que estos últimos solo definen el carácter no lineal de la respuesta, una vez alcanzado el rango plástico), transformándolo en un problema de estimación de un único parámetro.

Basándose en estas frecuencias para el primer modo de vibración de la estructura, se puede establecer un conjunto de valores límites para el rango de búsqueda de la rigidez inicial a estimar. Además, los modelos de elementos finitos desarrollados en SAP2000 muestran cambios marginales pequeños de las frecuencias del primer modo con el aumento notorio de la rigidez inicial de los aisladores una vez superado un cierto umbral, debido a que se alcanza la condición de empotramiento de la estructura (Tablas 32-33), lo que establece un límite superior de búsqueda en el espacio paramétrico.

Con el fin de llevar a cabo una búsqueda efectiva de dicho parámetro, se debe colocar especial atención en la calibración previa de las propiedades de la superestructura, las cuales pueden ser obtenidas ya sea mediante técnicas no paramétricas o ensayos que justifiquen el uso de los valores asignados. Complementariamente un número adecuado de partículas debe ser utilizado para esta estimación, con el objetivo de diferenciar entre soluciones factibles que se encuentren dentro del espacio de búsqueda propuesto, debido al carácter no lineal del modelo.

Por otra parte, el resto de los parámetros se define considerando sus rangos admisibles o bien su influencia en la respuesta del sistema. En el caso de la razón de rigideces α , el rango de búsqueda se encuentra bien definido y acotado entre valores de $0 < \alpha < 1$. El esfuerzo de fluencia F_y puede acotarse considerando una estimación para un rango de valores de desplazamiento de fluencia típicos menores a 1 cm y considerando los límites establecidos para la búsqueda de la rigidez inicial. Por último el exponente de transición exhibe un comportamiento variable entre el rango $0 < n < 3$, mientras que para valores mayores genera formas de curvas histeréticas con una transición no suavizada, siendo equivalente a modelos de histéresis bilineal definida por tramos lineales.

Utilizando la definición de los valores mostrados, las secciones siguientes muestran las distribuciones estimadas para cada parámetro en la identificación de los modelos MSBA y MCAEA, las estimaciones en la respuesta e inferencias de la respuesta histerética y de otros estados del modelo como el desplazamiento, procediendo de forma posterior a un análisis y discusión de resultados.

Tabla 25: Rangos admisibles de parámetros a identificar

Modelo	
Param	Rango Admisible
k_i	$k_i > 0$
α	$0 < \alpha < 1$
F_y	$F_y > 0$
n	$n > 0$

Tabla 26: Condiciones Iniciales para PF, Modelo MSBA histéresis débil

Modelo				Parámetros Iniciales	
MSBA				$\max(\ddot{u}_g)$ [g]	0.2
Param.	real	liminf	limsup	σ_{obs}	0.5
k_0	10500	8000	15000	SNR	[1.3 3.8 6.2 1.4]
α	0.05	0.01	0.9	npart	200
Fy	30	10	50	σ eap noise	[500 0.01 1 0.1]
n	0.5	0.1	3	$\Delta\sigma$ eap noise	0.5

Tabla 27: Condiciones Iniciales para PF, Modelo MSBA histéresis media

Modelo				Parámetros Iniciales	
MSBA				$\max(\ddot{u}_g)$ [g]	0.7
Param.	real	liminf	limsup	σ_{obs}	0.5
k_0	10500	8000	14000	SNR	[4.4 10.6 16.8 4.5]
α	0.05	0.01	0.1	npart	200
Fy	8	5	20	σ eap noise	[500 0.01 1 0.05]
n	0.5	0.1	3	$\Delta\sigma$ eap noise	0.5

Tabla 28: Condiciones Iniciales para PF, Modelo MSBA histéresis fuerte

Modelo				Parámetros Iniciales	
MSBA				$\max(\ddot{u}_g)$ [g]	1
Param.	real	liminf	limsup	σ_{obs}	0.5
k_0	10500	8000	15000	SNR	[5.8 15.1 23.9 6.4]
α	0.05	0.01	0.9	npart	200
Fy	3	0.5	10	σ eap noise	[500 0.005 0.1 0.1]
n	0.5	0.1	3	$\Delta\sigma$ eap noise	0.5

Tabla 29: Condiciones Iniciales para PF, Modelo MCAEA histéresis débil

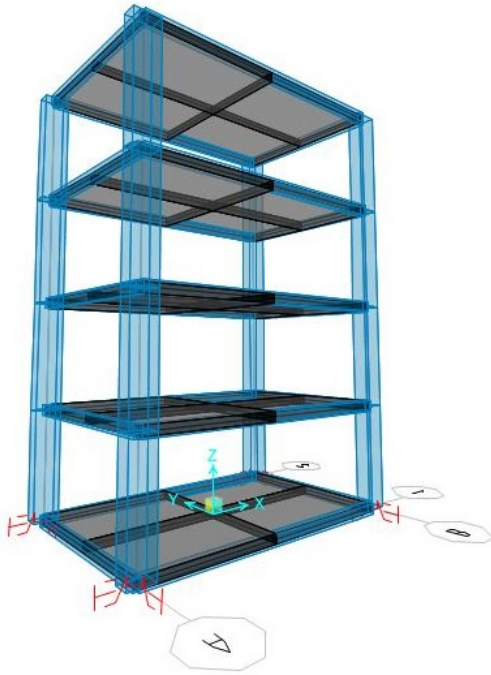
Modelo				Parámetros Iniciales	
MCAEA				$\max(\ddot{u}_g)$ [g]	0.2
Param.	real	liminf	limsup	σ_{obs}	2
k_0	12500	8000	14000	SNR	[3.1 2.0 4.1 0.9]
α	0.05	0.01	0.1	npart	500
Fy	15	5	30	σ eap noise	[1000 0.005 0.5 0.001]
n	30	30	30	$\Delta\sigma$ eap noise	0.5

Tabla 30: Condiciones Iniciales para PF, Modelo MCAEA histéresis media

Modelo				Parámetros Iniciales	
MCAEA				$\max(\ddot{u}_g)$ [g]	1
Param.	real	liminf	limsup	σ_{obs}	2
k_0	12500	8000	14000]	SNR	[11.4 8.9 15.7 2.4
α	0.05	0.01	0.1	npart	500
Fy	15	5	30	σ eap noise	[1000 0.005 0.5 0.001]
n	30	30	30	$\Delta\sigma$ eap noise	0.5

Tabla 31: Condiciones Iniciales para PF, Modelo MCAEA histéresis fuerte

Modelo				Parámetros Iniciales	
MCAEA				$\max(\ddot{u}_g)$ [g]	10
Param.	real	liminf	limsup	σ_{obs}	2
k_0	10500	10000	12000	SNR	[96.5 98.8 151 19.2]
α	0.05	0.01	0.1	npart	500
Fy	1	0	3	σ eap noise	[1000 0.005 0.5 0.001]
n	30	30	30	$\Delta\sigma$ eap noise	0.5

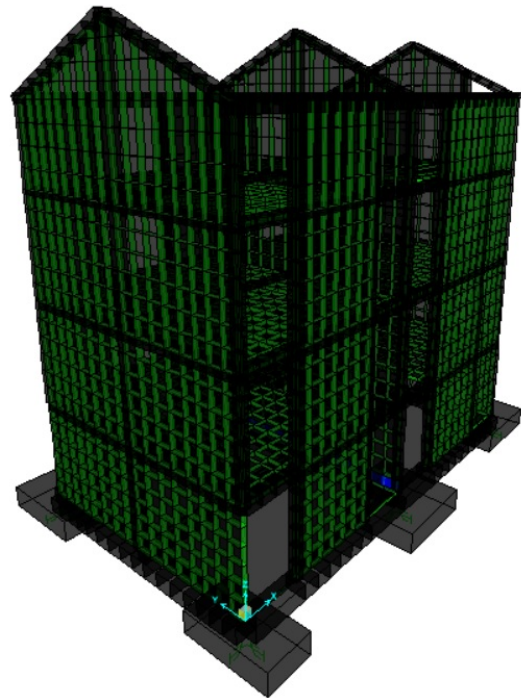


Modelo		
MSBA		
k [Tonf/m]	f1 [Hz]	f2 [Hz]
525	1.33	1.34
2000	2.54	2.60
5000	3.80	4.03
10000	4.95	5.52
15000	5.63	6.54
20000	6.08	7.33
50000	7.19	9.85
100000	7.67	11.40
150000	7.85	12.05
200000	7.94	12.26
250000	7.99	12.39

Tabla 32: Cambios de valores de frecuencias con aumento de rigidez inicial en Modelo MSBA

Modelo		
MCAEA		
k [Tonf/m]	f1 [Hz]	f2 [Hz]
625	2.28	2.34
2000	3.64	3.90
5000	4.61	5.31
10000	5.06	6.15
15000	5.22	6.49
20000	5.31	6.68
50000	5.48	7.05
100000	5.55	7.21
150000	5.58	7.27
200000	5.59	7.31
250000	5.60	7.33

Tabla 33: Cambios de valores de frecuencias con aumento de rigidez inicial en Modelo MCAEA



4.4.5.1 Modelo MSBA

Las Figuras 97, 99 y 101 presentan las distribuciones posteriores obtenidas para los parámetros del modelo MSBA, las que muestran estimaciones precisas de la solución del sistema ante distintos niveles de no linealidad en la respuesta, aún considerando un número limitado de partículas ($N_p = 200$).

Cabe notar que incluso en el caso histerético débil, los 4 parámetros buscados presentan una excelente estimación, lo que resulta contrario a lo esperado para este tipo de sistemas donde el tramo inicial de la curva histerética típicamente se encuentra controlado por la rigidez inicial del modelo. Sin embargo, esta efectividad se asocia al tipo de relación continua que define el modelo de histéresis de Bouc-Wen con respecto a sus parámetros, el cual posee un tramo inicial no elástico para valores de exponentes de transición pequeños ($n < 3$), generando la respuesta mediante la participación de todos sus parámetros, permitiendo realizar una identificación efectiva para todas las componentes del vector de parámetros a estimar.

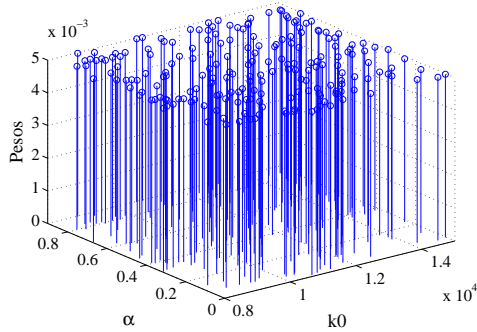
Se observa además que en algunas iteraciones aparecen algunas regiones en el espacio de búsqueda al que las partículas convergen, las cuales quedan posteriormente descartadas en un número reducido de iteraciones, debido a la convergencia de dichas partículas a la solución buscada, en donde se concentra el mayor peso de la distribución estimada. Esta efectividad en la convergencia de las partículas a la solución real, permite efectuar estimaciones precisas de las observaciones e inferencias del comportamiento no lineal de los aisladores, como se muestran en las Figuras 98, 100 y 102.

Finalmente cabe destacar la dependencia del desempeño del procedimiento de identificación ante factores tales como la varianza asociada al ruido de evolución artificial para la búsqueda del parámetro, el número de partículas definido y las condiciones iniciales de búsqueda para la distribución a priori, los cuales resultan muy relevantes considerando la particular forma aguda que presenta la función de verosimilitud en este tipo de problemas, debido a la alta densidad de datos en las observaciones ($N > 3000$).

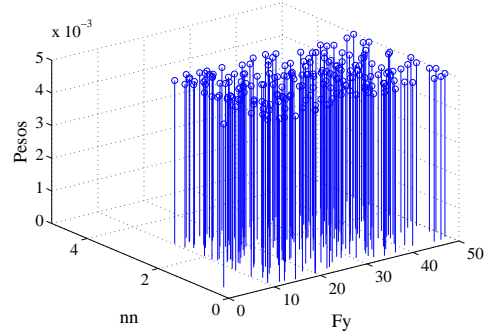
Lo anterior provoca que con partículas iniciales que no se encuentren lo suficientemente cercanas a las vecindades de los valores de alta verosimilitud, en términos de MSE, el método puede no converger a una solución, presentando pesos de partículas nulos.

Dada esta condición, un nivel bajo de ruido de observación en la señal, favorece la obtención de una distribución con una baja resolución (i.e. peso concentrado en una sola partícula) en las iteraciones iniciales, debido a la diferencia entre las verosimilitudes asociadas a las partículas, siendo posible detectar en una menor cantidad de casos otras soluciones factibles del sistema que ajustan las observaciones, debido al carácter no lineal del modelo.

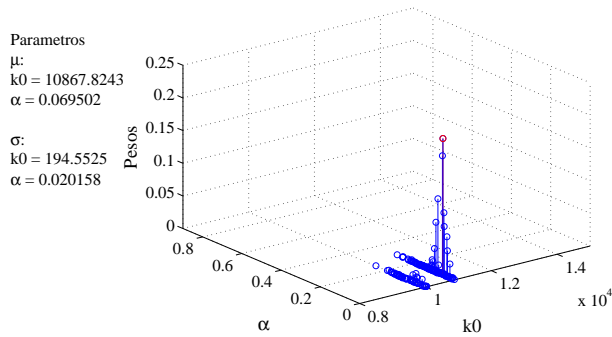
• Filtro de Partículas Histéresis Débil



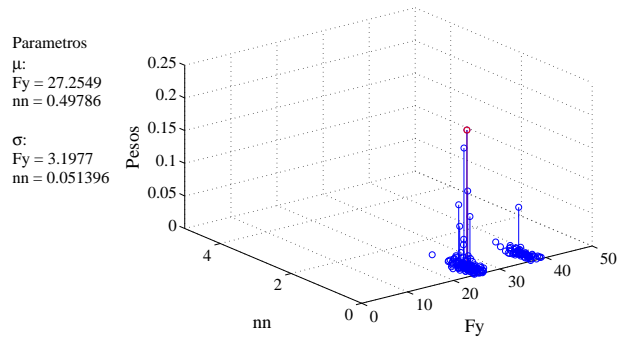
(a) Parámetros k y α Iteración 1



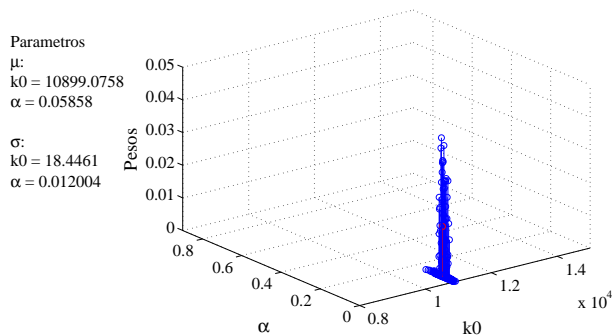
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



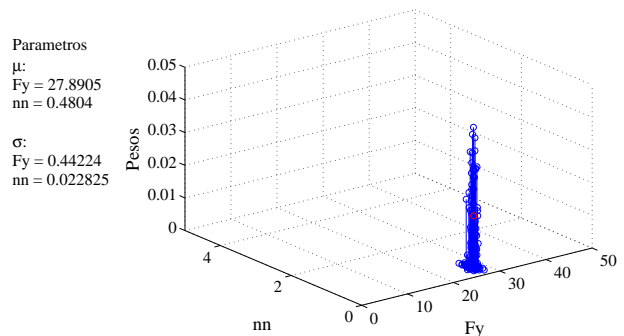
(c) Parámetros k y α Iteración 3



(d) Parámetros F_y y n Iteración 3

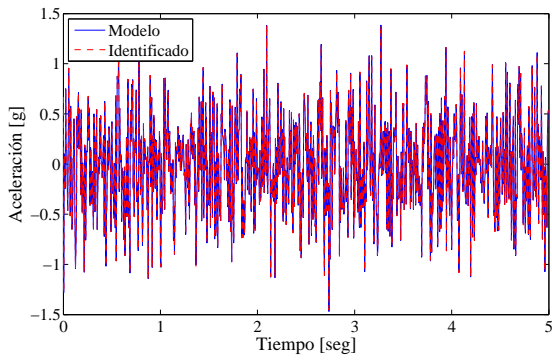


(e) Parámetros k y α Iteración 21

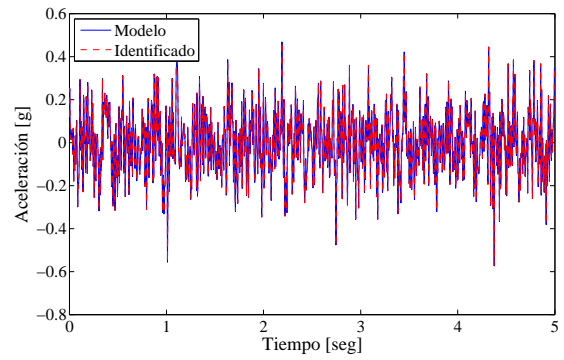


(f) Parámetros F_y y n Iteración 21

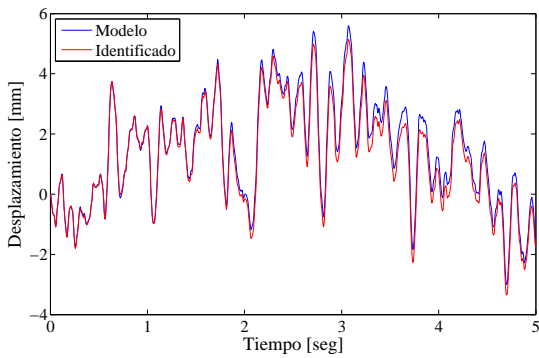
Figura 97: Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA histéresis débil



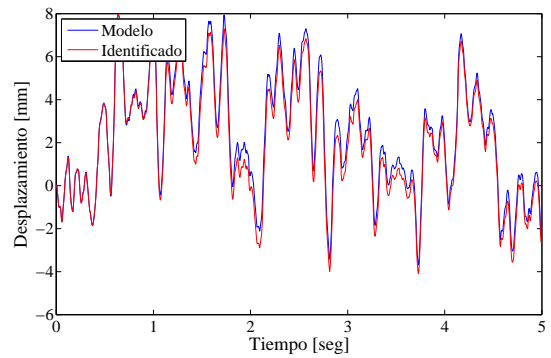
(a) Comparación aceleración nodo 45 X



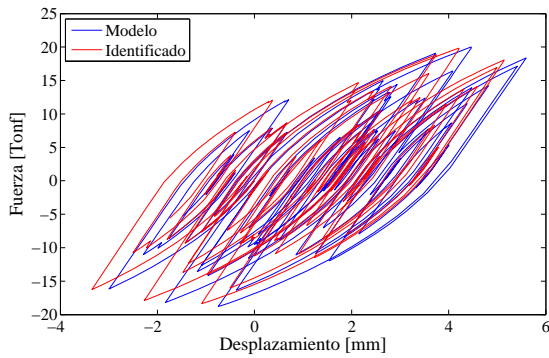
(b) Comparación aceleración nodo 30 Y



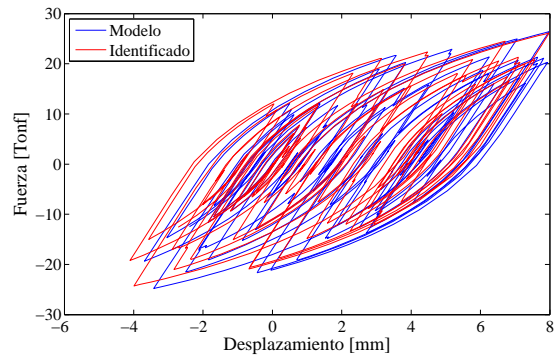
(c) Desplazamientos inferido en X, link 2 X



(d) Desplazamientos inferido en Y, link 2 Y



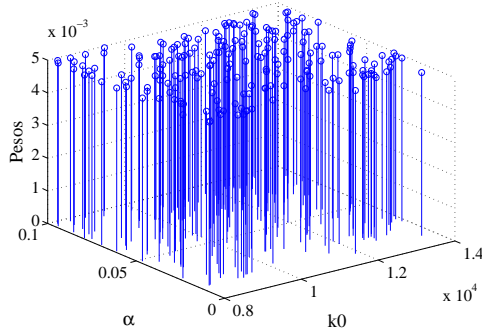
(e) Curva histerética inferida dirección X



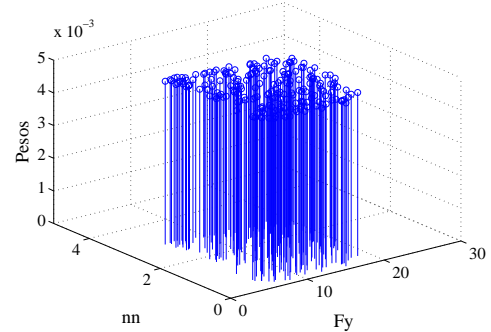
(f) Curva histerética inferida dirección Y

Figura 98: Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA histéresis débil

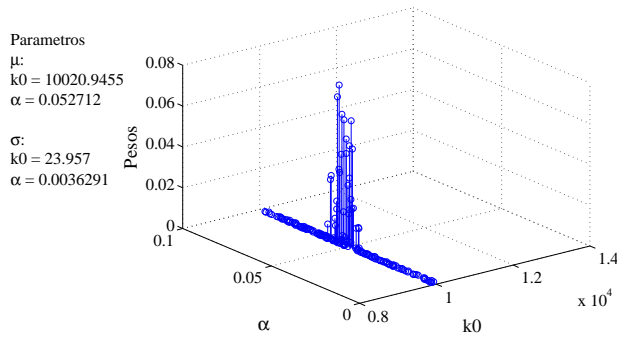
• Filtro de Partículas Histéresis Media



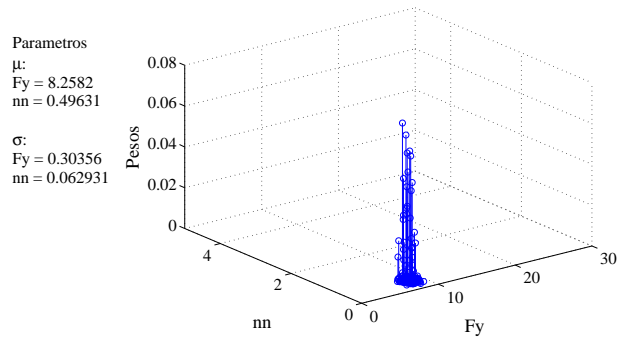
(a) Parámetros k y α Iteración 1



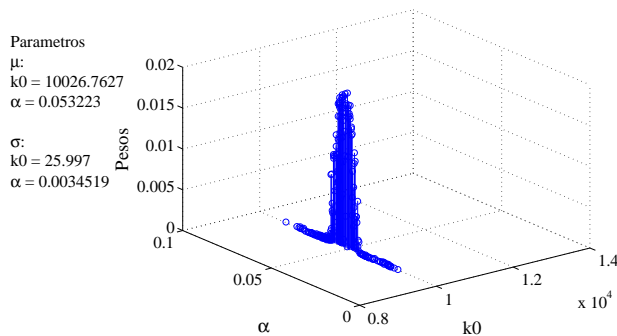
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



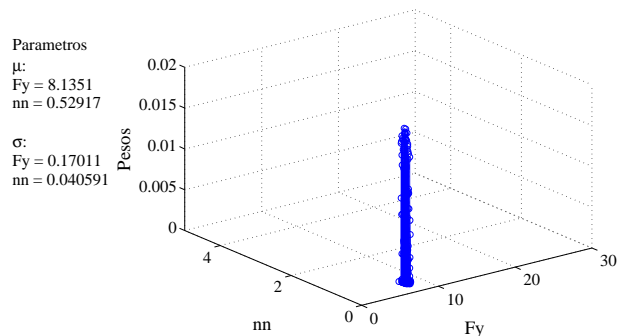
(c) Parámetros k y α Iteración 8



(d) Parámetros F_y y n Iteración 8

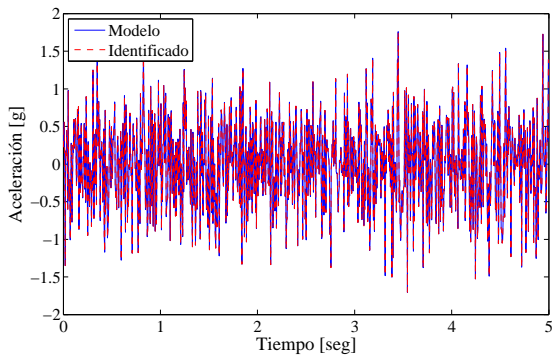


(e) Parámetros k y α Iteración 16

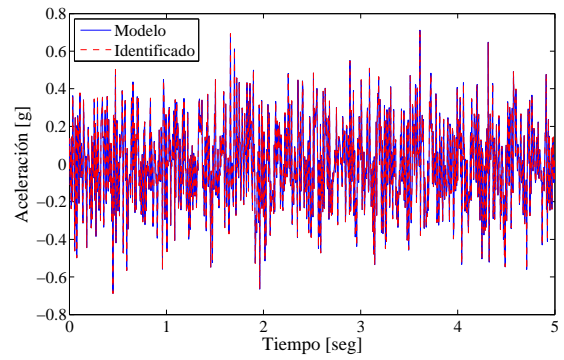


(f) Parámetros F_y y n Iteración 16

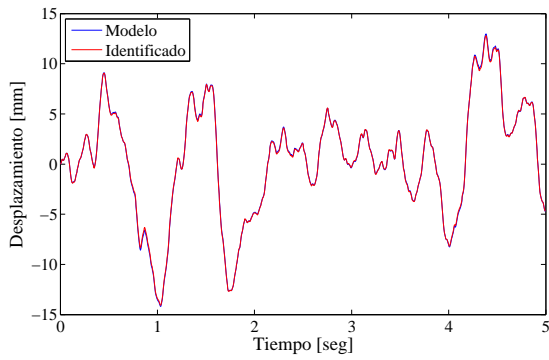
Figura 99: Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA histéresis Media



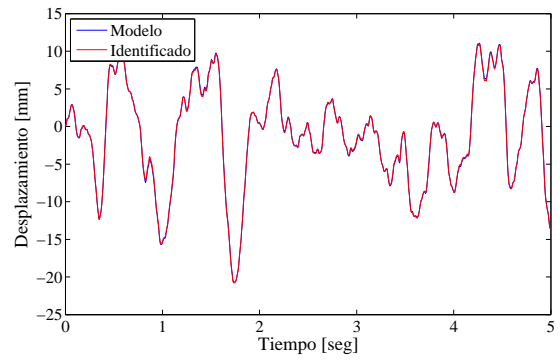
(a) Comparación aceleración nodo 45 X



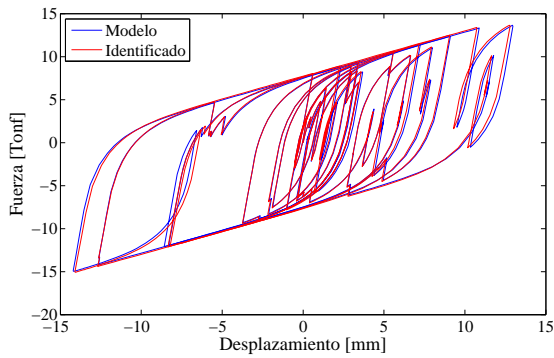
(b) Comparación aceleración nodo 30 Y



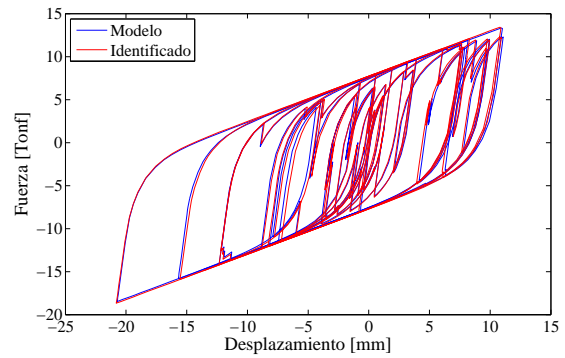
(c) Desplazamientos inferido link 2 X



(d) Desplazamientos inferido link 2 Y



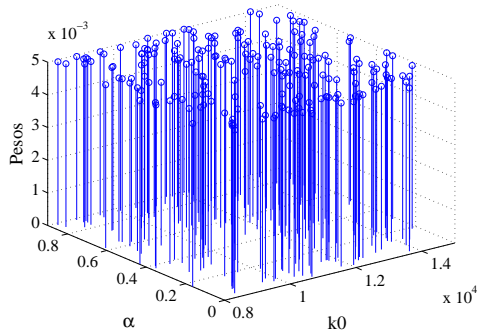
(e) Curva histerética inferida dirección X



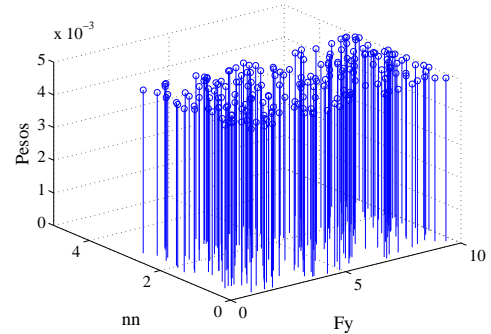
(f) Curva histerética inferida dirección Y

Figura 100: Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA histéresis Media

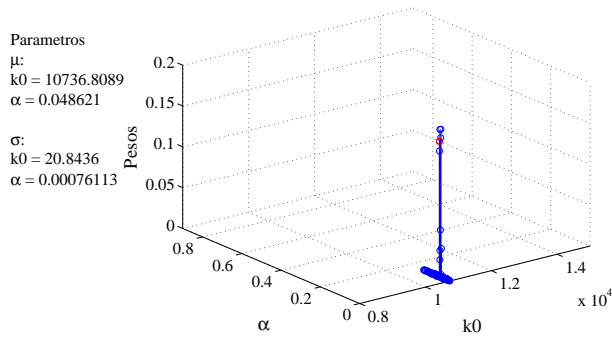
• Filtro de Partículas Histéresis Fuerte



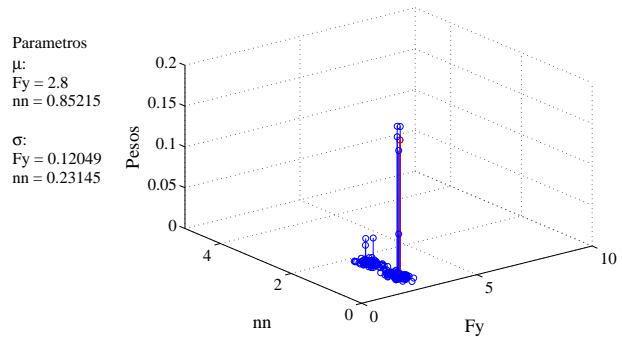
(a) Parámetros k y α Iteración 1



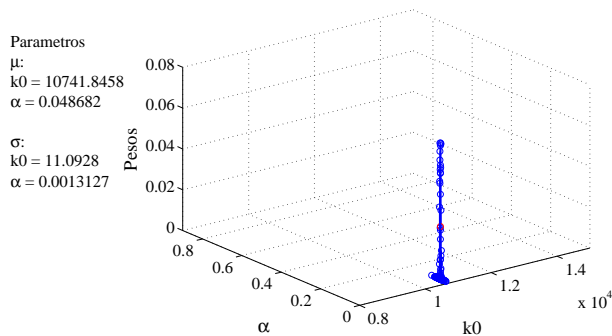
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



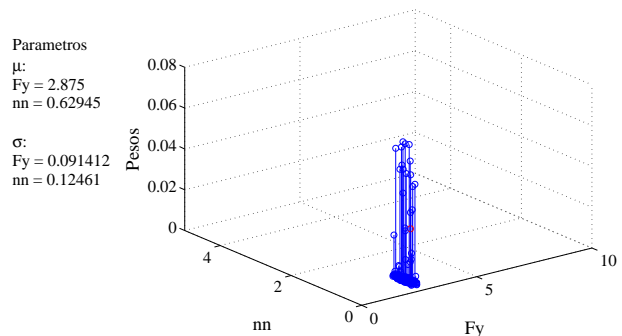
(c) Parámetros k y α Iteración 7



(d) Parámetros F_y y n Iteración 7

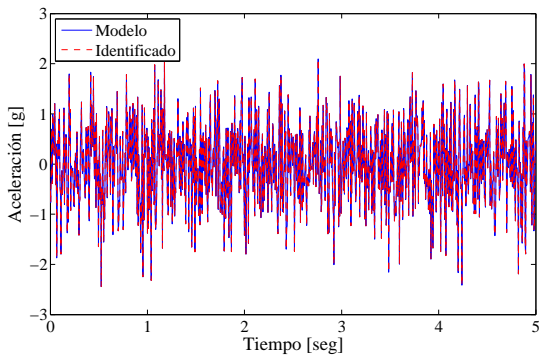


(e) Parámetros k y α Iteración 17

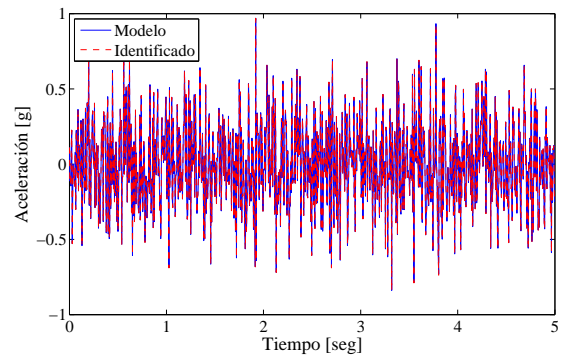


(f) Parámetros F_y y n Iteración 17

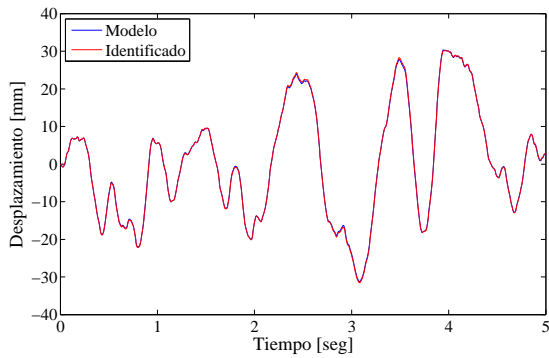
Figura 101: Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA histéresis Fuerte



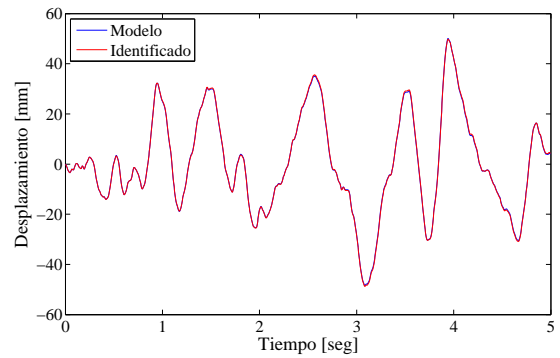
(a) Comparación aceleración nodo 45 X



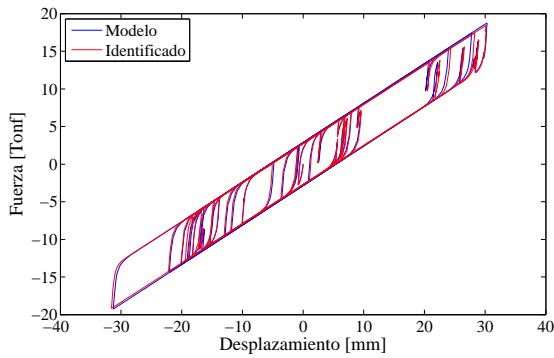
(b) Comparación aceleración nodo 30 Y



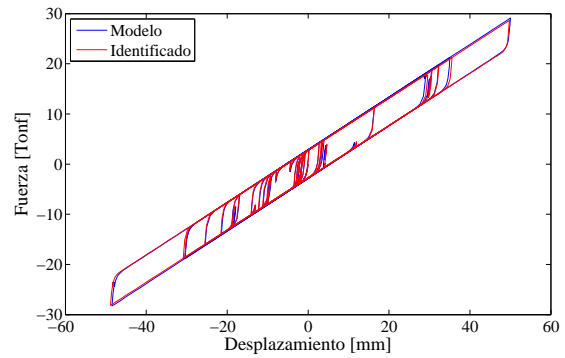
(c) Desplazamientos inferido link 2 X



(d) Desplazamientos inferido link 2 Y



(e) Curva histerética inferida dirección X



(f) Curva histerética inferida dirección Y

Figura 102: Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA histéresis Fuerte

4.4.5.2 Modelo MCAEA

Las Figuras 103, 105 y 107 presentan las distribuciones posteriores obtenidas para los parámetros del modelo MCAEA, las que muestran estimaciones precisas de la solución del sistema ante distintos niveles de no linealidad en la respuesta, aún considerando un número limitado de partículas ($N_p = 200$).

A diferencia de la identificación en el modelo MSBA, el caso histerético débil presenta una buena estimación para la rigidez inicial, mientras que exhibe un mayor nivel de incertidumbre tanto en la estimación de la razón de rigideces como en el esfuerzo de fluencia. Esto se debe a que el modelo de histéresis bilineal se encuentra definido por tramos independientes, con un tramo inicial presentando un comportamiento lineal elástico el cual es controlado solo por la rigidez inicial del modelo, presentando solo la participación de todos sus parámetros cuando se supera el desplazamiento de fluencia. Esto permite realizar una identificación efectiva para todas las componentes del vector de parámetros solo en los casos de histéresis media y fuerte.

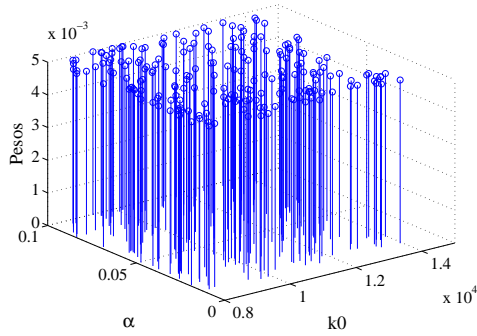
Al igual que en el caso del modelo MSBA se detectan múltiples regiones en el espacio paramétrico al que las partículas convergen, siendo posteriormente descartadas por el movimiento del conjunto de partículas a la vecindad de la solución buscada, permitiendo efectuar estimaciones precisas de las observaciones e inferencias del comportamiento no lineal de los aisladores, como se muestran en las Figuras 104, 106 y 108.

La limitación en el número de canales de observación no genera problemas en la capacidad de estimación del método, el cual debido al bajo nivel de incertidumbre en las observaciones con el aumento de no linealidad en la respuesta del sistema, depende mayormente de los factores anteriormente mencionados, tales como el número de partículas y la cercanía del conjunto inicial a la vecindad de la solución buscada debido a la particular forma aguda que presenta la función de verosimilitud en este tipo de problemas, producida por la alta densidad de datos en las observaciones ($N > 3000$).

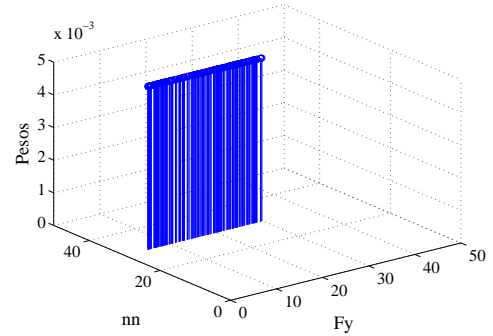
Esta condición también genera una mayor dependencia de la capacidad del modelo en la simulación de la respuesta observada, la cual muestra ser efectiva debido a que las respuestas utilizadas como observación en el procedimiento son generadas a partir del mismo modelo numérico, garantizando la capacidad de reproducir la respuesta ante los distintos estados histeréticos del sistema.

Los valores de los parámetros identificados para los modelos MSBA y MCAEA, mediante el cálculo de la esperanza de la distribución estimada y sus valores de desviación estándar respectivos, se resumen en las Tablas 34a-f

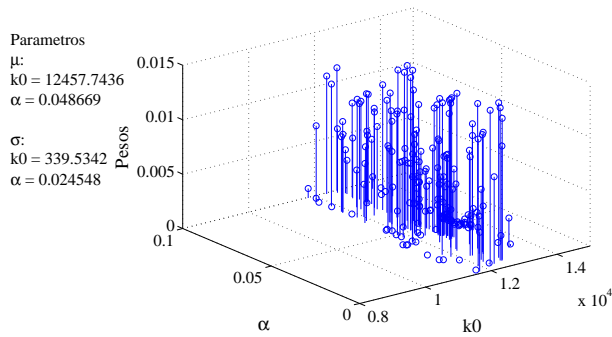
• Filtro de Partículas Histéresis Débil



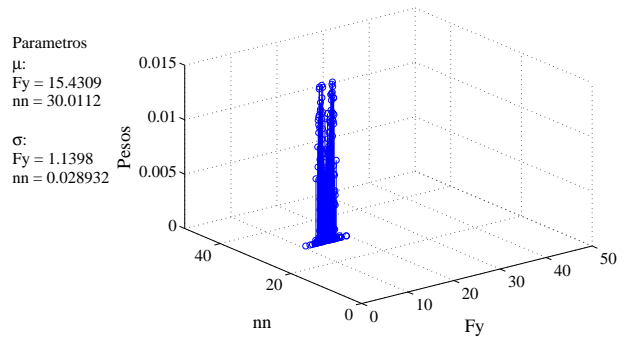
(a) Parámetros k y α Iteración 1



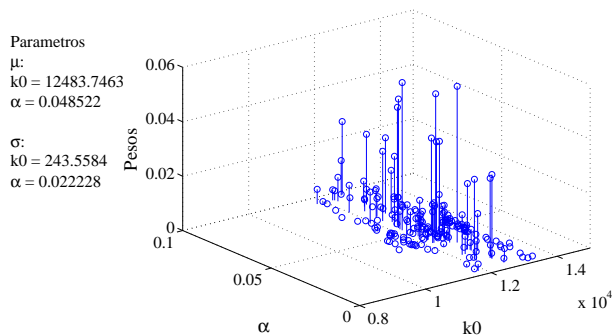
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



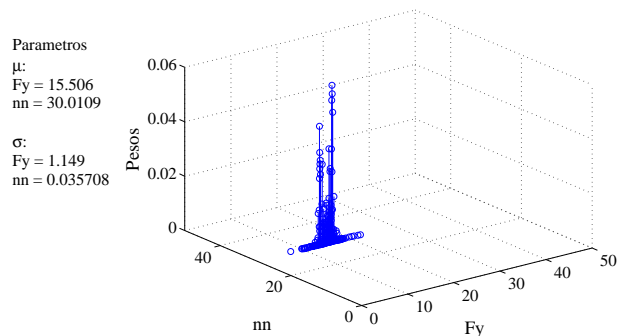
(c) Parámetros k y α Iteración 5



(d) Parámetros F_y y n Iteración 5

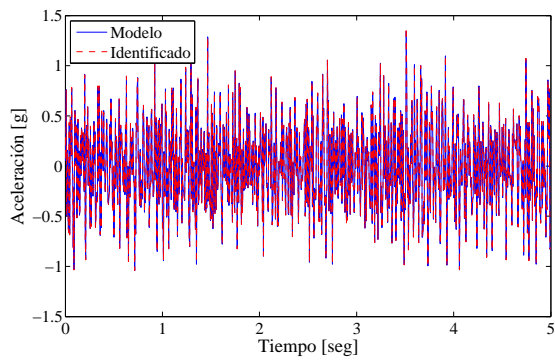


(e) Parámetros k y α Iteración 12

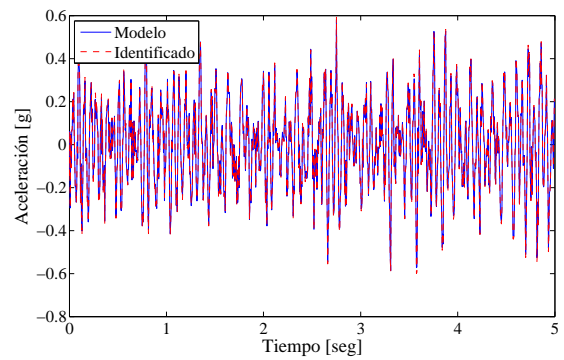


(f) Parámetros F_y y n Iteración 12

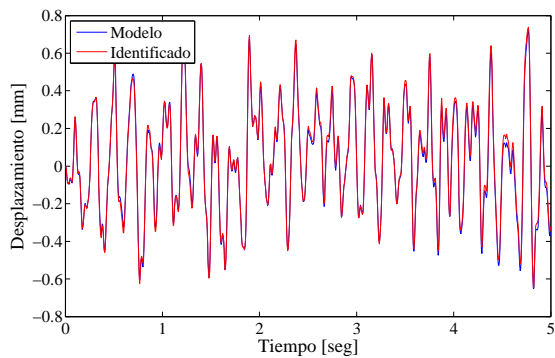
Figura 103: Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MCAEA histéresis débil



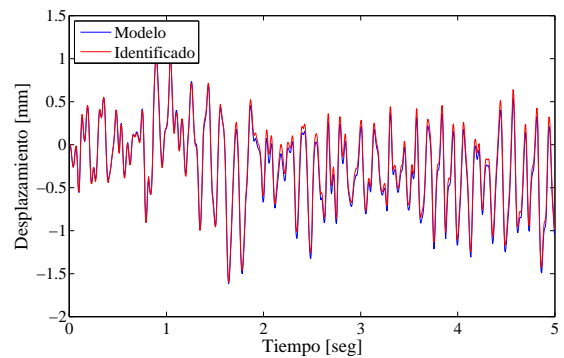
(a) Comparación aceleración nodo 84 X



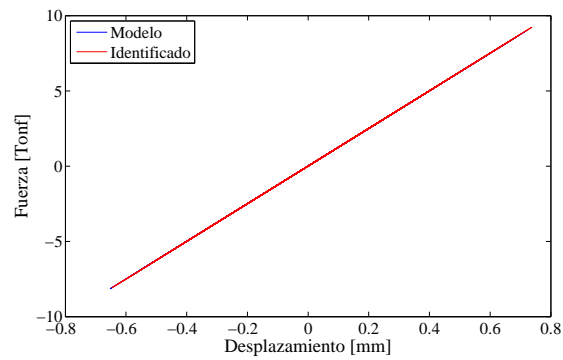
(b) Comparación aceleración nodo 1862 Y



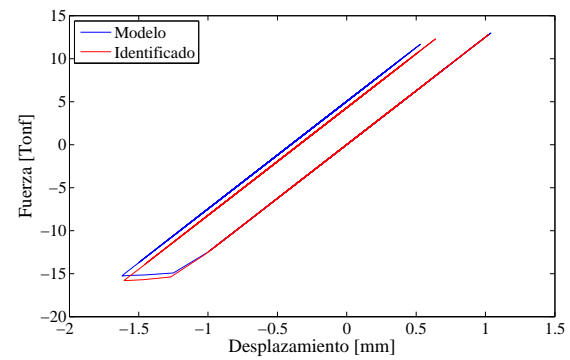
(c) Desplazamientos inferido link 28 X



(d) Desplazamientos inferido link 28 Y



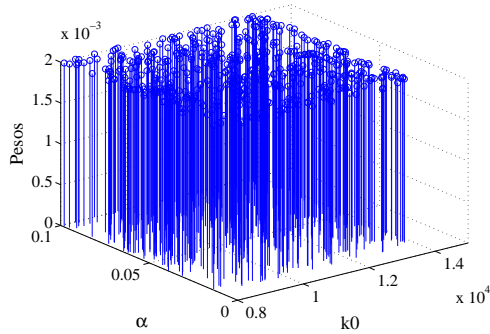
(e) Curva histerética inferida dirección X



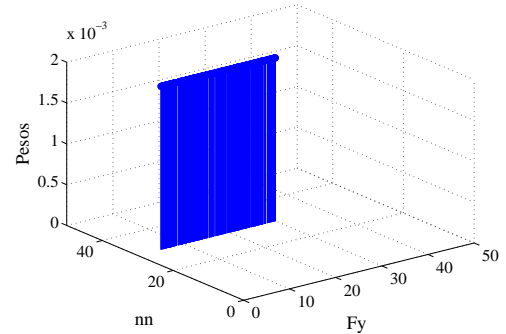
(f) Curva histerética inferida dirección Y

Figura 104: Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MCAEA histéresis débil

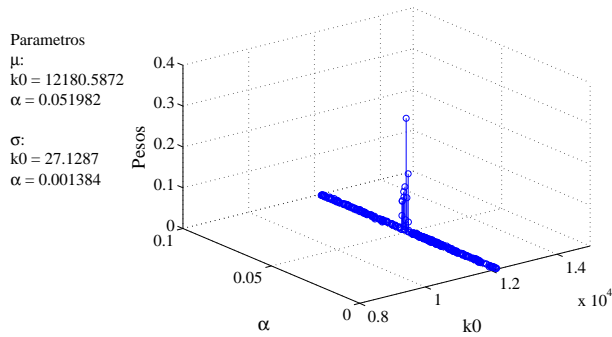
• Filtro de Partículas Histéresis Media



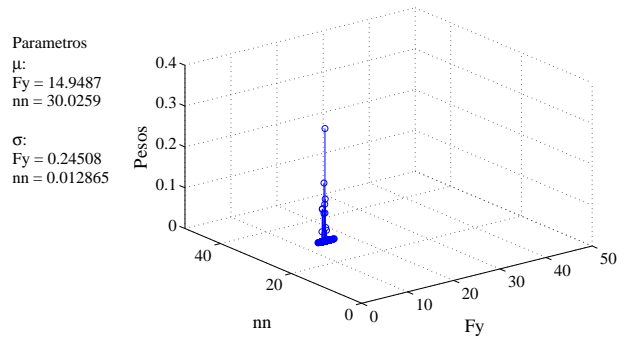
(a) Parámetros k y α Iteración 1



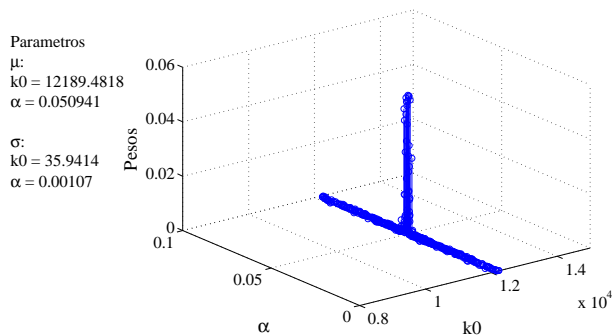
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



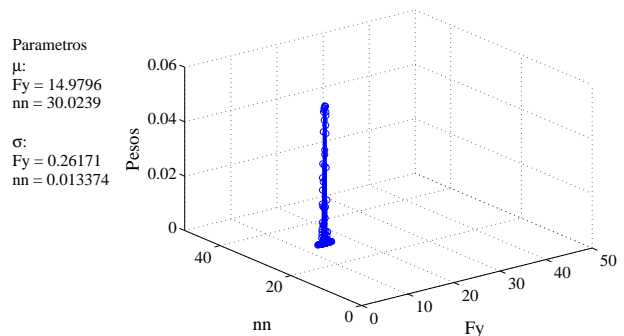
(c) Parámetros k y α Iteración 3



(d) Parámetros F_y y n Iteración 3

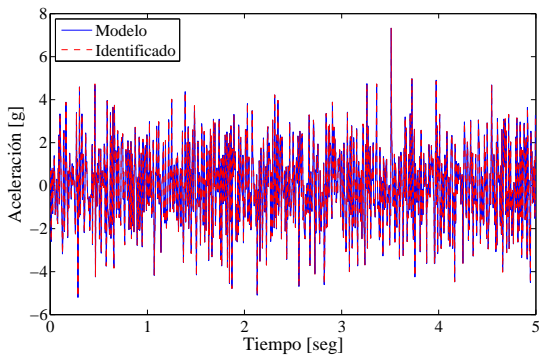


(e) Parámetros k y α Iteración 5

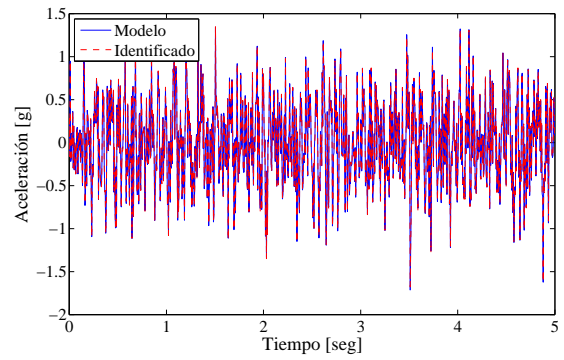


(f) Parámetros F_y y n Iteración 5

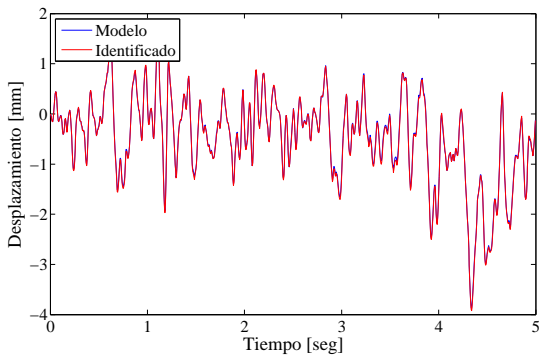
Figura 105: Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MCAEA histéresis Media



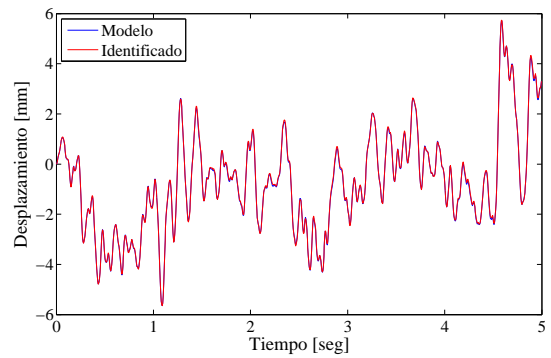
(a) Comparación aceleración nodo 84 X



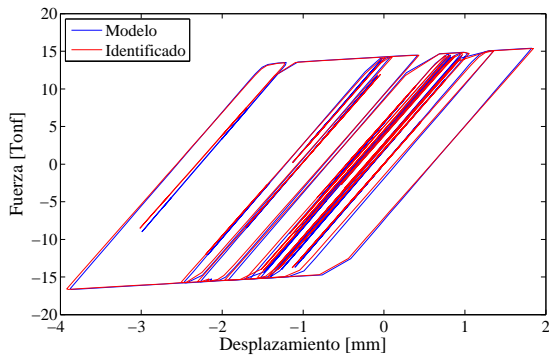
(b) Comparación aceleración nodo 1862 Y



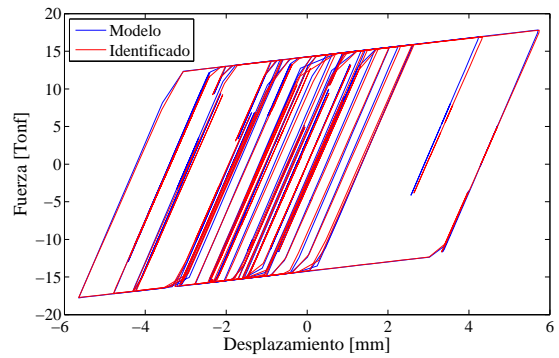
(c) Desplazamientos inferido nodo link 28 X



(d) Desplazamientos inferido nodo link 28 Y



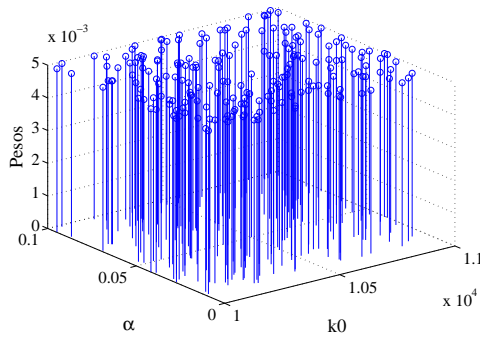
(e) Curva histerética inferida dirección X



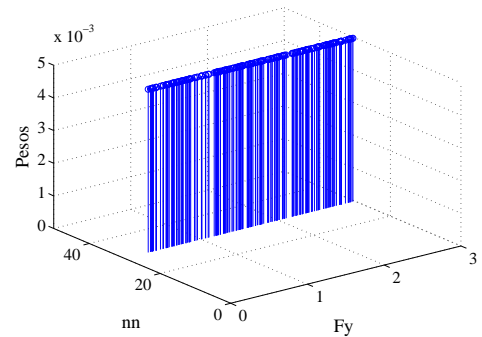
(f) Curva histerética inferida dirección Y

Figura 106: Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MCAEA histeresis Media

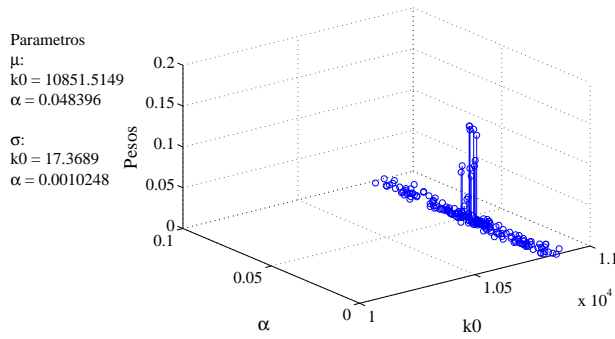
• Filtro de Partículas Histéresis Fuerte



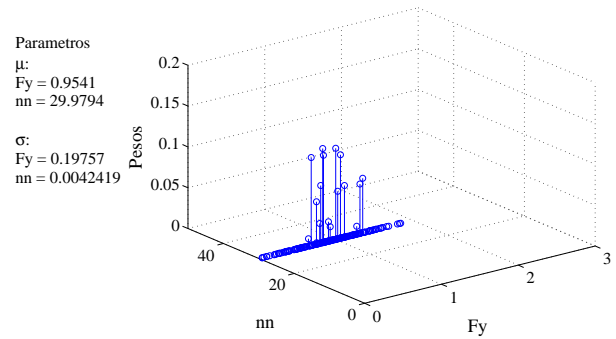
(a) Parámetros k y α Iteración 1



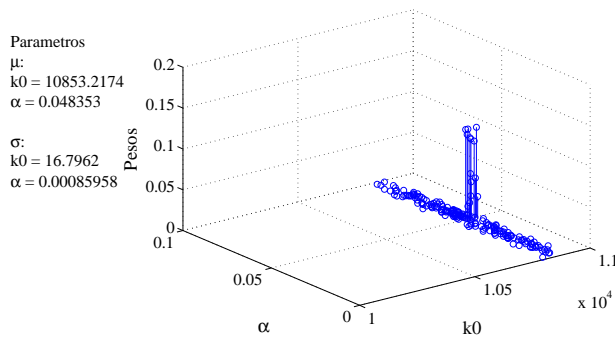
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



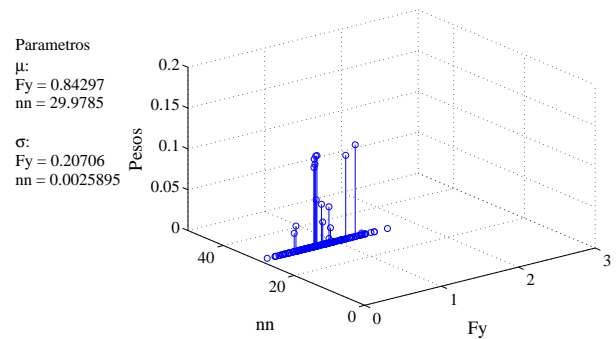
(c) Parámetros k y α Iteración 7



(d) Parámetros F_y y n Iteración 7

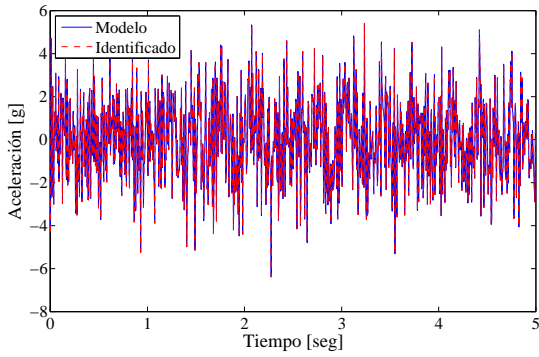


(e) Parámetros k y α Iteración 9

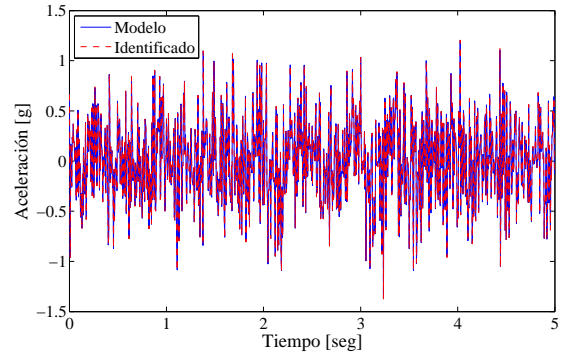


(f) Parámetros F_y y n Iteración 9

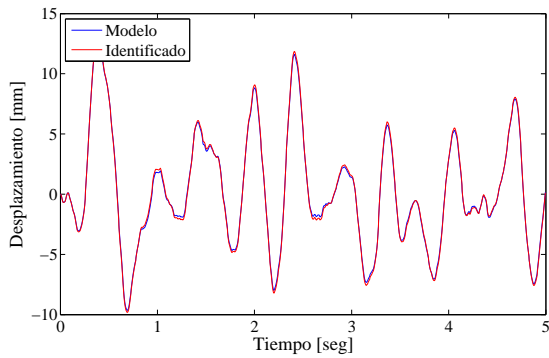
Figura 107: Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MCAEA histéresis Fuerte



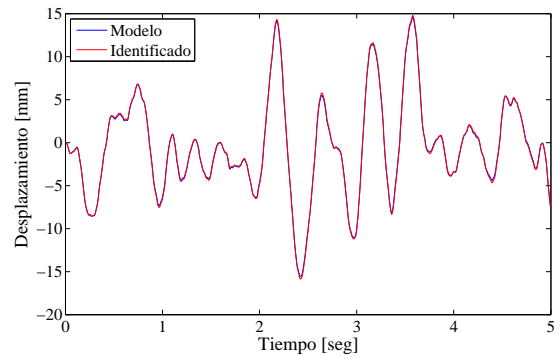
(a) Comparación aceleración nodo 84 X



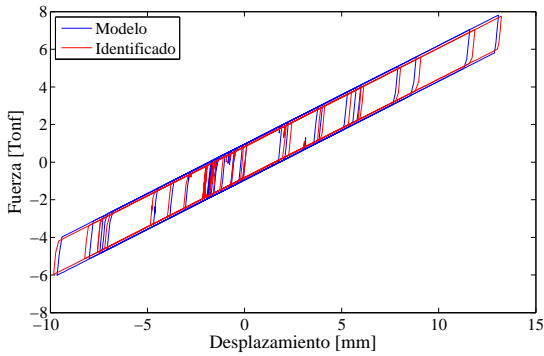
(b) Comparación aceleración nodo 1862 Y



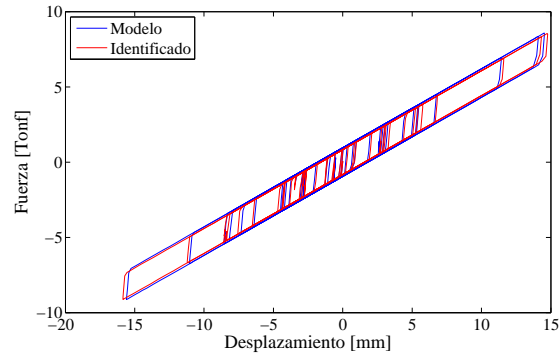
(c) Desplazamientos inferido link 28 X



(d) Desplazamientos inferido nodo link 28 Y



(e) Curva histerética inferida dirección X



(f) Curva histerética inferida dirección Y

Figura 108: Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MCAEA histéresis Fuerte

Modelo			
MSBA			
Param.	real	estimado	σ
k_0	10500	10899	18.44
α	0.05	0.058	0.012
Fy	30	27.89	0.44
n	0.5	0.48	0.02

(a) MSBA Histéresis Débil

Modelo			
MCAEA			
Param.	real	estimado	σ
k_0	12500	12483	243.5
α	0.05	0.048	0.022
Fy	15	15.5	1.15
n	30	30.01	0.035

(b) MCAEA Histéresis Débil

Modelo			
MSBA			
Param.	real	estimado	σ
k_0	10500	10026.7	25.9
α	0.05	0.053	0.003
Fy	8	8.14	0.17
n	0.5	0.53	0.041

(c) MSBA Histéresis Media

Modelo			
MCAEA			
Param.	real	estimado	σ
k_0	12500	12189	35.94
α	0.05	0.051	0.001
Fy	15	14.97	0.26
n	30	30.02	0.013

(d) MCAEA Histéresis Media

Modelo			
MSBA			
Param.	real	estimado	σ
k_0	10500	10741.8	11.1
α	0.05	0.048	0.0013
Fy	3	2.88	0.09
n	0.5	0.63	0.124

(e) MSBA Histéresis Fuerte

Modelo			
MCAEA			
Param.	real	estimado	σ
k_0	10500	10853.2	16.8
α	0.05	0.048	0.0008
Fy	1	0.842	0.21
n	30	29.97	0.002

(f) MCAEA Histéresis Fuerte

Tabla 34: Parámetros estimados mediante Filtro de Partículas para Modelos MSBA(a-c-e) Y MCAEA(b-d-f)

4.4.5.3 Comentarios de identificación mediante PF en modelos MSBA Y MCAEA

La identificación de los parámetros dinámicos mediante el algoritmo de Filtro de Partículas muestra ser efectivo para un nivel variable de no linealidad en el sistema, siendo capaz de estimar un valor cercano a la solución en todos los casos para ambos modelos, aún con un número limitado de partículas ($N = 200$) e iteraciones. Lo anterior permite estimar de forma precisa las respuestas de aceleración del sistema, utilizadas como observaciones en el procedimiento y a la vez efectuar inferencias de las respuestas no observables como el desplazamiento y el comportamiento histerético que exhibe el sistema.

Una diferencia apreciable entre la identificación de ambos modelos se presenta en la capacidad de identificación de parámetros en distintos niveles de no linealidad, donde para el caso de un modelo histerético bilineal suavizado como el de Bouc-Wen (MSBA), todos los parámetros muestran una estimación cercana a la solución real incluso ante niveles de excitación bajas, donde presumiblemente los parámetros asociados al comportamiento plástico de los aisladores no participan de forma predominante. El resultado puede ser justificado debido a que el modelo lo compone una función continua que depende de los 4 parámetros independiente del nivel de respuesta que presenta la estructura.

Por el contrario, con la inclusión de un modelo histerético bilineal definiendo el tramo inicial y de post fluencia (o equivalentemente, un modelo con un valor del exponente n elevado como en el caso del modelo MCAEA), la efectividad en la identificación de los parámetros asociados al comportamiento plástico, tales como el esfuerzo de fluencia y la razón de rigideces, se hace mas dificultosa, debido a que en este modelo ambos comportamientos quedan diferenciados de mayor forma, presentando valores con un grado de dispersión no despreciable en su estimación ante la ocurrencia de un nivel de excitación lo suficientemente bajo para permanecer en el rango lineal elástico de la curva histerética, donde solo participa la rigidez inicial.

Tanto la cantidad de partículas como la definición de la distribución inicial muestran ser importantes en la búsqueda de la solución, donde la presencia inicial de una partícula cercana a la solución permite favorecer la convergencia del método. Esta dependencia ocurre principalmente en el tipo de sistema abordado en el estudio, el cual posee una gran cantidad de datos de observación debido a la frecuencia de muestreo ($F_s = 200$ Hz, $N \gg 1000$), lo que produce una función de verosimilitud particularmente aguda, provocando que ante un número reducido de partículas en un espacio no acotado adecuadamente, asigne casi la totalidad del peso de la distribución a una sola partícula, reduciendo la resolución de la distribución inicial estimada y haciendo susceptible a reagrupar en un numero bajo de iteraciones el conjunto de partículas alrededor de la solución encontrada.

En algunos casos, la combinación de esta forma de función de verosimilitud, y la baja cantidad de partículas produjo que la verosimilitud de las muestras quedara fuera de las regiones de alta probabilidad, generando partículas con pesos disimiles en ordenes de magnitud, aspecto que en la etapa de normalización generaba distribuciones con baja resolución, concentrando todo el peso en una sola partícula, o bien el reinicio del algoritmo para la generación de un nuevo set de muestras, cuando estas no se encontraban lo suficientemente cercanas de la vecindad de valores con pesos no nulos de la función.

Dado lo anterior, la efectividad en la obtención de la solución resulta ser bastante sensible a su vez del nivel de ruido asignado para la búsqueda de los parámetros mediante el proceso de random walk, debido a que un alto nivel de ruido de búsqueda puede alejar las partículas que concentran gran parte del peso de la distribución, y que efectivamente se encuentran en la vecindad de la solución buscada. Para mejorar este aspecto, se consideró la asignación de ruido de forma inversamente proporcional al peso de la partícula, con el objetivo de desplazar en menor medida aquellas partículas que concentren la mayor cantidad de peso de la distribución. Además, también se asignó una reducción porcentual del ruido de búsqueda para cada parámetro, el cual se efectúa cada vez que un remuestreo de las partículas ocurre, observándose que ambas favorecen la estabilidad de las partículas que se encuentran en regiones de alta probabilidad.

Finalmente, cabe destacar que la convergencia de las partículas a la solución real se obtiene con distintos niveles de ruido de observación, lo cual queda garantizado principalmente por 2 características en el procedimiento de identificación: 1) El ruido de observación corresponde a un ruido blanco gaussiano de media nula y de varianza conocida, la cual también es utilizada para generar los ruidos de observación en las respuestas simuladas por cada partícula, y 2) el modelo en el cual se basa la identificación del sistema corresponde a la relación numérica que genera las respuestas “reales” utilizadas como observación. En este último punto, cabe mencionar que el modelo se encuentra calibrado con parámetros conocidos de la superestructura, que corresponden efectivamente a aquellas asumidas en el modelo que genera el conjunto de observaciones reales del sistema.

4.6. ANÁLISIS COMPLEMENTARIO

La presente sección se enfoca en los factores que afectan el desempeño de las técnicas de identificación en estudio. Esta abordan los temas: 1) Variación del nivel de ruido de observación, 2) Uso de modelo acoplado de histéresis, 3) Limitaciones del modelo numérico y 4) Incorporación de función de verosimilitud sigmoideal en el Filtro de Partículas.

4.6.1 ANALISIS DE SENSIBILIDAD AL RUIDO DE OBSERVACION

A continuación se analiza el alcance mostrado por las técnicas de identificación aplicadas en las secciones anteriores, con un aumento en el nivel de ruido de observación en las respuestas de aceleración utilizadas (Figura 109). La perturbación es modelada como un ruido blanco gaussiano de media nula y amplitud máxima igual a un determinado porcentaje del máximo de la señal, acorde a los valores indicados en la Tabla 35.

Ruido gaussiano de media nula		
Caso	% de $\max(\ddot{u}(t))$	SNR
1	5	3.7 - 4.2
2	10	1.7 - 2.2
3	20	0.9 - 1

Tabla 35: Características de ruido incorporado a la observación $\ddot{u}(t)$

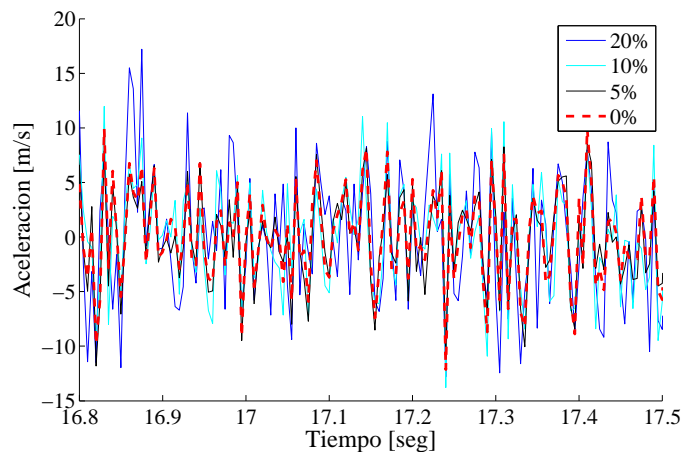


Figura 109: Comparación de respuestas con ruido del 5, 10 y 20 % del máximo de la señal

4.6.1.1 Identificación de propiedades modales

En los espectros de frecuencia obtenidos por PSD (Figura 110), la incorporación de ruido provoca un aumento en la amplitud de las frecuencias contenidas en la señal para el rango de interés, dificultando la identificación de los modos que presentan una menor participación en la respuesta de la estructura, como en el caso de los modos superiores. Sin embargo, la identificación del primer modo muestra ser precisa, hasta alcanzar el nivel de ruido del 20 % ($SNR < 1$), donde la aparición de frecuencias con amplitudes del orden del 60 % de la amplitud de dicho modo disminuyen la resolución del espectro, provocando a la vez que la estimación del amortiguamiento sea mucho mas variable.

Por otra parte, las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) muestran ser mas sensibles a la incorporación de ruido en comparación a los espectros de frecuencias (Figura 111) particularmente para la identificación de los modos superiores, donde con un ruido del 10 % se obtienen formas irregulares de la función en dicho rango de frecuencias, haciéndose mas notorio con el aumento de no linealidad en el sistema. Mientras que la identificación del primer modo muestra ser relativamente precisa hasta el caso de la incorporación de ruido del 20 %, permitiendo ante perturbaciones mayores y un aumento de la no linealidad, estimar solamente las amplitudes asociadas a su forma modal.

Cabe notar que para efecto de los resultados mostrados en las Figuras 110-111, el desempeño las técnicas no paramétricas se ve favorecido por el uso de registros ubicados en nodos centrales para la dirección de excitación (45-X), por lo que el efecto de dichos niveles de ruido en la identificación mediante registros en posiciones laterales provocaría una menor capacidad de estimación en comparación a las mostradas, limitando el alcance de este tipo de técnicas en dichas condiciones.

El aumento en el nivel de perturbación provoca la identificación de una menor cantidad de polos estables en el procedimiento de identificación mediante MOESP-MW, tanto para los casos histeréticos debil (D) y fuerte (D), siendo este último mayormente afectado, permitiendo solo obtener una estimación para el primer modo de la estructura ante un nivel de ruido menor al caso del 10 % (Figura 112).

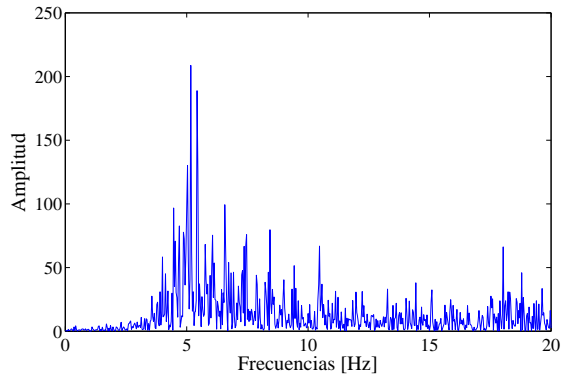
La identificación del caso histerético débil se ve afectado principalmente en capacidad de estimación de los modos superiores (Figura 113), pudiendo detectar parcialmente la frecuencia del primer modo de la estructura en un caso de ruido extremo ($SNR < 1$). De la misma forma la estimación del amortiguamiento para el primer modo se ve limitado acorde al aumento de perturbación en la señal, presentando un comportamiento irregular y variable en los casos mostrados.

La identificación mediante RPEM muestra que un aumento considerable del nivel de ruido provoca una elección del modelo polinomial menos robusta. Esto se debe a que los modelos candidatos muestran una capacidad similar de ajuste en la respuesta de la estructura, haciendo que los criterios de selección (AIC, BIC, FPE) difieran en relación al modelo a escoger, basados principalmente en el orden del modelo escogido.

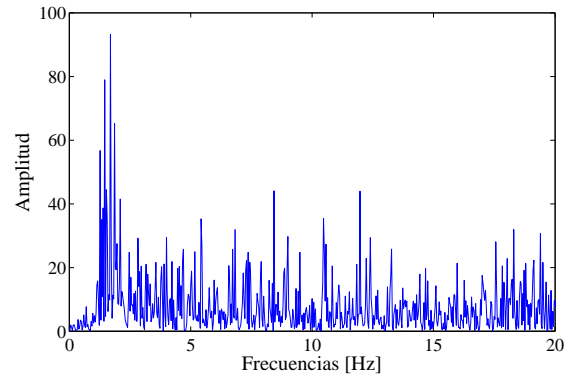
Con esto, la selección del modelo pasa a tener una mayor dependencia del conocimiento a priori del sistema, particularmente en los rangos de frecuencias de los modos superiores de la estructura, para los cuales se aumentó el límite admisible de amortiguamiento al 15 %, con el objetivo de eliminar los modos espurios de los candidatos según AIC y BIC, los cuales difieren principalmente en la cantidad de modos estimados según el orden del polinomio autorregresivo.

Considerando lo anterior, se obtienen estimaciones precisas de frecuencias para el caso histerético débil, asociadas a una variabilidad creciente del amortiguamiento identificado para el primer modo con el aumento de ruido en la señal (Figura 114). Mientras que para el caso de histéresis fuerte, solo se obtiene una estimación de las propiedades modales estables para un nivel de SNR > 4 , no logrando identificar un modelo polinomial que entregue valores coherentes respecto a las propiedades modales del sistema ante niveles de ruido de observación mayores (Figura 115).

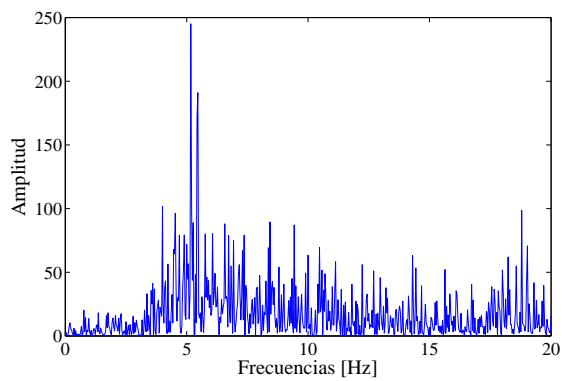
Finalmente, tomando en cuenta que un evento sísmico comprende una fase débil (extremos del registro) y una fase fuerte de excitación, y que en la práctica el ruido instrumental típicamente se mantiene bajo umbrales de varianzas que alcanzan el orden del 10 % del máximo de la respuesta débil de la estructura (presentando un SNR variable en la duración del registro que tiende a decrecer en la fase fuerte de la respuesta) el análisis realizado permite inferir de forma preliminar que el desempeño de los métodos debiese ser suficiente para estimar de manera precisa las propiedades modales de un sistema aislado sujeto a las distintas fases de una excitación sísmica.



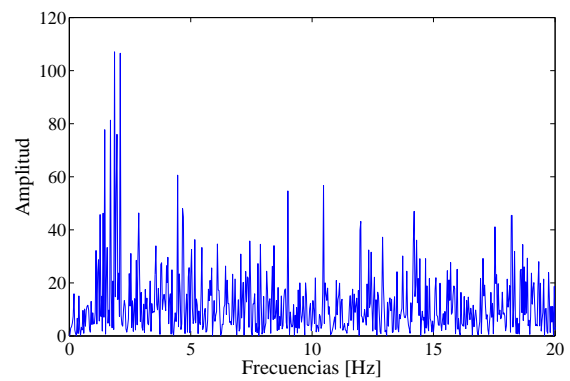
(a) Espectro PSD Caso D1



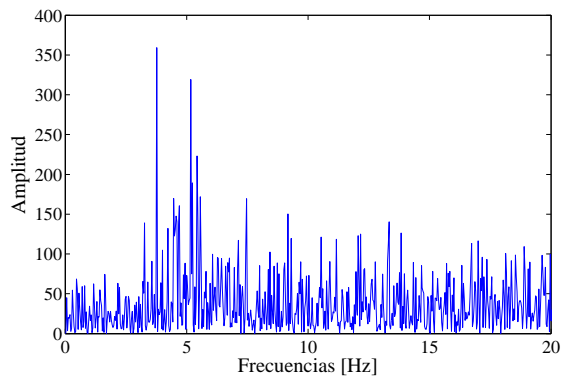
(b) Espectro PSD Caso F1



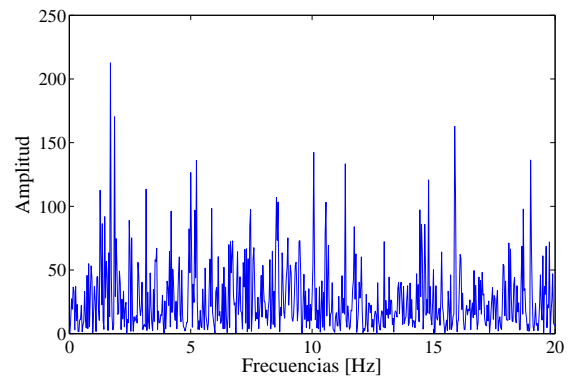
(c) Espectro PSD Caso D2



(d) Espectro PSD Caso F2

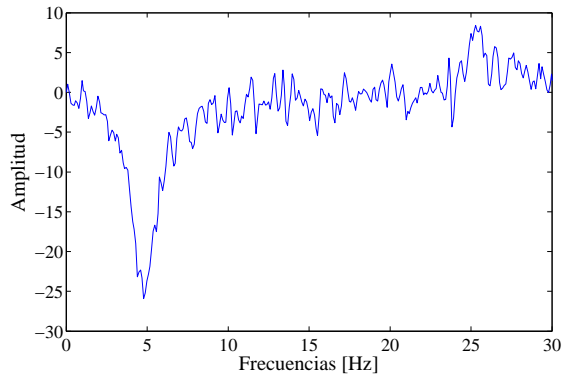


(e) Espectro PSD Caso D3

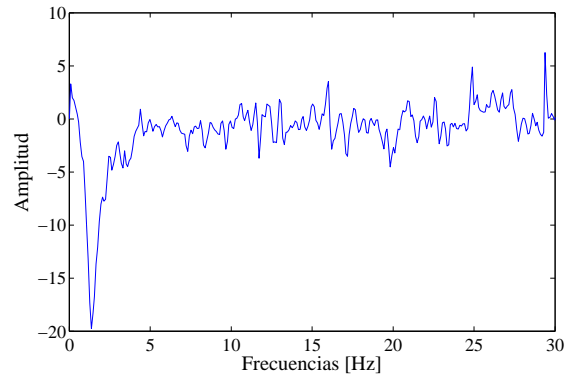


(f) Espectro PSD Caso F3

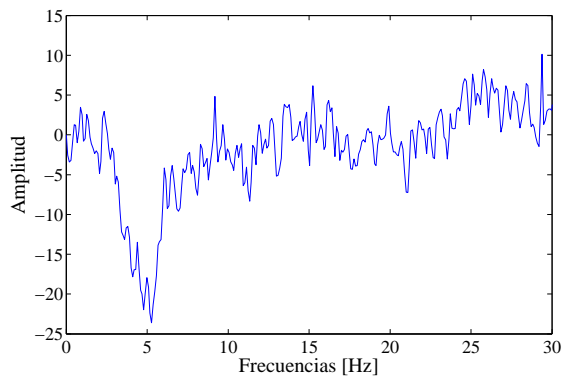
Figura 110: Identificación mediante PSD en Modelo MSBA con Histéresis Debil(a-c-e) y Extrema(b-d-f) con nivel de ruido de observación variable



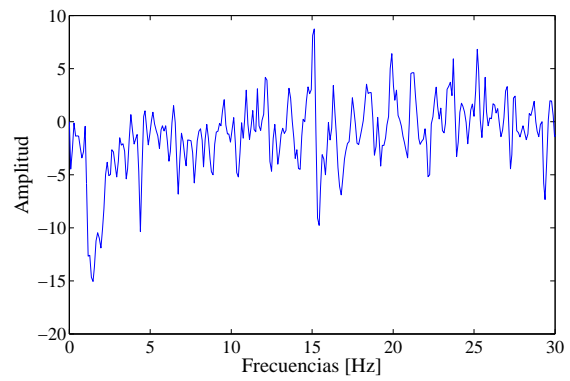
(a) FRF Caso D1



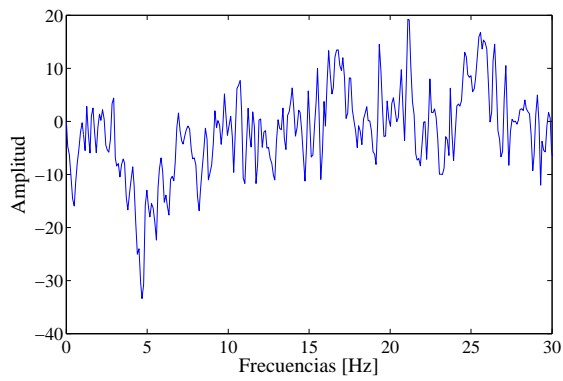
(b) FRF Caso F1



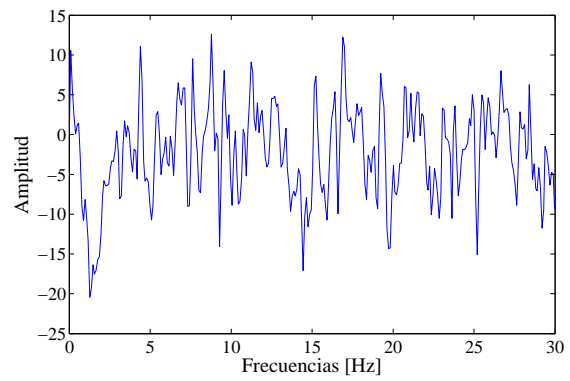
(c) FRF Caso D2



(d) FRF Caso F2

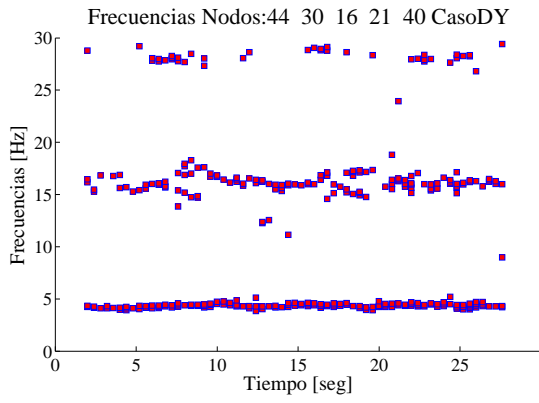


(e) FRF Caso D3

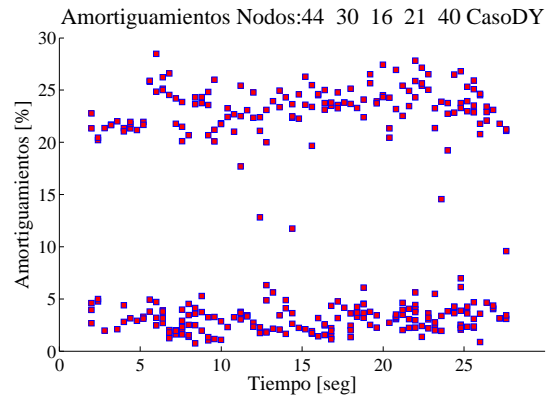


(f) FRF Caso F3

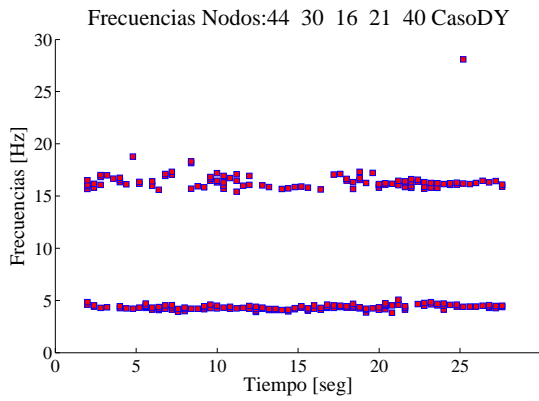
Figura 111: Funciones de respuesta en Frecuencia en Modelo MSBA con Histéresis Débil(a-c-e) y Extrema(b-d-f) con nivel de ruido de observación variable



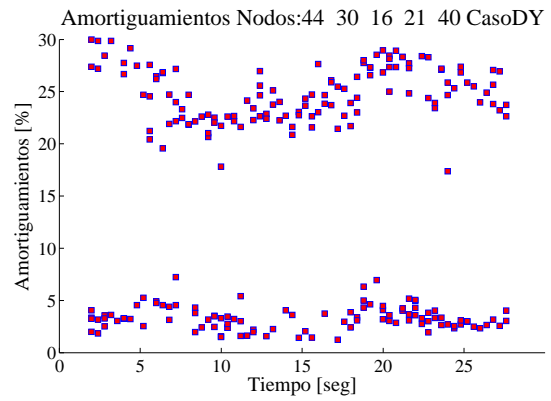
(a) Frecuencias identificadas Caso D1



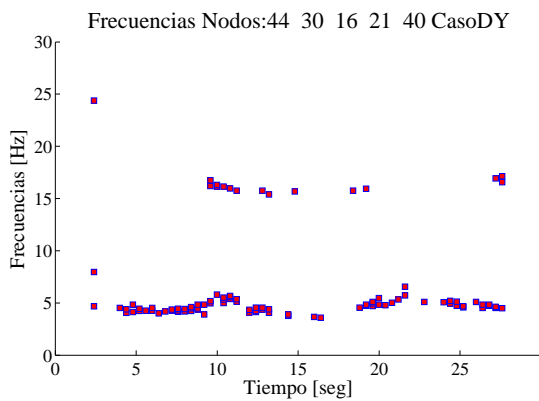
(b) Amortiguamientos identificados Caso D1



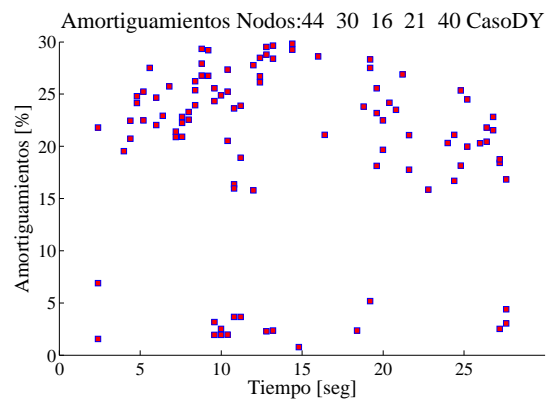
(c) Frecuencias identificadas Caso D2



(d) Amortiguamientos identificados Caso D2

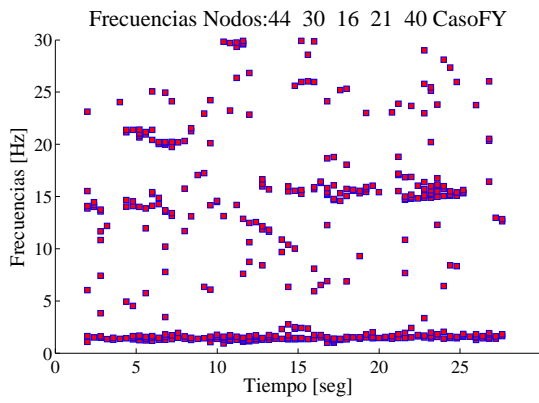


(e) Frecuencias identificadas Caso D3

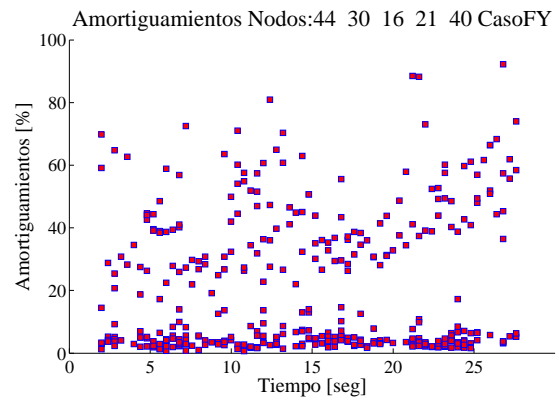


(f) Amortiguamientos identificados Caso D3

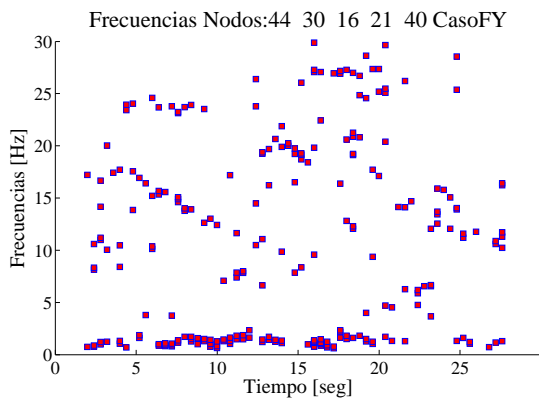
Figura 112: Identificación mediante MOESP-MW en Modelo MSBA con Histéresis Débil con nivel de ruido de observación variable



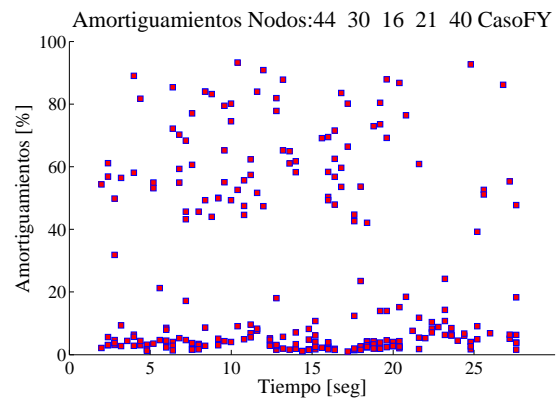
(a) Frecuencias identificadas Caso F1



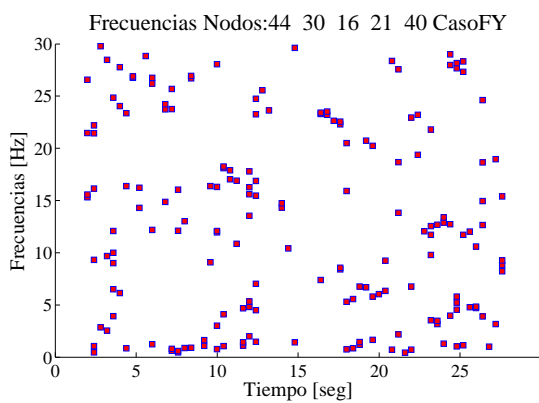
(b) Amortiguamientos identificados Caso F1



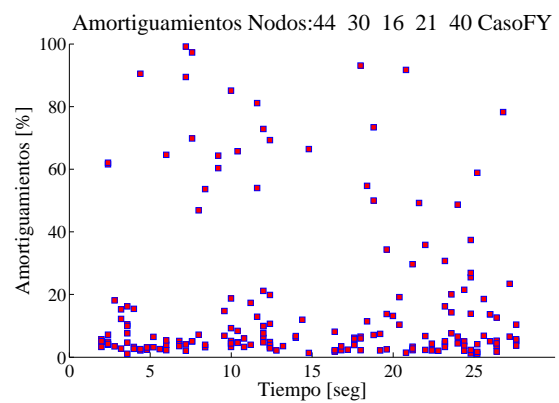
(c) Frecuencias identificadas Caso F2



(d) Amortiguamientos identificados Caso F2

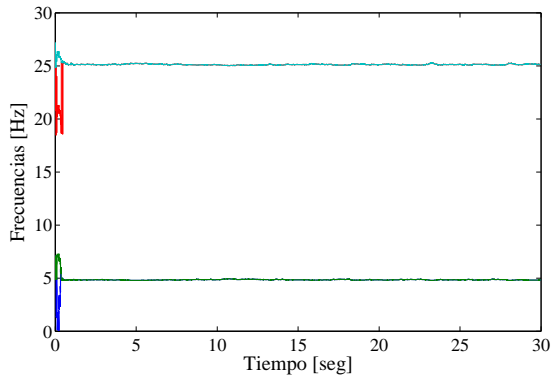


(e) Frecuencias identificadas Caso F3

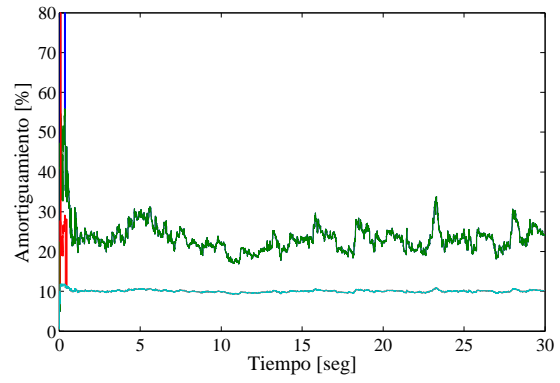


(f) Amortiguamientos identificados Caso F3

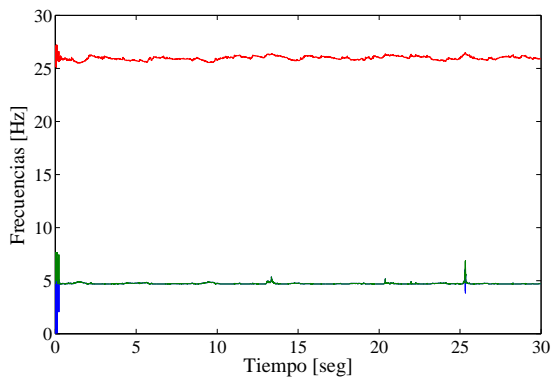
Figura 113: Identificación mediante MOESP-MW en Modelo MSBA con Histéresis Extrema con nivel de ruido de observación variable



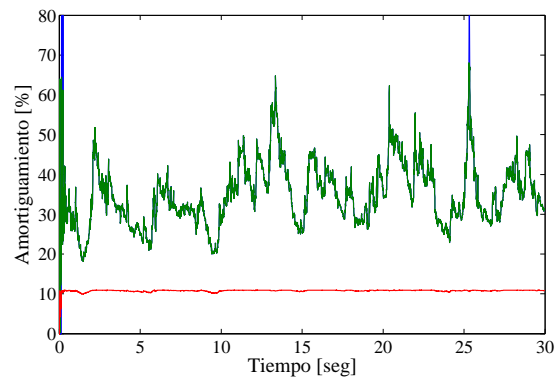
(a) Frecuencias identificadas Caso D1



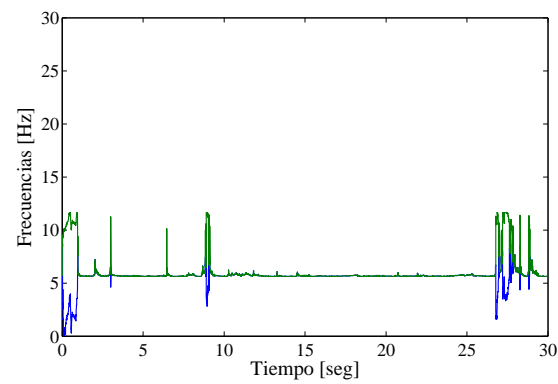
(b) Amortiguamientos identificados Caso D1



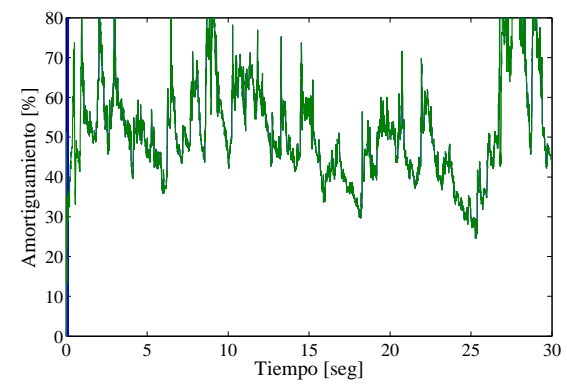
(c) Frecuencias identificadas Caso D2



(d) Amortiguamientos identificados Caso D2

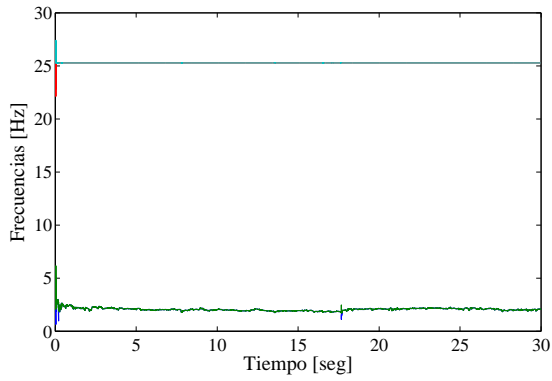


(e) Frecuencias identificadas Caso D3

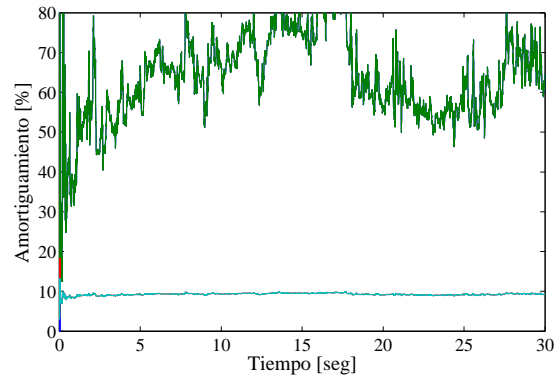


(f) Amortiguamientos identificados Caso D3

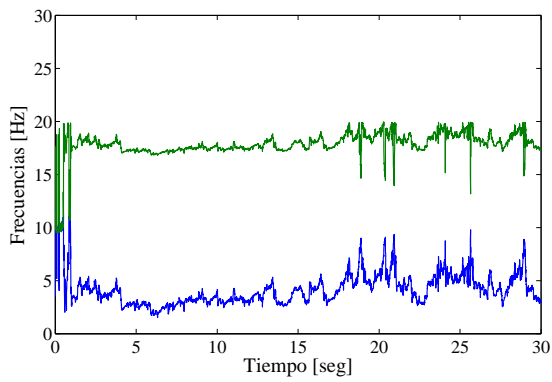
Figura 114: Identificación mediante RPEM- λ en Modelo MSBA con Histéresis Débil con nivel de ruido de observación variable



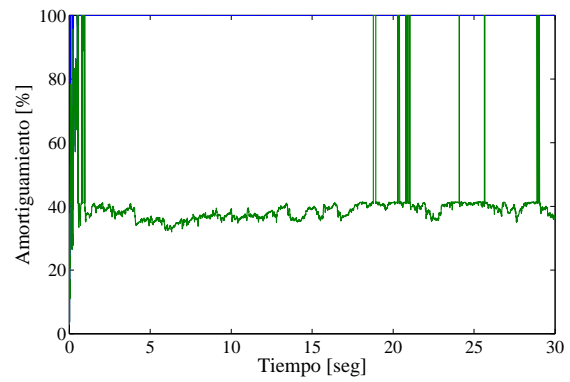
(a) Frecuencias identificadas Caso F1



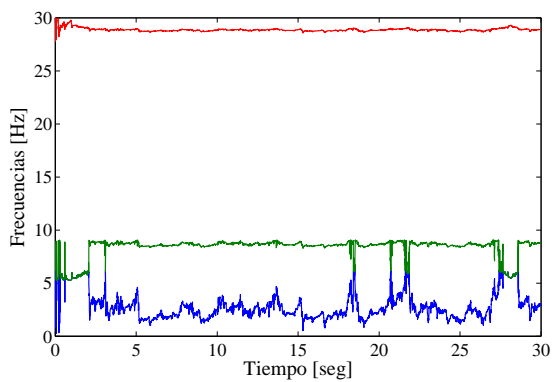
(b) Amortiguamientos identificados Caso F1



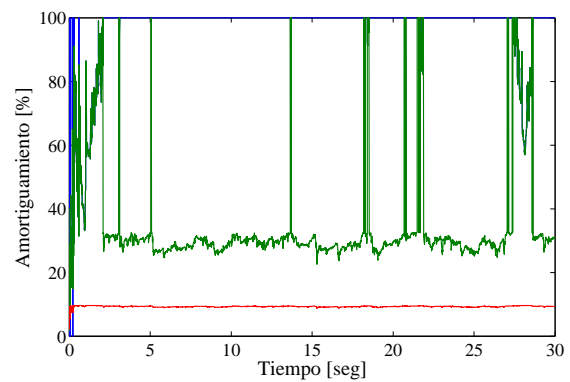
(c) Frecuencias identificadas Caso F2



(d) Amortiguamientos identificados Caso F2



(e) Frecuencias identificadas Caso F3



(f) Amortiguamientos identificados Caso F3

Figura 115: Identificación mediante RPEM- λ en Modelo MSBA con Histéresis Extrema con nivel de ruido de observación variable

4.6.1.2 Identificación mediante Filtro de Partículas

En el caso del Filtro de Partículas, la perturbación en la observación es definida como un proceso gaussiano de media nula y una varianza conocida, la cual mediante propiedades probabilísticas produce que el MSE asociado a las partículas distribuya acorde a una función $\Gamma(N \cdot L/2, 2/N)$. Esta característica permite la convergencia a las partículas mas cercanas a la solución, asignándoles un peso mayor acorde al valor de su verosimilitud.

Sin embargo, en la medida en que el nivel de ruido aumenta, se observa que dicha función es mas susceptible a aceptar una mayor cantidad de partículas asociándoles un valor alto de verosimilitud (Figura 116). Esto resulta consistente con que altos niveles de ruido implican una mayor incertidumbre en la observación, provocando que el método no sea capaz de identificar completamente la respuesta proveniente del sistema. Esto abre paso a otras partículas como posibles soluciones factibles (Figura 116a), dificultando el filtrado de pesos de cada partícula para la obtención de una distribución de probabilidad de los parámetros a estimar con una mejor resolución.

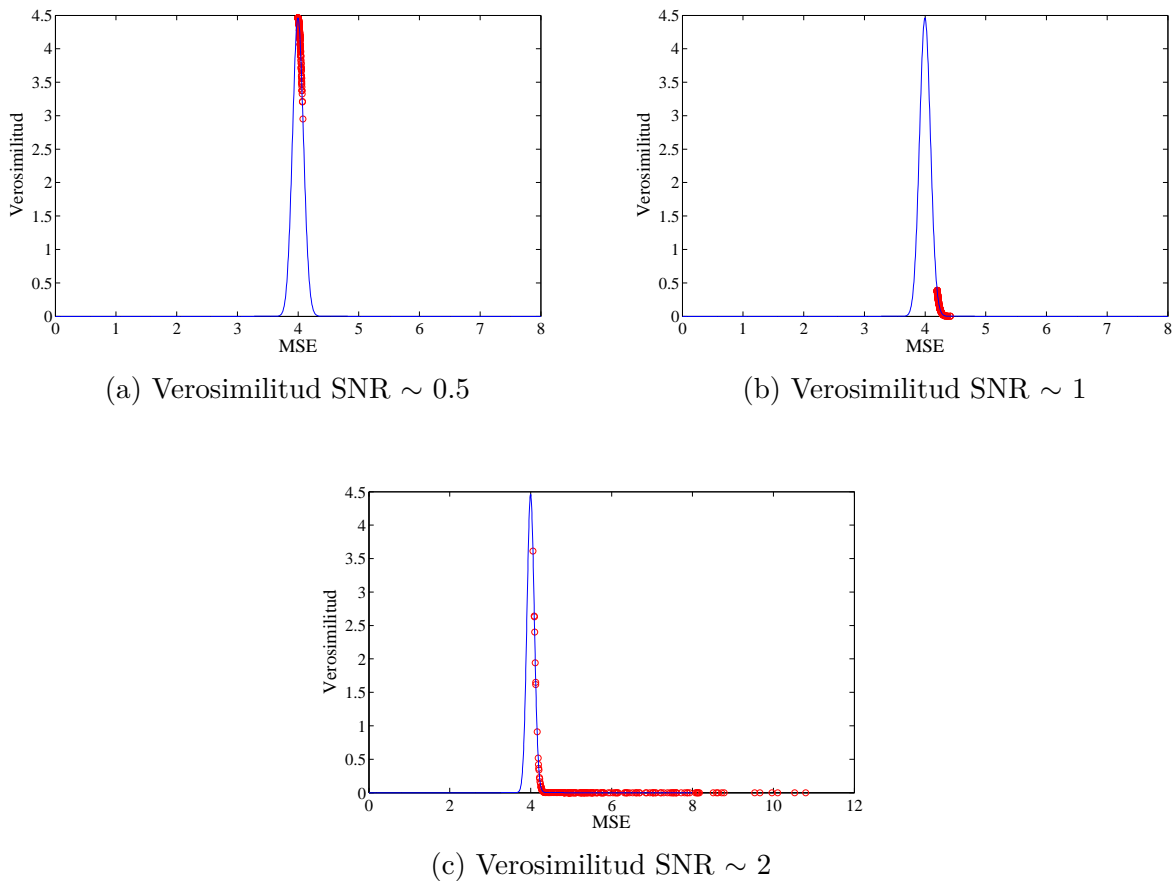


Figura 116: Verosimilitudes con variacion de nivel de ruido de observación, Modelo MSBA

Las Figuras 117-118 permiten observar que ante niveles de ruido que alcanzan el orden del 20 % de amplitud máxima de la señal, el método muestra un desempeño satisfactorio, siendo capaz de converger a la solución del sistema, con un mayor nivel de de incertidumbre en los parámetros en comparación a los casos mostrados en los modelos MSBA/MCAEA y a la vez un mayor número de iteraciones ($it = 30$). Las estimaciones de los parámetros buscados asociados a este nivel de ruido se muestran en la Tabla 36.

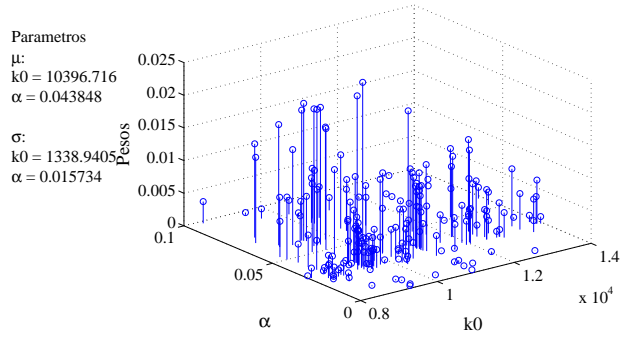
Modelo			
MSBA			
Param.	real	estimado	σ
k_0	10500	10370.38	284.9
α	0.05	0.054	0.011
Fy	10	9.65	0.54

Tabla 36: Parámetros identificados en modelo MSBA con $SNR \sim 1$

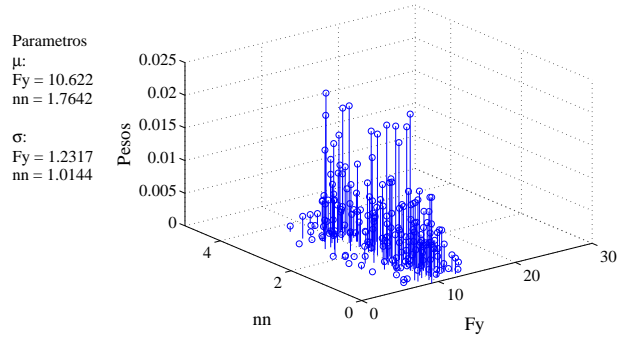
Tomando en cuenta el considerable número de datos ($N > 1000$) en la observación, como es usual en este tipo de problemas, la función de verosimilitud toma una forma muy aguda. Esta condición, para SNR bajos ($SNR > 4$) permite diferenciar de mejor manera las partículas candidatas a solución, debido a la baja incertidumbre en la observación, produciendo una mayor dependencia de la capacidad del modelo en el cual se basa la estimación para reproducir la respuesta observada.

Lo anterior puede producir distribuciones posteriores de baja resolución, concentrando la mayor parte del peso en un grupo menor de partículas, mientras el número de datos sea mayor. Sin embargo, la convergencia a la solución se garantiza si es que el modelo es lo suficientemente adecuado en la predicción de las observaciones, como se obtuvo en los resultados de la sección 4.4.5.

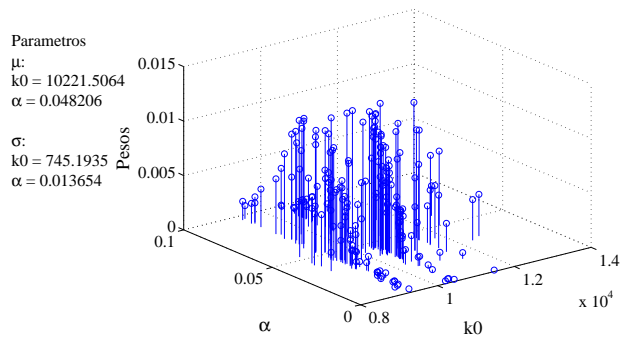
En el caso sísmico, la varianza de observación, asociada al ruido instrumental, se obtiene basado en los extremos del registro, antes de la ocurrencia del evento sísmico, aproximándolo como un proceso gaussiano de media nula y varianza definida mediante la desviación estándar del tramo escogido.



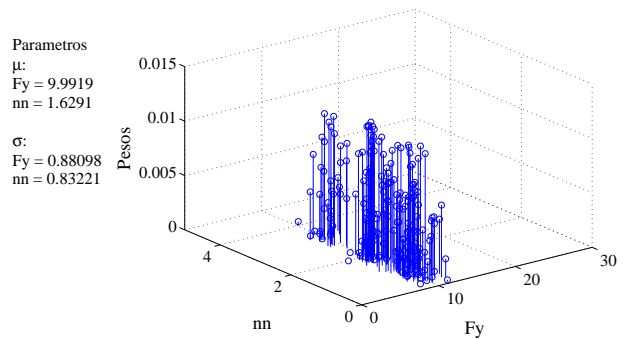
(a) Parámetros k y α Iteración 4



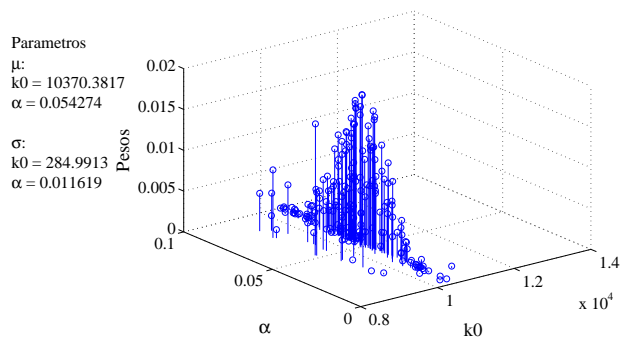
(b) Parámetros F_y Iteración 4



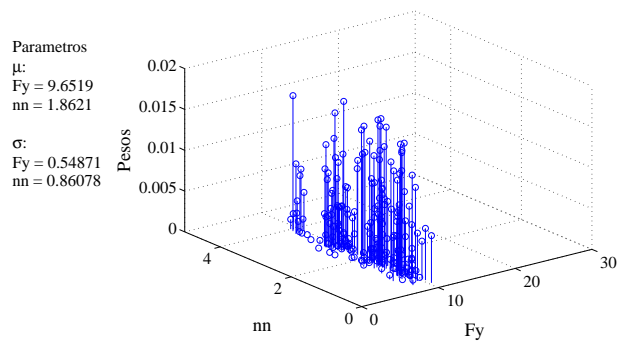
(c) Parámetros k y α Iteración 11



(d) Parámetros F_y Iteración 11

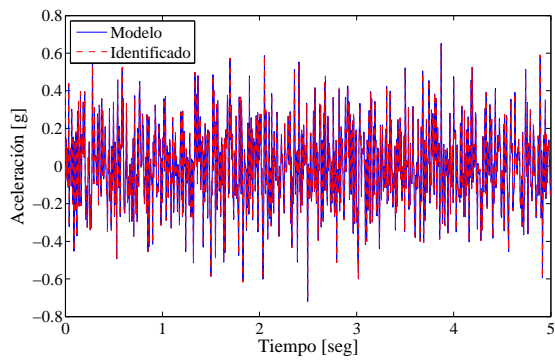


(e) Parámetros k y α Iteración 29

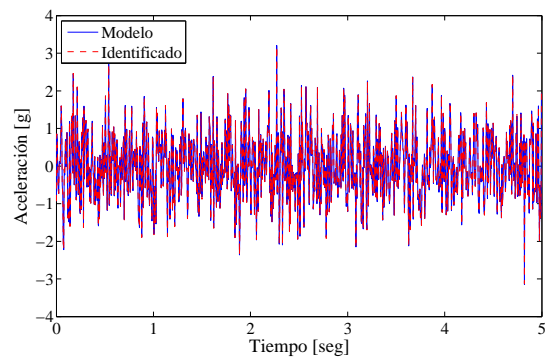


(f) Parámetros F_y Iteración 29

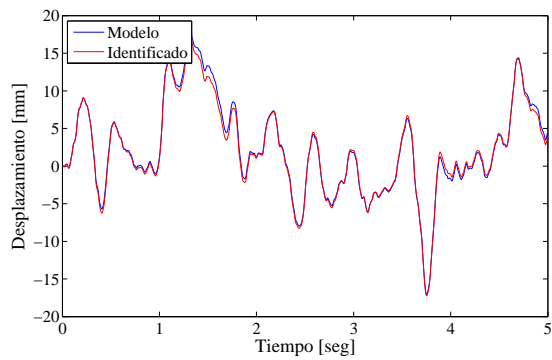
Figura 117: Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA Caso 3



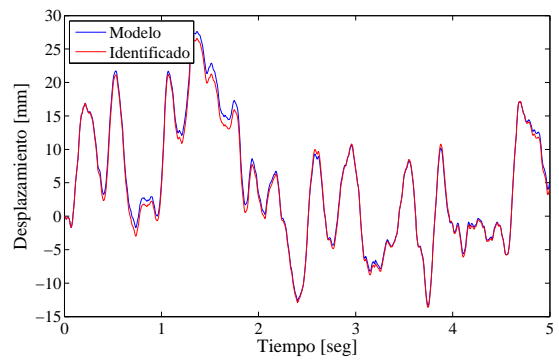
(a) Comparación aceleración nodo 45 X



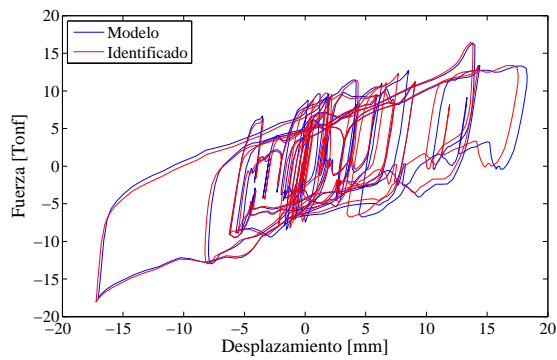
(b) Comparación aceleración nodo 30 Y



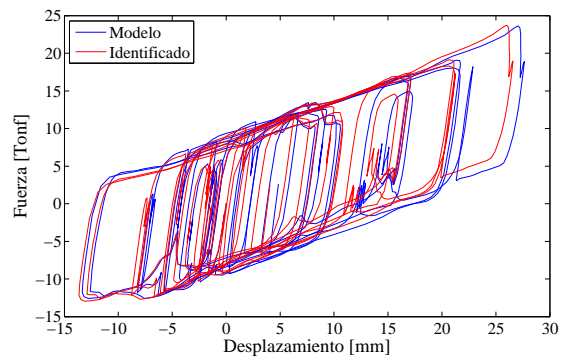
(c) Desplazamientos inferido link 2 X



(d) Desplazamientos inferido link 2 Y



(e) Curva histerética inferida dirección X



(f) Curva histerética inferida dirección Y

Figura 118: Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA Caso 3

4.6.2 INCORPORACIÓN DE MODELO ACOPLADO DE HISTÉRESIS

En el estudio analítico, se consideraron curvas histeréticas con respuestas desacopladas entre direcciones ortogonales para representar el comportamiento de los aisladores en los modelos numéricos de la estructura. Lo anterior supone una limitación en el modelamiento del sistema de aislación puesto que permite, en un caso particular, el desarrollo de un comportamiento histerético y lineal de forma simultánea en ambas direcciones. Esto no resulta realista a la respuesta típica exhibida por los aisladores, los cuales muestran interacción entre las respuestas desarrolladas en el plano horizontal.

En el programa SAP2000, las propiedades “Plastic-Wen” y “Multilinear plastic”, permiten hacer uso de los modelos histeréticos de Bouc-Wen y Bilineal respectivamente, los cuales consisten en modelos sin interacción en el plano X-Y. Por otra parte, la propiedad “Rubber” provee un modelo histerético biaxial dependiente de 3 propiedades ya estudiadas: la rigidez inicial k_i , la razón de rigideces α y el esfuerzo de fluencia F_y en ambas direcciones, incorporando a su vez la interacción entre las respuestas horizontales para este tipo de elemento link (Sección 2.3.3).

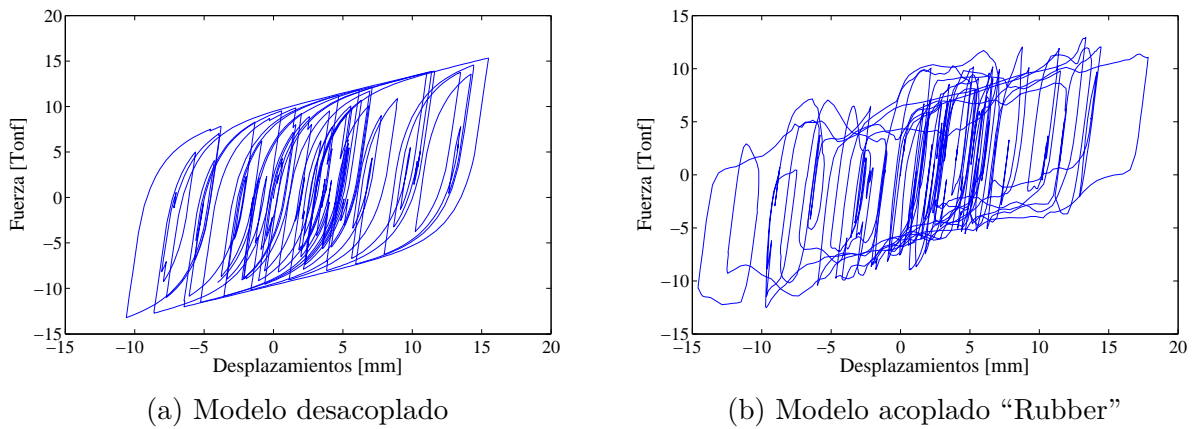


Figura 119: Modelos histeréticos con comportamiento desacoplado y acoplado

La curva histerética obtenida mediante el modelo acoplado presenta una forma más redondeada en sus extremos e irregular en comparación a los modelos sin interacción (Figura 119), lo cual resulta acorde a la respuesta típica observada en aisladores sísmicos de este tipo. Por otra parte las respuestas de aceleración generadas por este modelo ante un mismo input sísmico, guardan bastante similitud con los simulados por los modelos desacoplados Plastic-Wen y Multilinear, exhibiendo su principal diferencia en la media de algunos de los tramos de respuesta y en el nivel de desplazamientos a los cuales se ve sometido el sistema, lo que se observan en la Figura 120.

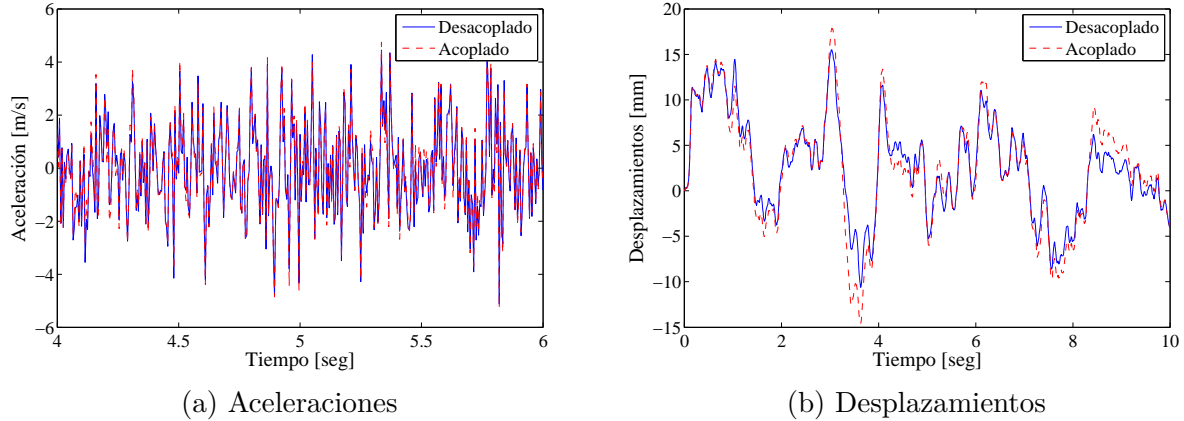


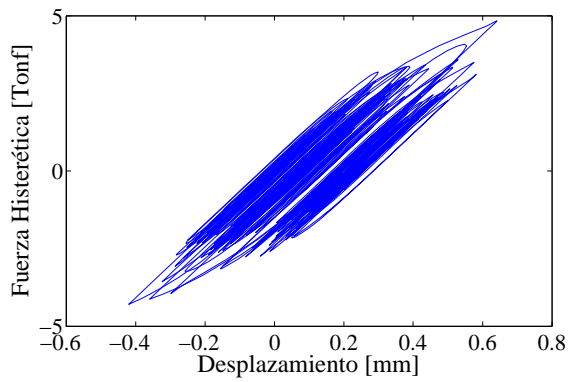
Figura 120: Comparación de aceleración y desplazamiento entre modelos histeréticos acoplado y desacoplado

En términos de la identificación de un sistema con este tipo de modelo histerético incorporado, se observan similitudes en el comportamiento de las propiedades modales estimadas, presentando una frecuencia del primer modo controlada por la rigidez predominante del ciclo histerético, al igual que en el caso de los modelos desacoplados.

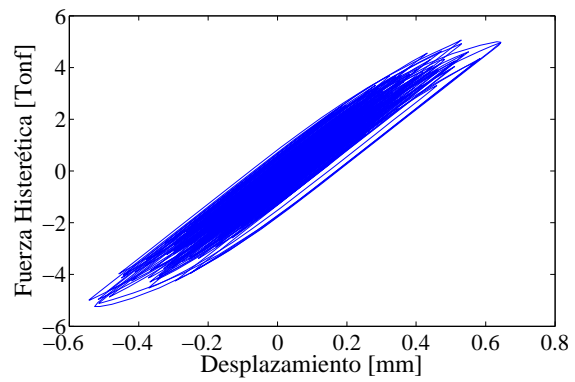
A partir de esto se puede inferir que el comportamiento de cambio de frecuencias predominante del sistema con el nivel de excitación aplicado, depende principalmente del número de rigideces que definen la curva histerética, la cual al consistir en un modelo bilineal, nuevamente presenta una transición discreta de la frecuencia del primer modo entre los valores correspondientes a los casos histeréticos débil y fuerte. El amortiguamiento a su vez muestra un aumento con el nivel de excitación aplicado en el sistema, exhibiendo un comportamiento similar al exhibido en el estudio analítico (Figura 122).

Por otra parte, la identificación mediante Filtro de Partículas muestra ser igualmente efectiva que en los casos desarrollados, ya que al depender solo de 3 parámetros, el espacio de búsqueda se reduce en relación al que contiene el modelo histerético de Bouc-Wen, permitiendo obtener las propiedades dinámicas y respuestas de este tipo de modelo de forma satisfactoria (Figuras 123-124). Aún así los resultados a obtener se encuentran sujetos a las mismas limitaciones propias del método explicadas en detalle en las secciones 4.4.5.3. y 4.6.1.2

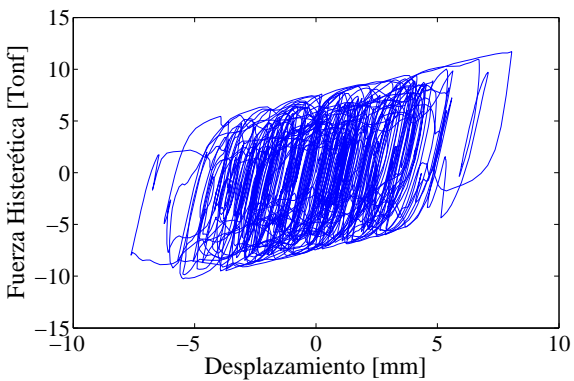
Por lo tanto, si bien la inclusión del modelo histerético acoplado mejora la representación del comportamiento del sistema de aislación, se observa que en términos del desempeño de la identificación del sistema estructural utilizando solo **respuestas de aceleración**, este modelo no presenta mayores ventajas con respecto a los modelos numéricos desacoplados considerados en el estudio analítico. Sin embargo la inclusión de observaciones de desplazamiento pudiera marcar una diferencia favoreciendo el uso de este tipo de modelo.



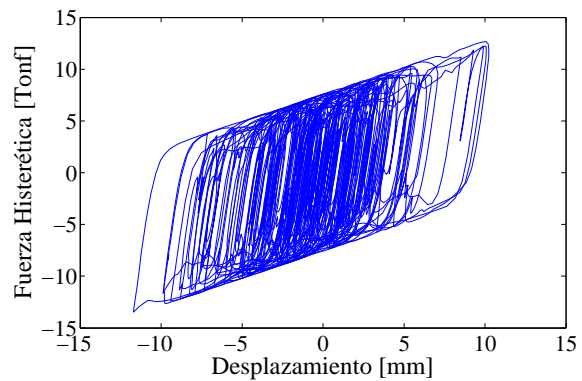
(a) Histéresis en X Caso Débil



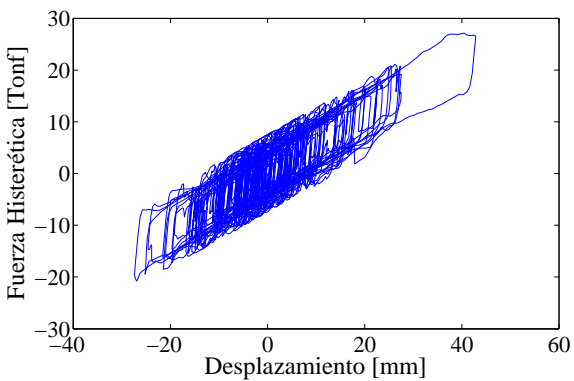
(b) Histéresis en Y Caso Débil



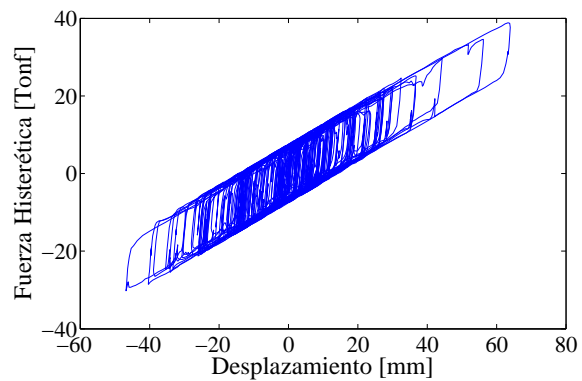
(c) Histéresis en X Caso Medio



(d) Histéresis en Y Caso Medio

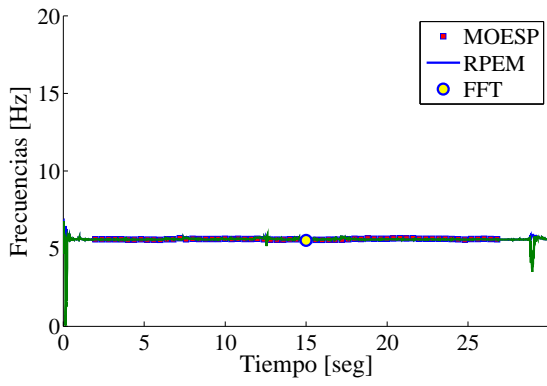


(e) Histéresis en X Caso Fuerte

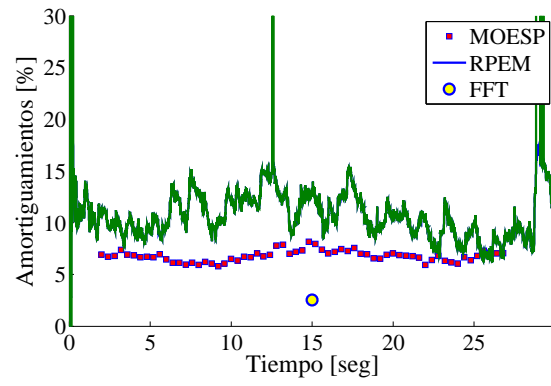


(f) Histéresis en Y Caso Fuerte

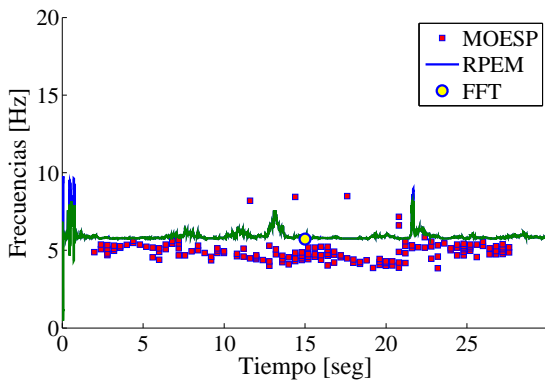
Figura 121: Curvas de histéresis en Modelo MSBA acoplado en casos: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X-Y



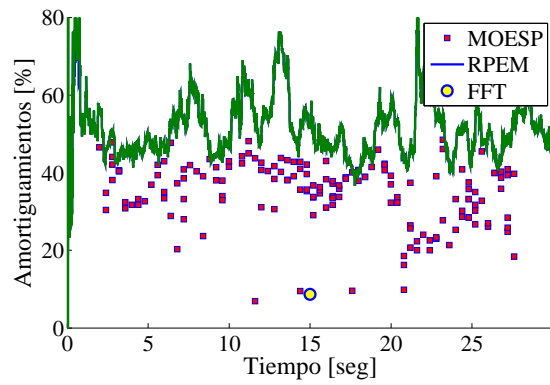
(a) Frecuencias Caso DX



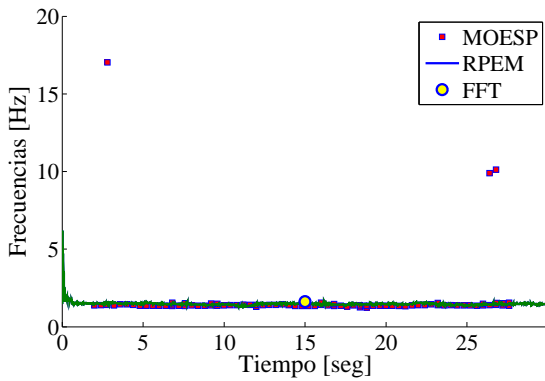
(b) Amortiguamientos Caso DX



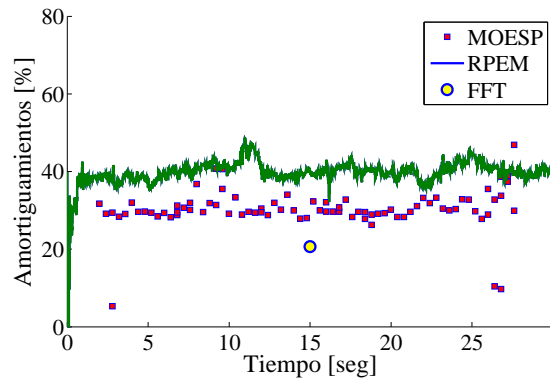
(c) Frecuencias Caso MX



(d) Amortiguamientos Caso MX

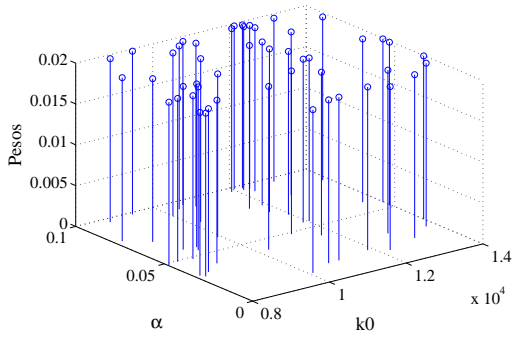


(e) Frecuencias Caso FX

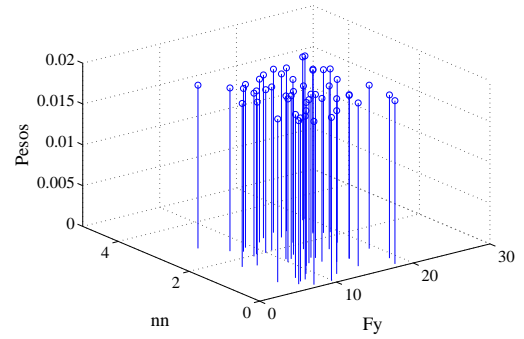


(f) Amortiguamientos Caso FX

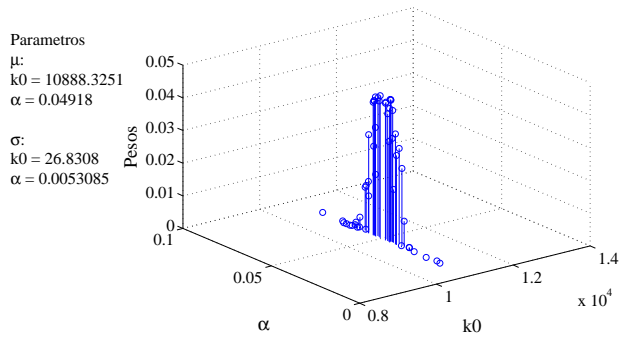
Figura 122: Frecuencias y Amortiguamientos Identificados con PSD, MOESP-MV y RPEM- λ en Modelo MSBA acoplado con Histéresis: Débil (a-b), Media (c-d) y Extrema (e-f), Dirección X



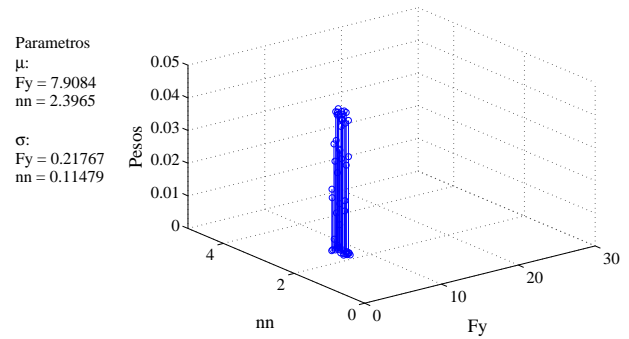
(a) Parámetros k y α Iteración 1



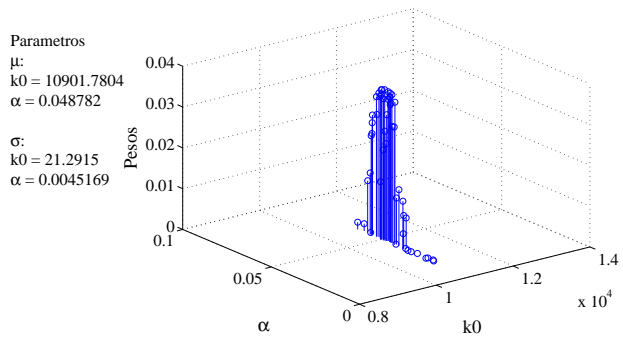
(b) Parámetros F_y Iteración 1



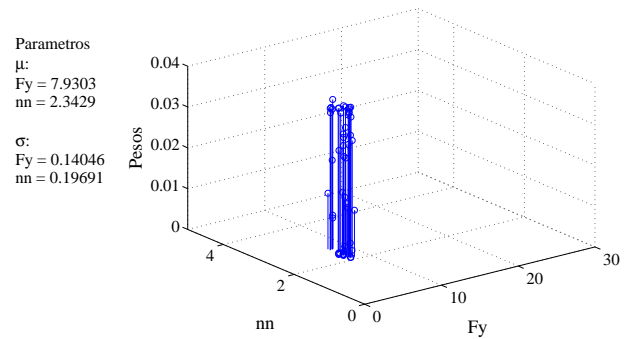
(c) Parámetros k y α Iteración 22



(d) Parámetros F_y Iteración 22

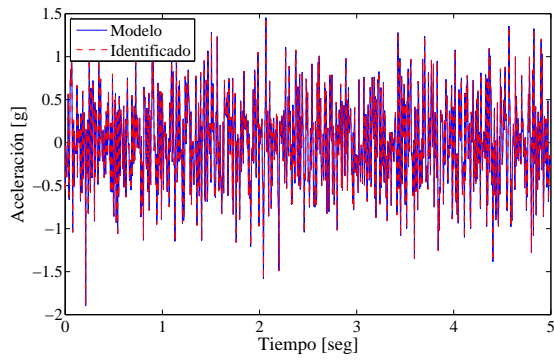


(e) Parámetros k y α Iteración 49

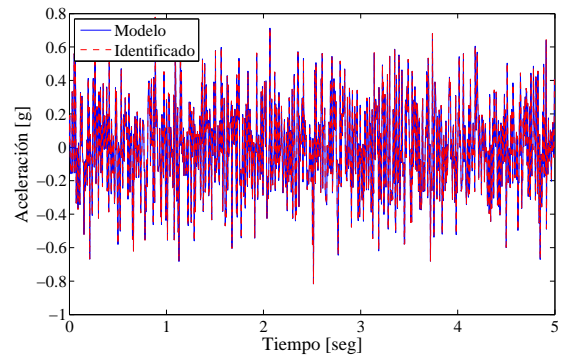


(f) Parámetros F_y Iteración 49

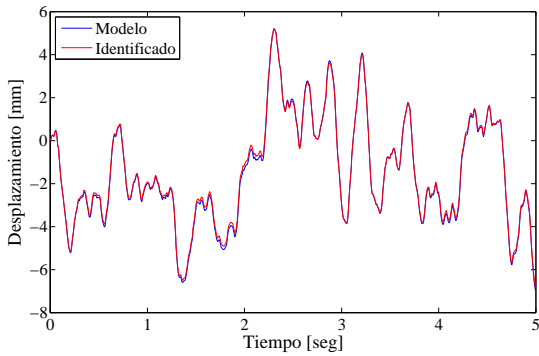
Figura 123: Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Modelo MSBA histéresis acoplada



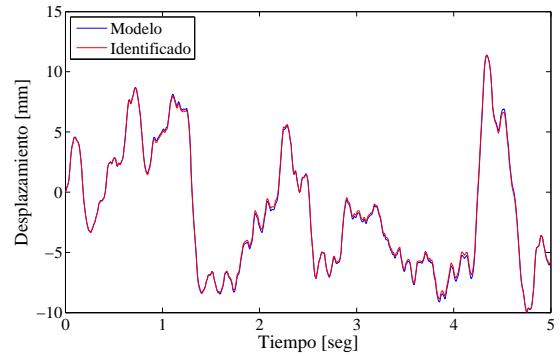
(a) Comparación aceleración nodo 45 X



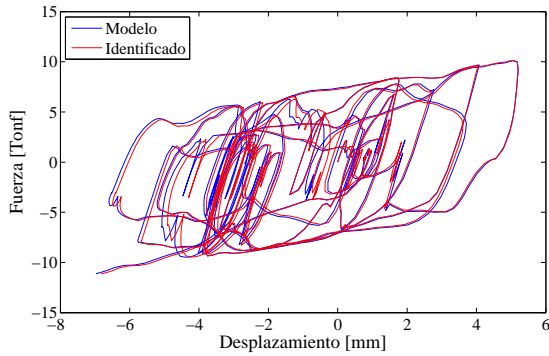
(b) Comparación aceleración nodo 30 Y



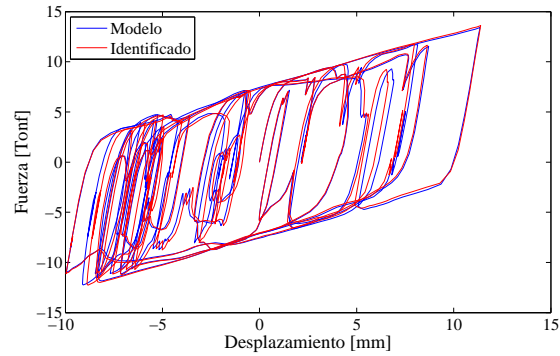
(c) Desplazamientos inferido link 2 X



(d) Desplazamientos inferido link 2 Y



(e) Curva histerética inferida dirección X



(f) Curva histerética inferida dirección Y

Figura 124: Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MSBA Histéresis acoplada

4.6.3 INCORPORACIÓN DE FUNCIONES DE VEROSIMILITUD

En la aplicación del algoritmo del Filtro de Partículas se observó que ante un nivel de ruido bajo/moderado, la cercanía de una partícula inicial a la solución es una de las condiciones mas importantes para garantizar la convergencia del conjunto de partículas. Esto se debe a la gran cantidad de datos de observación que incorpora el problema ($N > 1000$), provocando que la función de verosimilitud $\Gamma(N,L)$ posea una forma bastante aguda.

Una consecuencia directa de lo anterior consiste en la obtención de la totalidad de muestras con peso nulo, si es que no se encuentra al menos una partícula lo suficientemente cercana a la vecindad de la solución, situación que es recurrente si es que se utiliza un conjunto limitado de partículas en el espacio de búsqueda.

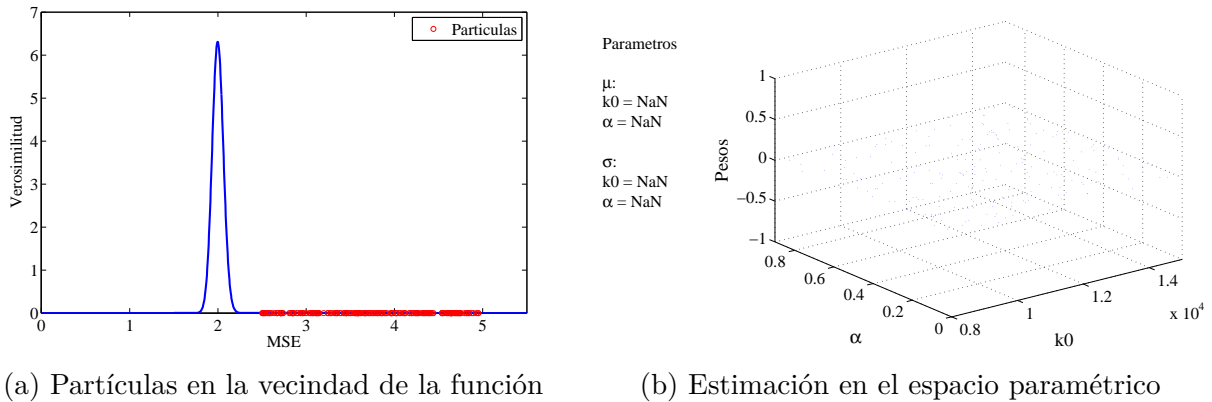


Figura 125: Resultados de Filtro de partículas mediante función de verosimilitud con partículas con peso nulo

Aún considerando una cantidad adecuada de partículas en un espacio acotado ($N=4000$), se ha observado en ciertos casos que las muestras mas cercanas a la vecindad de la solución quedan descartadas por esta condición de la función (Figura 125). Ante esto, la presente sección busca estudiar el desempeño de la inclusión de una función de verosimilitud sigmoideal, buscando conservar las propiedades de convergencia de la función $\Gamma(N,L)$. Cabe mencionar que la elección arbitraria de esta función no garantiza la convergencia a la solución óptima del sistema.

A diferencia del Filtro de Partículas, donde se hace uso de propiedades probabilísticas para garantizar la convergencia de la muestra basada en el modelo del sistema, este algoritmo consiste en estricto rigor en un **algoritmo de aprendizaje**, buscando identificar la mejor solución dentro de un conjunto de partículas e incorporar las limitaciones tanto del modelo para ajustar las observaciones, como de la cantidad limitada de partículas en la muestra.

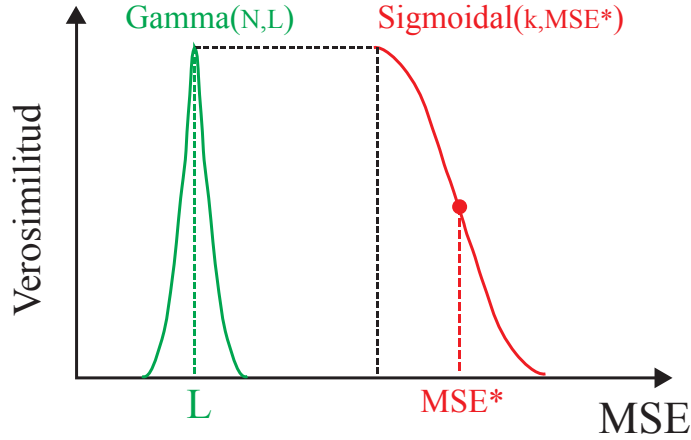


Figura 126: Comparación entre verosimilitudes

4.6.3.1 Definición de función sigmoide

Una sigmoide consiste en una función que depende de dos parámetros: una **pendiente** del tramo que une los plateaus de la curva, y el **punto central** de dicho tramo. Con el objetivo de establecer un criterio de convergencia de las partículas, el punto de máxima verosimilitud corresponde al mismo que en el caso de la función $\Gamma(N \cdot L/2, 2/N)$, igual al número de canales de observación L . Mientras que la mejor estimación de la muestra generada define el punto donde la curva asigna un peso no nulo, dado por el punto central de la pendiente (Figura 126).

La función propuesta se define mediante las expresiones

$$p(X) = \Gamma(x, N \cdot L/2, 2/N) \quad \forall x \leq L$$

$$p(X) = \Lambda \cdot \text{sigmf}(x - L, m, x_{best} - L) \quad \forall x \geq L$$

donde N es el número de datos, L el número de canales de observación, m es la pendiente del tramo medio de la sigmoide con punto central x_{best} , correspondiente a la mejor estimación (o mínimo MSE) de la muestra. Mientras que Λ representa la constante que iguala los máximos de la función Γ y el plateau de la sigmoide. La pendiente a escoger por el usuario afecta la asignación de pesos de la muestra, siendo aproximadamente $m = -5/\Delta\text{MSE}$ (obtenido mediante la prueba de distintos valores de m y observando el intervalo de MSE que separa a los plateaus de la función), donde ΔMSE corresponde a la diferencia en términos de MSE normalizado entre el punto central de la pendiente x_{best} y el punto donde la verosimilitud

toma valor nulo, resultando en una menor resolución de la distribución mientras mayor sea la pendiente escogida.

La Figura 128 muestra los resultados obtenidos mediante el uso de la función de verosimilitud sigmoideal con una pendiente $m = -1$ (escogida basado en un valor “admisible” de ΔMSE de partículas definido según el criterio del usuario). Con este algoritmo se estiman parámetros cercanos a la solución óptima del sistema, los cuales se detallan en la Tabla 37, permitiendo reproducir los desplazamientos y la respuesta histerética del sistema con gran precisión (Figura 129).

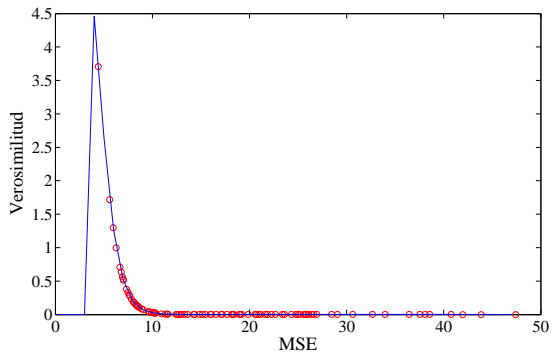
Modelo			
MSBA acoplado			
Param.	real	estimado	σ
k_0	10500	10917.59	25.57
α	0.05	0.047	0.008
Fy	10	9.95	0.36

Tabla 37: Parámetros identificados mediante verosimilitud sigmoideal

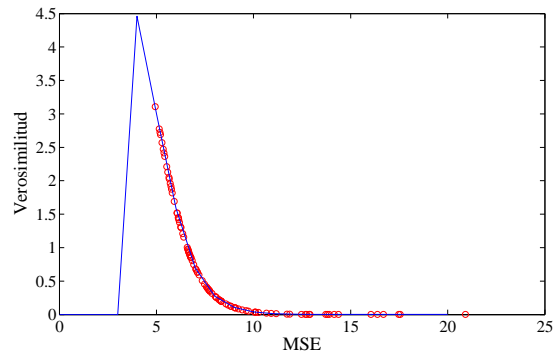
La efectividad de la función de verosimilitud sigmoideal se debe en parte a que el modelo en el cual se basa la estimación, junto con sus condiciones iniciales, corresponde a aquel desde el cual se genera la observación utilizada para la estimación. Sin embargo, esta permite utilizar las partículas descartadas por la función Γ en las iteraciones iniciales, con el objetivo de favorecer la convergencia del grupo restante a las regiones de alta probabilidad según los parámetros estimados (Figura 127).

Dado que las zonas a las cuales convergen las partículas no corresponden necesariamente al conjunto cercano a la solución óptima del sistema, las distribuciones posteriores de los parámetros presentan un mayor grado de varianza entre iteraciones (Figura 128c-d), similar al que ocurre al incorporar un mayor nivel de ruido en la observación. Esto es consistente con el “ensanche” de la función de verosimilitud, incorporando partículas con un mayor rango de MSE.

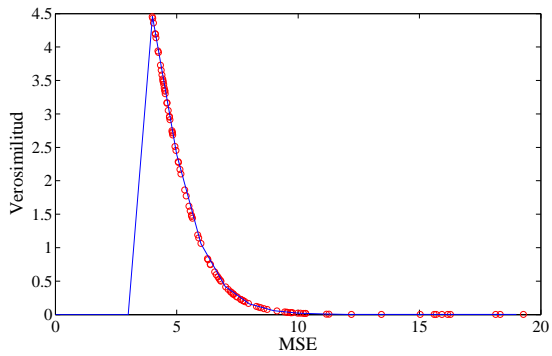
Debido a esto es que una asignación de una perturbación de búsqueda lo suficientemente grande resulta útil para explorar otras posibles zonas de alta probabilidad que no hayan sido detectadas por el conjunto de partículas inicial, conduciendo en un mayor número de iteraciones a las cercanías de la solución buscada, mediante la reducción de la varianza en el ruido de búsqueda en un cierto porcentaje definido por el usuario para cada iteración (simulated annealing).



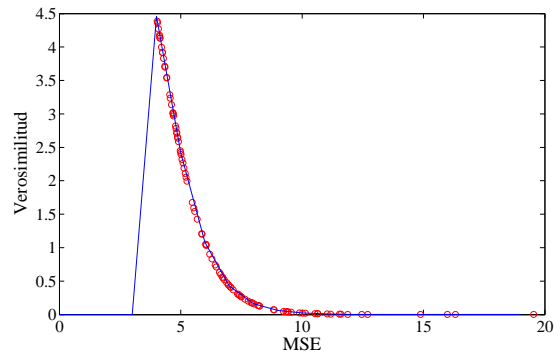
(a) Función de verosimilitud Iteración 2



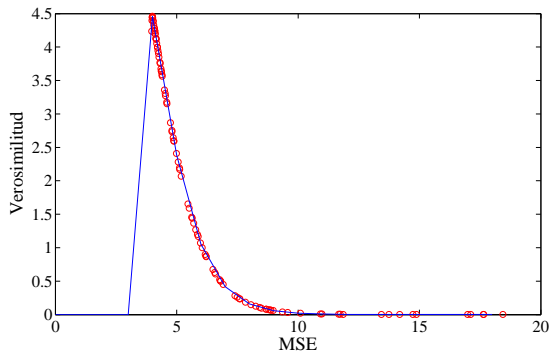
(b) Función de verosimilitud Iteración 3



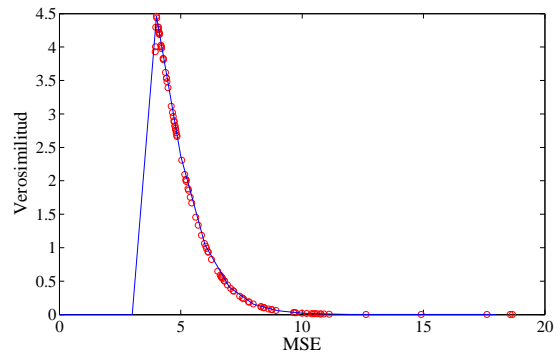
(c) Función de verosimilitud Iteración 11



(d) Función de verosimilitud Iteración 14

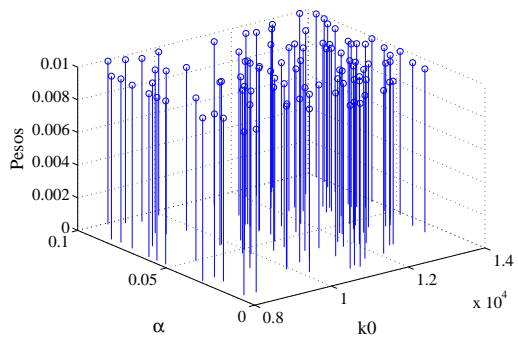


(e) Función de verosimilitud Iteración 16

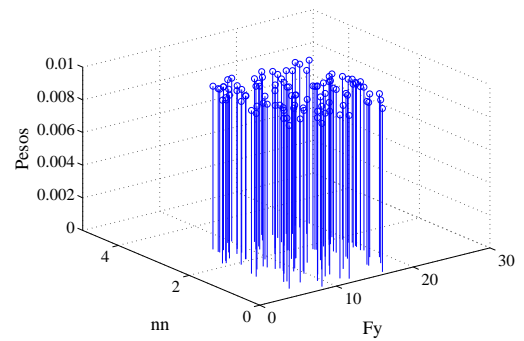


(f) Función de verosimilitud Iteración 19

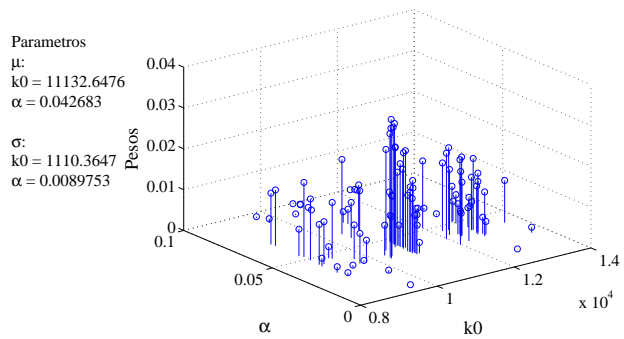
Figura 127: Estimación de Verosimilitud sigmoial para distintas iteraciones



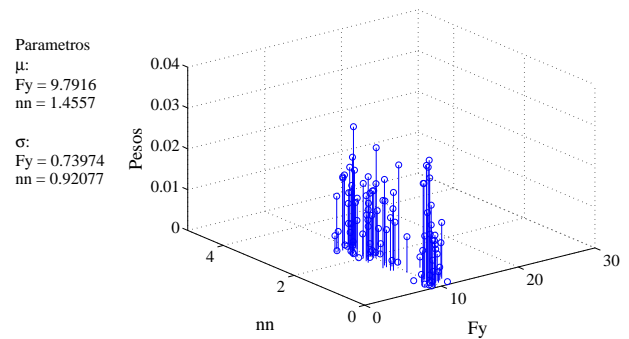
(a) Parámetros k y α Iteración 1



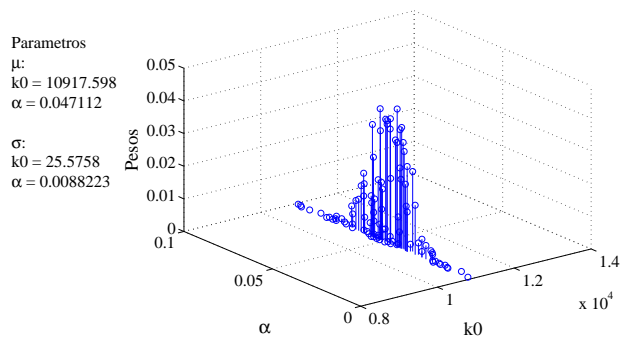
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



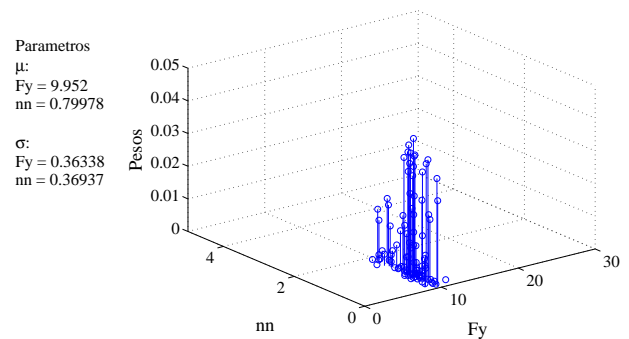
(c) Parámetros k y α Iteración 7



(d) Parámetros F_y y n Iteración 7

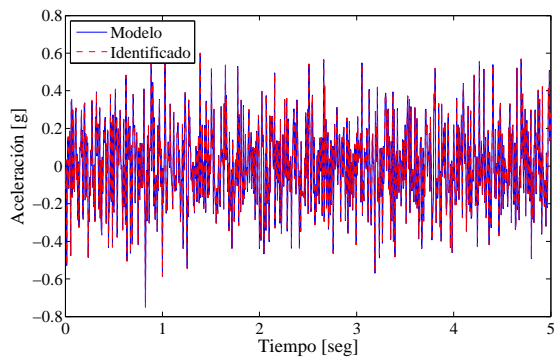


(e) Parámetros k y α Iteración 20

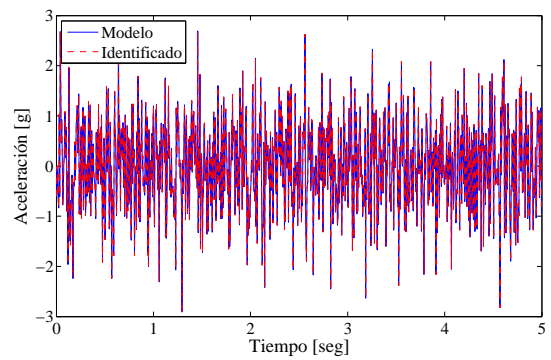


(f) Parámetros F_y y n Iteración 20

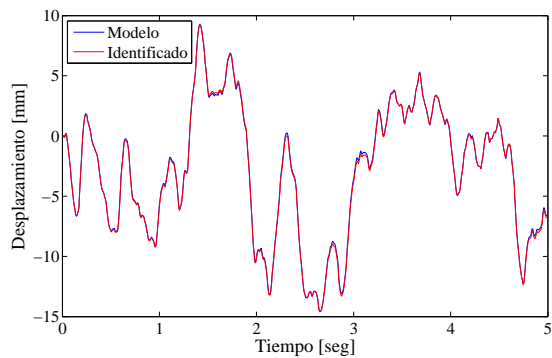
Figura 128: Variación de distribución posterior estimada para distintas iteraciones, Función de Verosimilitud sigmoial



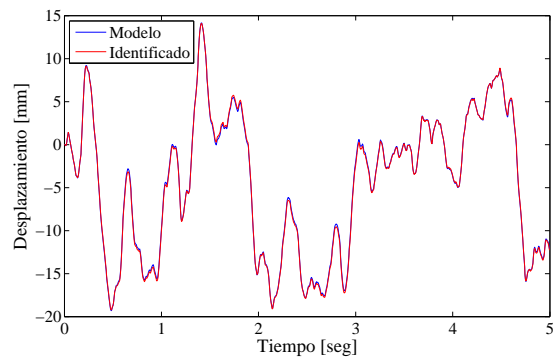
(a) Comparación aceleración nodo 45 X



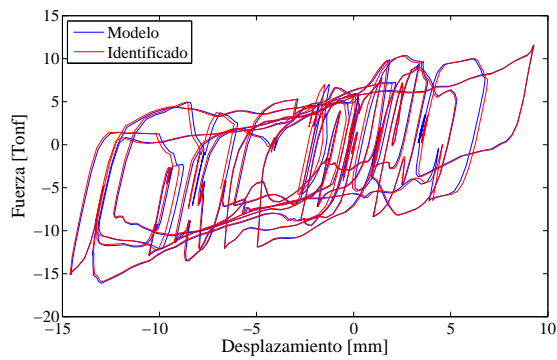
(b) Comparación aceleración nodo 30 Y



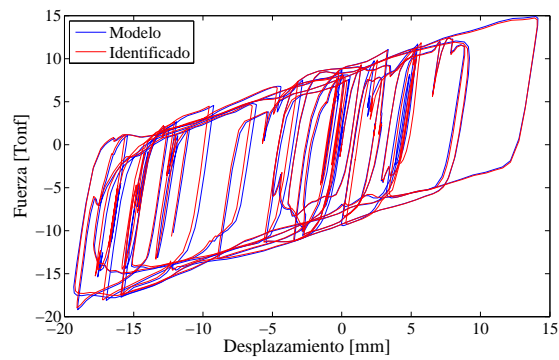
(c) Desplazamientos inferido link 2 X



(d) Desplazamientos inferido link 2 Y



(e) Curva histerética inferida dirección X



(f) Curva histerética inferida dirección Y

Figura 129: Comparación de observaciones y respuestas inferidas mediante PF, Modelo MS-BA, Función de Verosimilitud sigmoideal

4.6.4 INFLUENCIA DE COMPORTAMIENTO ROTACIONAL EN IDENTIFICACIÓN

En los casos de estudio de identificación de los modelos numéricos MSBA/MCAEA, se consideraron excitaciones basales consistentes en aceleraciones tanto traslacionales (X-Y-Z) como rotacional (RZ). Estas condiciones se aplicaron para observar principalmente dos efectos en los alcances de los algoritmos de identificación aplicados, los cuales son:

1) La posibilidad de identificar modos rotacionales del modelo, los cuales participan y pueden ser detectados por los procedimientos de identificación bajo algunas de las siguientes condiciones: A) la aplicación de un nivel de excitación rotacional no despreciable en comparación a las amplitudes máximas de excitación traslacional y B) la diferencia en la ubicación del centro de masa con respecto al de rigidez, típicamente encontrado en estructuras con distribución asimétrica de muros en planta o elementos que aportan rigidez lateral sin necesidad de una excitación rotacional considerable (como en el caso particular del modelo MCAEA).

2) Estudiar el efecto que la incorporación de un comportamiento rotacional en la respuesta de la estructura genera en el alcance de la identificación mediante procedimientos de entrada y salida única como FRF y RPEM. Bajo estas condiciones, estos últimos mostraron limitaciones al no poder compatibilizar las excitaciones aplicadas de forma traslacional con las respuestas de la estructura en la misma dirección ubicadas en nodos laterales, las cuales poseen componentes añadidas debido al efecto de la rotación, siendo solo posible identificar las propiedades reales usando registros provenientes de nodos centrales.

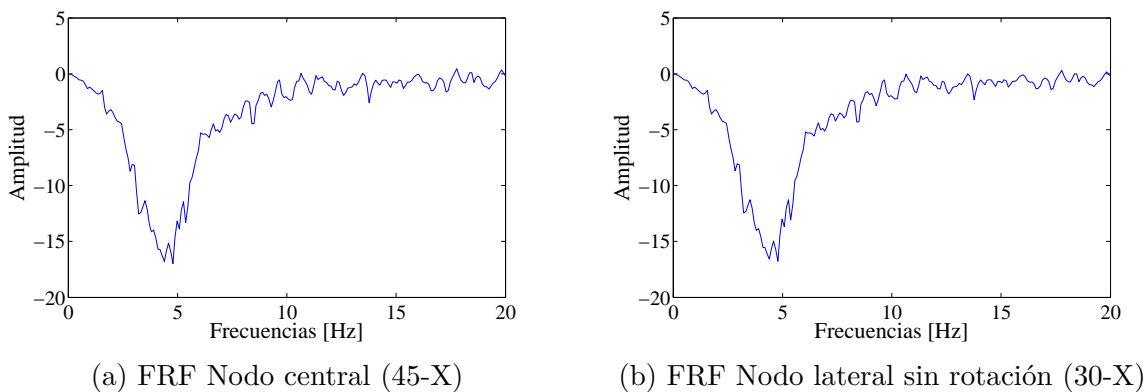


Figura 130: FRF para registros de modelo MSBA con rotación basal nula

Sin embargo, cuando la respuesta de aceleración del modelo no posee componentes traslacionales generadas por el movimiento rotacional, ya sea por una excitación basal nula o bien por un efecto despreciable de este tipo de comportamiento en la respuesta traslacional de

la estructura, dichas condiciones permiten efectuar una identificación efectiva de las propiedades modales del modelo mediante registros localizados en un mayor número de posiciones (incluyendo nodos laterales, como se muestra en la Figura 132), quedando solo parcialmente limitada en el uso de respuestas cuya ubicación representa una posición nodal o de participación nula del modo a identificar.

La estructura en estudio consta de 6 grados de libertad para su movimiento, consistiendo en 3 traslaciones (U_X , U_Y , U_Z) y 3 rotaciones (R_X , R_Y , R_Z). En un caso práctico, la excitación sísmica se compone de aceleraciones **principalmente traslacionales**, presentando **componentes rotacionales despreciables** en casi la totalidad de los casos, causando un efecto prácticamente nulo en la respuesta (Figura 131).

Por lo tanto, la inclusión de un efecto rotacional en la respuesta en este tipo de estructuras queda principalmente sujeta a la **diferencia entre el centro de masa y de rigidez** de la estructura (o equivalentemente el grado de simetría que presenta la distribución en planta de los elementos que le otorgan rigidez lateral al edificio), donde una mayor diferencia (o asimetría) favorece la identificación de modos traslacionales y rotacional mucho mas distanciados en el espacio de las frecuencias. Mientras que una condición simétrica en la distribución de dichos elementos produce un modo rotacional bastante cercano a los primeros modos traslacionales de la estructura, efecto que se observa parcialmente en el modelo MSBA bajo una condición de no linealidad extrema (caso F), dificultando la discriminación entre estos modos en su identificación.

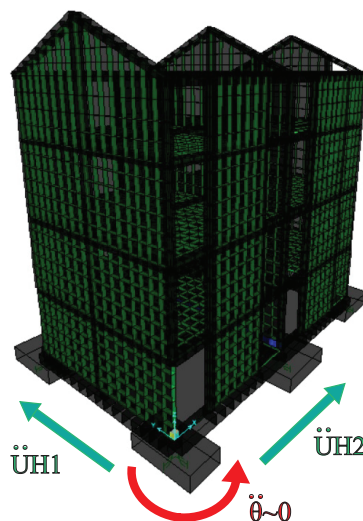


Figura 131: Excitaciones típicas en estructuras de base aislada

Una forma de corroborar la existencia del modo rotacional consiste en observar el valor absoluto de la función de transferencia entre las respuestas de dos posiciones que a priori presenten cierto grado de diferencia ante un movimiento de este tipo en la misma dirección, como en el caso de las respuestas centrales y laterales en la superestructura.

Para un caso en el cual el sistema presenta una respuesta netamente traslacional en ambas posiciones, se observa que para el rango de frecuencias de los modos a identificar, la función de transferencia mostrará valores cercanos a la unidad, dando cuenta de una respuesta similar en ambos puntos. Mientras que si existe un comportamiento que diferencie la respuesta en ambas posiciones, como el caso de una componente rotacional, la función presenta un peak en la frecuencia cercana al modo rotacional del modelo MCAEA, el cual no es identificado mediante las respuestas traslacionales, ya que este no presenta un nivel de participación comparable a los modos identificados.

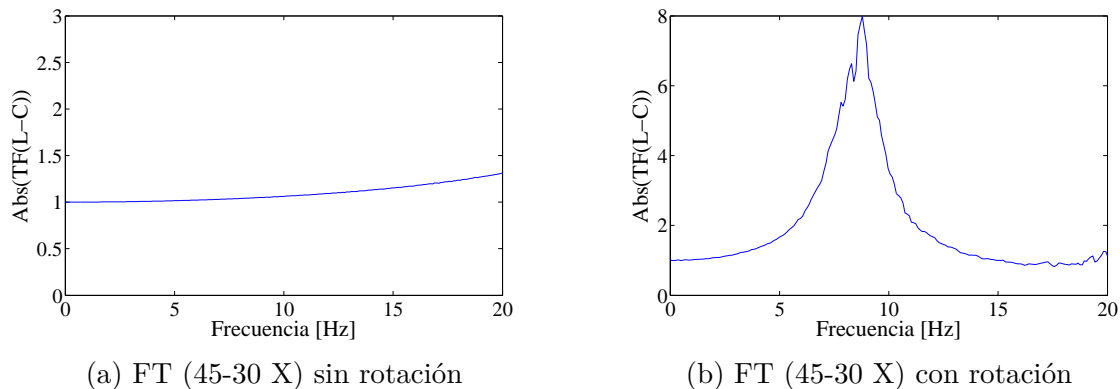


Figura 132: Función de Transferencia para casos con y sin rotación

Por lo tanto, mientras el modo rotacional de la estructura aislada a identificar no posea una participación apreciable en las respuestas utilizadas para la identificación, se espera que la aplicación de los métodos que identifican propiedades modales tales como PSD/FRF, MOESP y RPEM permitan estimar efectivamente las propiedades correspondientes a modos traslacionales de la estructura aislada existente, utilizando observaciones provenientes de cualquier tipo de ubicación distinta a una posición nodal del modo a identificar.

Por otra parte para el caso del Filtro de Partículas, el alcance del método se encuentra sujeto a la capacidad del modelo numérico utilizado en la representación de la estructura, permitiendo detectar partículas de peso no nulo, y por lo tanto una solución óptima del sistema, si es que el modelo planteado permite incorporar su comportamiento en los distintos grados de libertad de la estructura y reproducir respuestas similares a las medidas en términos de MSE.

4.7. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.7.1. Identificación de parámetros modales

Los algoritmos PSD, MOESP-MV y RPEM- λ muestran similitudes en la capacidad de identificación del comportamiento no estacionario que exhibe el primer modo del modelo estructural, presentando estimaciones consistentes para la frecuencia fundamental ante distintos niveles de no linealidad en su respuesta. Estos presentan limitaciones principalmente asociadas al uso de nodos centrales para una estimación precisa de dichas propiedades.

Los resultados muestran que con el aumento de desplazamiento a nivel de la interfaz de aislación, los algoritmos permiten identificar valores para la frecuencia del primer modo menores a las estimadas por medio de excitaciones basales de menor amplitud.

Se observa que para los casos de histéresis débil (donde no se alcanza el esfuerzo de fluencia) y medio (con un comportamiento histerético desarrollado de forma parcial) se identifican valores de frecuencias del primer modo bastante similares, asociadas a una predominancia de la rigidez inicial en la respuesta del sistema. Por otra parte, el caso de histéresis fuerte permite identificar una frecuencia fundamental menor asociada a una predominancia de la rigidez post-fluencia en la respuesta de la estructura.

El comportamiento anterior se explica debido a la definición del modelo histerético (bilineal y Bouc-Wen) por medio de dos rigideces principales, provocando un cambio “discreto” en los valores de las frecuencias con el aumento de no linealidad en la respuesta del sistema. Es así como se observa una transición desde las propiedades estimadas en los dos primeros casos (D y M) hasta aquellas identificadas en el caso histerético fuerte.

Los amortiguamientos modales estimados para el primer modo muestran un comportamiento irregular con el aumento de no linealidad, presentando rangos de valores entre los cuales se mantienen durante la ocurrencia del evento sísmico. La estimación de este parámetro presenta diferencias entre los modelos histeréticos utilizados, donde dado el comportamiento lineal elástico en el tramo inicial del modelo bilineal, los valores identificados resultan ser mas consistentes con aquellos asignados al modelo estructural, respecto a los identificados mediante el uso de un modelo de histéresis de Bouc-Wen.

Esto se debe a que el último modelo exhibe una respuesta no lineal para cualquier nivel de excitación aplicada al modelo estructural. Este comportamiento disipativo inicial es incorporado en el amortiguamiento modal, el cual presenta valores muy distintos en comparación a aquellos asignados al primer modo del modelo numérico.

La identificación de las formas modales se ve limitada principalmente por dos factores: el número de canales de observación utilizados para la identificación de este parámetro, el cual afecta su resolución, siendo solo posible caracterizar un número de formas modales de la estructura igual a la cantidad de canales disponibles.

Por otra parte, el tipo de algoritmo empleado influye en la capacidad de identificación de las formas modales, donde se observa que para los métodos escalares, o de única entrada y salida al sistema, como en el caso de los procedimientos de estimación mediante FRF y RPEM, se presentan dificultades para compatibilizar las amplitudes de las formas modales en registros ubicados en nodos laterales con respecto a los registros de entrada al sistema, produciendo solo la estimación efectiva de formas modales traslacionales con registros ubicados en nodos centrales del modelo.

En cambio, el algoritmo MOESP-MW, presenta una ventaja en este aspecto, ya que al utilizar un enfoque vectorial, haciendo uso de múltiples canales correspondientes a distintas direcciones de medición, permite identificar de forma efectiva modos tanto traslacionales como rotacionales en el sistema. Aún así, los resultados muestran que este algoritmo presenta una baja consistencia en las formas modales identificadas para ventanas sucesivas, mientras el nivel de no linealidad es mayor en el sistema, siendo necesario un mayor conocimiento a priori de la forma general del modo y de la calibración de parámetros de entrada al algoritmo por parte del usuario.

Finalmente se observa en todos los casos que los modos superiores de la estructura no se ven afectados de forma apreciable por el incremento en el nivel de no linealidad, siendo posible identificar propiedades modales estables en la duración del evento. Esto también se presenta en el caso de los modos detectados con registros verticales, dirección en la cual el modelo permanece con un comportamiento predominantemente lineal debido a la alta rigidez axial de los elementos links, lo que favorece la capacidad de identificación de los algoritmos utilizados.

4.7.2. Identificación de parámetros estructurales

El uso del algoritmo de Filtro de Partículas (PF) muestra que los parámetros a estimar, correspondientes a aquellos que definen el comportamiento histerético del modelo numérico, son identificados de forma efectiva ante un nivel de ruido de observación moderado, en la medida en que el número de partículas utilizado sea adecuado para encontrar un valor inicial del vector de parámetros cercano a la solución del sistema.

Lo anterior se debe a una característica intrínseca del problema abordado, en el cual la frecuencia de muestreo ($F_s = 200$ Hz) permite incorporar un número de datos grande en los registros de observación ($N > 3000$), provocando que la función de verosimilitud $\Gamma(x, N, L)$ posea una forma particularmente aguda, favoreciendo la presencia de partículas con un valor MSE muy cercano a la vecindad de la función en donde se concentran los valores de mayor verosimilitud, requiriendo una estimación inicial precisa con respecto a la solución a encontrar.

Aún así, las estimaciones obtenidas para los parámetros buscados permiten realizar inferencias precisas de las observaciones y las respuestas asociadas a los estados no medibles en el sistema de manera muy efectiva.

Por otra parte se observa que mientras menor es la incertidumbre en la respuesta, dada por los valores de la varianza definida para el ruido de observación, el modelo en el cual se basa la estimación pasa a tener una influencia mucho mayor en la capacidad de identificación del método. Esto es debido a que en dicha situación, el modelo debe ser capaz de generar el tipo de respuestas utilizadas como observación del sistema para garantizar la asignación de pesos no nulos a partículas con un mayor valor de verosimilitud, otorgándole una gran relevancia a la calibración inicial del modelo numérico, dado principalmente por la elección de los parámetros asignados a la superestructura, cuyos valores se asumen conocidos.

El muestreo inicial de los parámetros por medio de una densidad de probabilidad uniforme limita en cierto grado el número de combinaciones no correlacionadas en el vector de parámetros con el incremento en la dimensión del mismo, presentándose partículas que no se acercan a la solución solo en alguna de sus componentes. Ante esto, la definición de condiciones iniciales acotadas para los parámetros del sistema resultan fundamentales en la efectividad de la búsqueda de la solución, debido al carácter no lineal que relaciona las componentes del vector de parámetros.

De estas, la elección del rango de búsqueda para la rigidez inicial, definiendo el primer tramo de la curva de histéresis del modelo bilineal, es la que supone una mayor dificultad ya que presenta un menor grado de restricción $k_i > 0$ en comparación a los otros parámetros del modelo. Para lidiar con esta condición se propone realizar una identificación inicial con un amplio intervalo de búsqueda para un caso con excitación muy débil (que mantenga el comportamiento del sistema en el rango inicial), sin considerar el valor de los otros parámetros que se encuentran directamente asociados al comportamiento plástico del sistema, ya que estos no influyen de mayor forma en la respuesta exhibida para dicho nivel de excitación, de forma de establecer un intervalo de rigidez lineal a considerar para la identificación de los parámetros restantes (α, F_y, n)

4.8. COMENTARIOS

En el presente capítulo se realizó un estudio analítico de las técnicas de identificación PSD, MOESP, RPEM y Filtro de Partículas (PF). En este se presentaron las características de los modelos numéricos MSBA y MCAEA junto con los tipos de excitación aplicadas, condiciones de observación del sistema y nivel de no linealidad de las respuestas generadas a partir de los modelos. A la vez se detallaron las propiedades modales y los parámetros dinámicos a estimar mediante los métodos de identificación abordados en el estudio .

Se analizaron los resultados obtenidos por cada algoritmo de identificación utilizando las respuestas de aceleración relativa del sistema, asociadas a 3 niveles de no linealidad: Débil, Medio y Fuerte. Estas fueron generadas considerando dos tipos de modelos de histéresis: Bouc Wen y Bilineal, los que exhiben comportamientos similares, quedando principalmente diferenciados por la transición de los tramos que definen la curva histerética y su comportamiento inicial.

Los métodos FFT, PSD, MOESP y RPEM muestran desempeños de identificaciones similares, detectando dos tipos de comportamientos en el modelo, asociadas a una predominancia de la rigidez inicial y post-fluencia en la respuesta del sistema. Sus capacidades de identificación de las propiedades modales muestran mayor efectividad con el uso de registros ubicados en nodos centrales, presentando limitaciones al utilizar observaciones en posiciones laterales, particularmente para los métodos de entrada y salida única (FRF/RPEM), debido al efecto rotacional de la excitación en la respuesta traslacional.

Aún con esta limitación, los métodos permiten identificar gran parte de los modos correspondientes a cada modelo, confirmando que este tipo de procedimientos resulta efectivo para la detección de un comportamiento no estacionario en el sistema, principalmente mediante la estimación de la frecuencia y el amortiguamiento del primer modo, los que permiten diferenciar los distintos estados histeréticos en el modelo.

Por otra parte, los resultados obtenidos mediante el método de Filtro de Partículas muestran una alta efectividad en la estimación de los parámetros dinámicos que controlan el modelo histerético del sistema ante distintos niveles de no linealidad, mientras se definan rangos acotados de búsqueda y un número adecuado de partículas iniciales, debido a la agudeza en la forma de la función de verosimilitud dado por el alto número de datos presentes en la observación.

La capacidad que muestra el método en la estimación de los parámetros permite realizar inferencias precisas de las observaciones y las respuestas asociadas a los estados no medibles en el sistema, aún ante niveles moderados de ruido en la observación. Esto se atribuye a una buena capacidad, por parte del modelo asumido, en la representación de la respuestas consideradas como observación, las cuales son generadas a partir del mismo modelo numérico en el cual se basa la estimación.

Finalmente se realizó un estudio complementario, incluyendo un análisis de sensibilidad de los métodos al nivel de ruido en la respuesta utilizada y un estudio de la variación de algunos de los factores aplicados en la identificación mediante el Filtro de Partículas, como resulta el caso de la incorporación de modelos histeréticos acoplados, funciones de verosimilitud sigmoidales y limitaciones en las condiciones de entrada del método, buscando mostrar el desempeño de los algoritmos bajo ciertas limitaciones en su aplicación.

El siguiente capítulo busca validar los resultados obtenidos de forma analítica, mediante la identificación de un edificio aislado existente cuyos registros de aceleración, correspondientes a eventos sísmicos ocurridos en el período 1993-2014, son utilizados como observación en la aplicación de los algoritmos de identificación en estudio.

CAPITULO V
IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURA AISLADA
EXISTENTE

CAPITULO V. IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURA AISLADA EXISTENTE

5.1. INTRODUCCIÓN

La segunda parte del estudio comprende la aplicación de los procedimientos de identificación utilizando los registros sísmicos de una estructura aislada existente. Esta consiste en un edificio de 4 pisos, conformado por un primer piso de hormigón y el resto de albañilería confinada, soportado sobre 8 aisladores sísmicos, cuyas características fueron detalladas en la sección 2.4 del Capítulo II.

Los registros de aceleración a nivel de fundación (F), losa del primer piso (L) y cuarto piso (C) son utilizados para llevar a cabo la identificación a partir de los métodos aplicados en el Capítulo IV. Para efectos del desarrollo del capítulo y análisis de resultados, se escoge un subconjunto de eventos sísmicos de la base de datos según el nivel de no linealidad experimentado por la estructura, acorde a las características estudiadas en el Capítulo III, adjuntándose en el Anexo E los resultados correspondiente al resto de los eventos sísmicos.

Las técnicas de identificación aplicadas en el presente capítulo consisten en: FFT, MOESP-MW, RPEM- λ y Filtro de Partículas. Con los primeros 3 métodos se estiman las propiedades modales de la estructura: frecuencias, amortiguamientos y formas modales. Mientras que con el último algoritmo se estiman las distribuciones de probabilidad asociadas a los parámetros dinámicos que definen el comportamiento histerético de los aisladores: rigidez inicial, razón de rigideces, esfuerzo de fluencia y exponente de transición.

El objetivo del capítulo consiste en validar los resultados obtenidos en forma analítica en el Capítulo IV. Al mismo tiempo se busca analizar el desempeño que muestra cada método en la identificación de las propiedades que caracterizan el comportamiento sísmico de la estructura aislada existente.

5.2 EVENTOS SÍSMICOS EN ESTUDIO

Las Tablas 38 - 39 muestran los eventos sísmicos seleccionados para presentar los resultados de la identificación de la estructura aislada, utilizando los registros de respuesta de aceleración. Estos son clasificados a partir de los valores de las frecuencias identificadas para el primer modo de la estructura y sus niveles máximos de desplazamientos en la interfaz de aislación. Dichas variables poseen una correlación consistente con grado de no linealidad en la respuesta del edificio acorde a lo expuesto en el Capítulo III (Figura 133).

• Eventos Sísmicos con Respuesta Débil

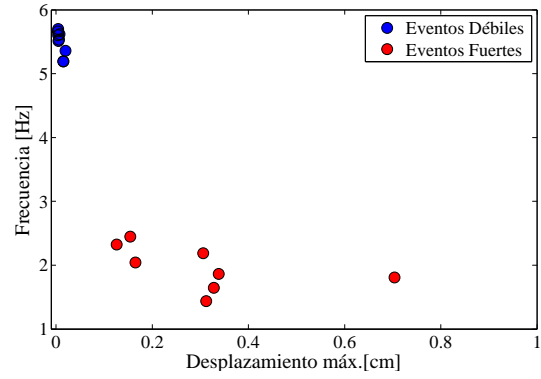
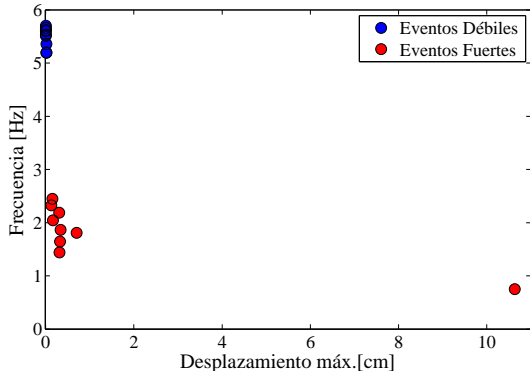
Evento	Magnitud	Intensidad	PGA/dmax NS	PGA/dmax EO	PGA/dmax V
1994102201	4.1	N/A	0.002/0.004	0.002/0.003	0.002/0.004
1995011301	4.6	N/A	0.002/0.005	0.002/0.003	0.001/0.005
1995043001	4.25	N/A	0.002/0.004	0.002/0.004	0.001/0.003
1998102902	4.7	IV	0.003/0.006	0.004/0.006	0.002/0.003
1995062801	4.6	N/A	0.001/0.007	0.001/0.005	0.001/0.004
1999080301	4.8	IV	0.005/0.033	0.007/0.032	0.005/0.004
1999090101	4.6	III	0.003/0.019	0.003/0.017	0.003/0.003
2004102601	4.4	III	0.003/0.005	0.003/0.004	0.002/0.003
2006061701	4.7	III	0.006/0.019	0.009/0.022	0.005/0.007

Tabla 38: Eventos sísmicos débiles mostrados para el estudio. PGA se muestra en [g] y el desplazamiento máximo en la interfaz de aislación en [cm]

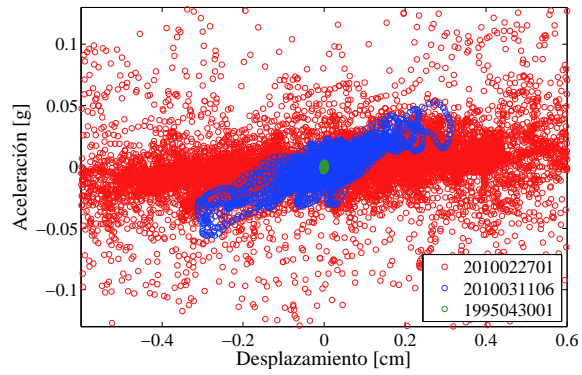
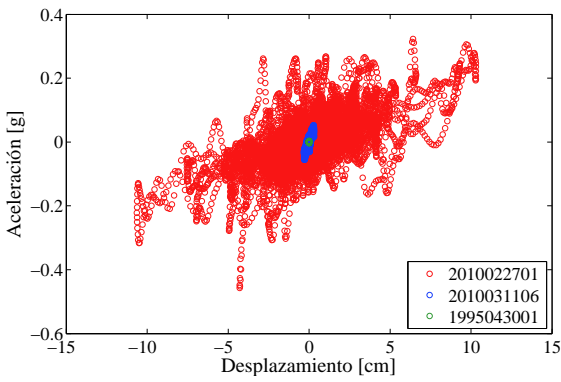
• Eventos Sísmicos con Respuesta Fuerte

Evento	Magnitud	Intensidad	PGA/dmax NS	PGA/dmax EO	PGA/dmax V
1996022201	5.9	VI	0.069/0.339	0.050/0.324	0.042/0.012
1997032401	5.3	VI	0.051/0.165	0.060/0.150	0.030/0.013
1997061901	5.1	V	0.017/0.116	0.015/0.157	0.010/0.007
1998072901	6.2	V	0.015/0.126	0.020/0.118	0.013/0.005
1999040601	4.9	IV	0.0118/0.081	0.011/0.080	0.006/0.006
2000061601	6.4	N/A	0.034/0.704	0.033/0.792	0.033/0.010
2010022701	8.8	VIII	0.311/10.631	0.228/6.514	0.178/4.146
2010031106	N/A	N/A	0.030/0.312	0.030/0.611	0.015/0.011
2012041701	6.3	VI	0.027/0.328	0.032/0.560	0.027/0.132

Tabla 39: Eventos sísmicos fuertes mostrados para el estudio. PGA se muestra en [g] y el desplazamiento máximo en la interfaz de aislación en [cm]

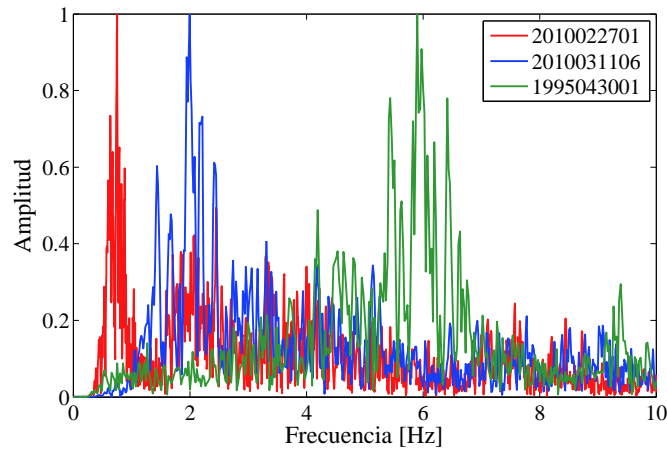


(a) Frecuencias del 1er modo de eventos sísmicos (b) Frecuencias del 1er modo ($d_{max} \leq 1$ cm)



(c) Curva de rigidez de eventos sísmicos

(d) Curva de rigidez con $d_{max} \leq 0.6$ cm



(e) Espectros de frecuencias para eventos sísmicos

Figura 133: Propiedades de eventos sísmicos escogidos

5.3 RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN ESTRUCTURA AISLADA

La presente sección muestra los resultados de la identificación de la estructura aislada mediante los registros de aceleración correspondiente a los eventos sísmicos presentados en las Tablas 38 - 39.

Utilizando los métodos FFT, MOESP-MV Y RPEM- λ se obtienen las frecuencias, amortiguamientos y formas modales aproximadas del edificio aislado. Mientras que con el algoritmo de Filtro de Partículas (PF), se estiman los parámetros dinámicos del modelo hysterético que define el comportamiento de los aisladores en la estructura. Estos corresponden a la rigidez inicial k_i , razón de rigideces α , esfuerzo de fluencia F_y y exponente de transición n .

Los resultados se obtienen considerando los niveles no linealidad en la respuesta clasificados como Débil y Fuerte, haciendo uso de los registros de Fundación (F), Losa (L) y Cuarto Piso (C) de la estructura, con el objetivo de validar el alcance de los métodos de identificación en estudio en este tipo de sistemas.

5.3.1. Identificación mediante FFT, MOESP-MW y RPEM- λ

Parámetros de entrada

Para realizar la identificación de las propiedades modales de la estructura aislada, se definieron los parámetros iniciales de los métodos, tomando como referencia los valores utilizados en el estudio analítico del Capítulo IV.

Los procedimientos de identificación consideran una frecuencia de muestreo de $F_s = 200$ Hz, con una duración de ventana de identificación de $T_w = 4$ [seg] en el caso de MOESP y un factor de olvido $\lambda = 0.995$ en el caso de RPEM. Ambos algoritmos poseen valores de parámetros particulares para cada evento, asociados a los diagramas de estabilización y a los modelos polinomiales candidatos, los cuales se especifican en el Anexo E.

El rango de interés para las frecuencias de los modos a identificar en la estructura corresponden a valores comprendidos entre los 0-30 Hz. Mientras que para los amortiguamientos modales se consideran valores de hasta un 80 %. Considerando la disponibilidad de solo 2 canales de observación en el edificio, las formas modales a identificar corresponden principalmente a los primeros dos modos horizontales de la estructura, utilizando las estimaciones de amplitud modal en el primer y cuarto piso.

Resultados

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento esperado de las propiedades modales en relación a lo observado en el estudio analítico. Los eventos sísmicos débiles (Figuras 134-141) exhiben frecuencias del primer modo de la estructura sin cambios apreciables a lo largo del registro, identificándose valores cercanos a los 5.8 Hz y 6.5 Hz para las direcciones EO y NS respectivamente, con un amortiguamiento modal comprendido entre un 5-20 %.

Mientras que para los eventos clasificados en el grupo de excitación fuerte (Figuras 142-149), se detecta una caída en el valor de la frecuencia del primer modo que coincide con la ocurrencia de la fase fuerte de la excitación/respuesta, alcanzando los 0.65-0.66 Hz en las direcciones horizontales para el evento de mayor excitación (Evento 20100227). Estos presentan valores de amortiguamientos que alcanzan los 40-60 %, dando cuenta de una respuesta fuertemente no lineal en la estructura.

El comportamiento exhibido por el amortiguamiento identificado para el primer modo de vibración presenta mayor similitud al mostrado por el modelo histerético de Bouc-Wen/Rubber, donde ante bajos niveles de excitación se observa una tendencia al incremento de este parámetro dado por el carácter no lineal del tramo inicial y del acoplamiento entre respuestas ortogonales respectivamente. Por lo tanto, es esperable que este tipo de modelos de histéresis represente de una mejor forma el comportamiento de la estructura en las direcciones horizontales, en comparación al modelo bilineal.

Se identifican modos superiores en los 8-10, 13-15 y 24-25 Hz mediante registros horizontales. Estos se encuentran asociados a amortiguamientos estables y acotados en un rango del 1-4 %, no resultando mayormente afectados por el cambio en el nivel de no linealidad en la respuesta de la estructura. Por otra parte, la identificación llevada a cabo con registros verticales (Figuras 150-153) muestra frecuencias cercanas a los 15 Hz, con amortiguamientos comprendidos entre los 1-4 %, exhibiendo un comportamiento predominantemente lineal debido a la gran rigidez axial de los aisladores.

Los resultados también muestran la identificación de frecuencias asociadas a modos con componente predominante en las direcciones ortogonales con respecto a la del registro. Tal es el caso de la identificación mediante registros horizontales, donde un modo asociado a los 15 Hz es detectado de forma frecuente. Así mismo, dos modos cercanos a los 5-6 y 8-10 Hz de menor energía son identificados en algunos casos mediante el uso de registros verticales. Esto obedece a la participación acoplada de los modos en la estructura aislada, presentando movimientos no despreciables en las direcciones ortogonales con respecto a la de análisis, lo que hace posible su identificación con registros en direcciones donde la participación de estos no corresponde necesariamente a la predominante.

A diferencia de los resultados obtenidos en el estudio analítico, el cambio en el valor de la frecuencia del primer modo muestra ser continuo con el nivel de no linealidad en la respuesta de la estructura, controlado por la amplitud de la excitación en la fase fuerte del evento sísmico, detectándose al menos 3 rangos distintos para los valores de la frecuencia fundamental, los cuales se muestran en la Figura 133e.

Basado en la amplitud que muestran las frecuencias predominantes en los registros de respuesta del edificio y la frecuencia con que se detectan determinados tipos de modos para un cierto nivel de no linealidad, estos se clasifican acorde a como se muestra en la Tabla 40.

Finalmente, las formas modales identificadas se muestran en las Figuras 154-156. Estas presentan una baja resolución debido al número acotado de sensores dispuestos en la estructura, siendo suficientes para aproximar las formas de los primeros dos modos de vibración horizontal, favorecidos por la baja participación rotacional en la respuesta para dichos eventos (a diferencia del estudio analítico y acorde a lo detallado en la sección 4.6.4) y el primer modo predominante en la dirección vertical.

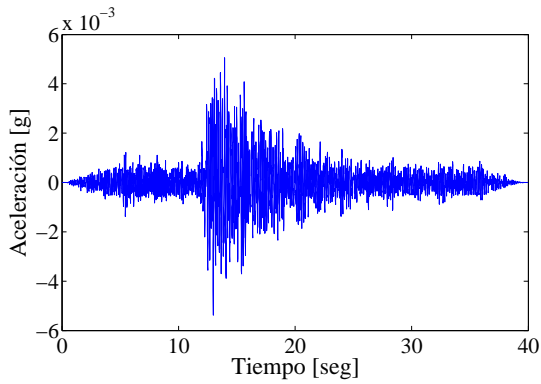
Las amplitudes de las formas modales identificadas mediante FRF y MOESP muestran cierto grado de consistencia con la forma esperada para los modos detectados. Mientras que la alta dependencia de RPEM en la capacidad de los polinomios seleccionados para identificar las mismas propiedades en distintos canales, produce que estos presenten inconsistencias en las amplitudes modales estimadas, no siendo posible identificar de forma adecuada la forma modal de la estructura en gran parte de los casos, a excepción de los correspondientes a la dirección vertical.

Aún así, parte de las propiedades modales identificadas con los distintos métodos presentan un buen grado de consistencia, siendo posible llevar a cabo una identificación efectiva del comportamiento no estacionario que presenta la estructura aislada, basado principalmente en la obtención de las frecuencias y parcialmente en los amortiguamientos estimados para distintos niveles de excitación sísmica.

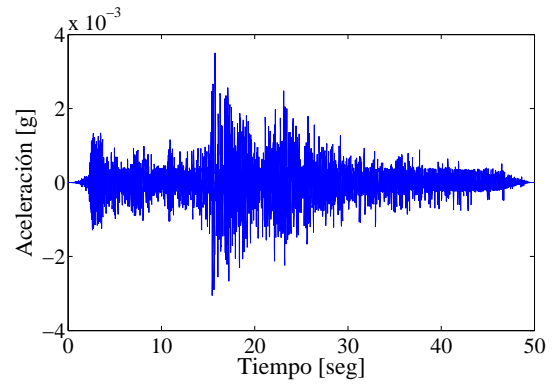
Modo Dirección Predominante	Períodos [seg]	Frecuencias [Hz]	β [%]
Traslacional EO	0.175 \uparrow 1.53	5.71 \downarrow 0.65	5 \uparrow 40-60
Traslacional NS	0.154 \uparrow 1.51	6.50 \downarrow 0.66	5 \uparrow 40-60
Torsional RZ**	0.1 - 0.13	7.7-10	-
Rocking Z	0.065 - 0.083	15.33 - 12 \downarrow	1-5
Vertical Z	0.04-0.041	24-25	1-3
**Detectado principalmente en funciones de transferencia Figura 157 - 158			

Tabla 40: Modos identificados en estructura aislada

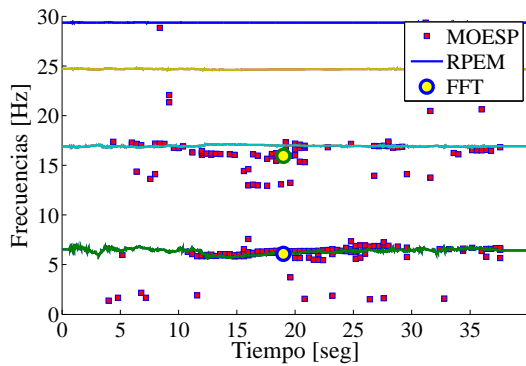
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Débil - Horizontal



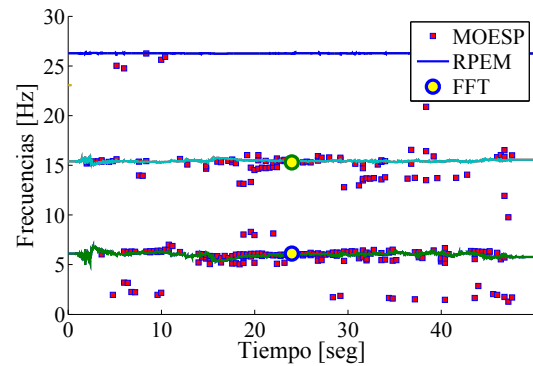
(a) Aceleración Cuarto Piso



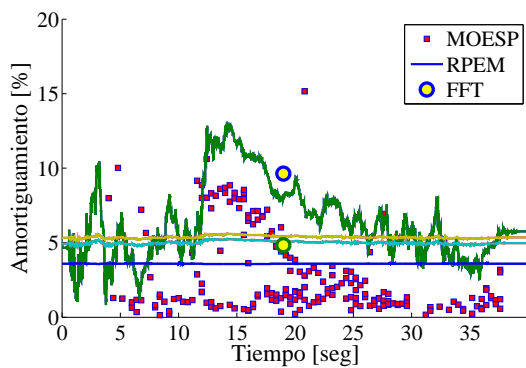
(a) Aceleración Cuarto Piso



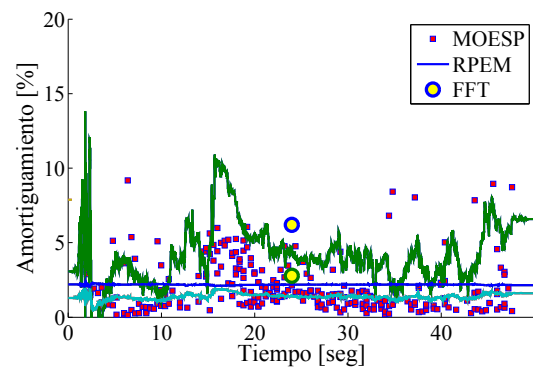
(b) Frecuencias identificadas



(b) Frecuencias identificadas



(c) Amortiguamientos identificados

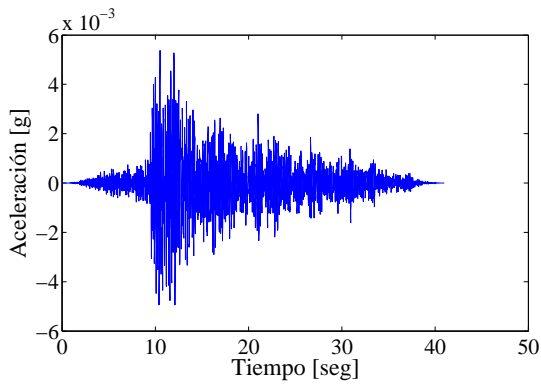


(c) Amortiguamientos identificados

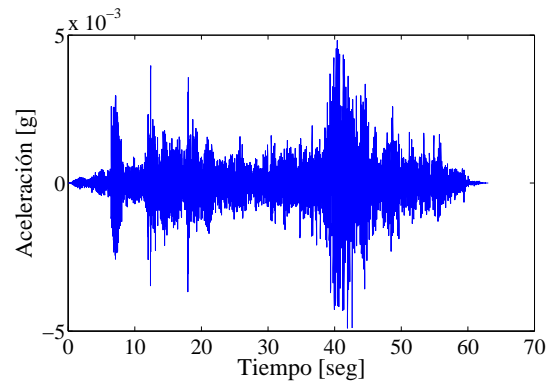
Figura 134: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1994102201 - EO

Figura 135: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1995011301 - EO

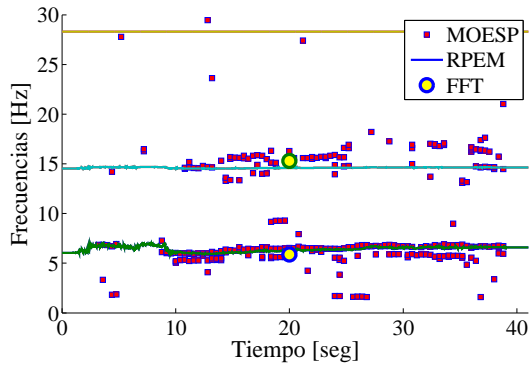
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Débil - Horizontal



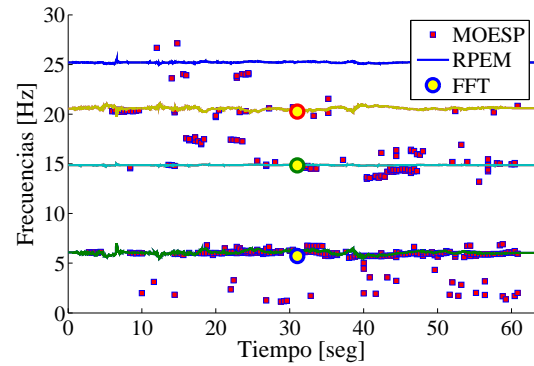
(a) Aceleración Cuarto Piso



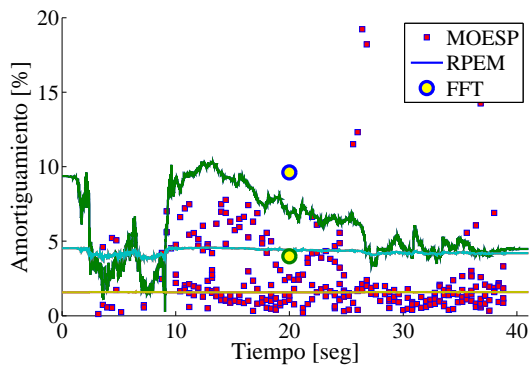
(a) Aceleración Cuarto Piso



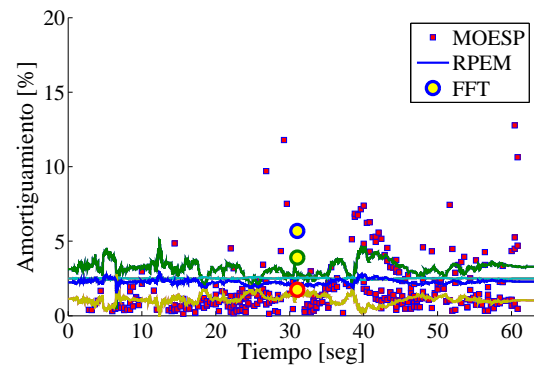
(b) Frecuencias identificadas



(b) Frecuencias identificadas



(c) Amortiguamientos identificados

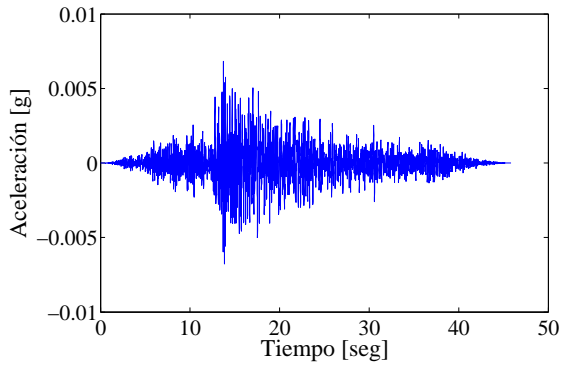


(c) Amortiguamientos identificados

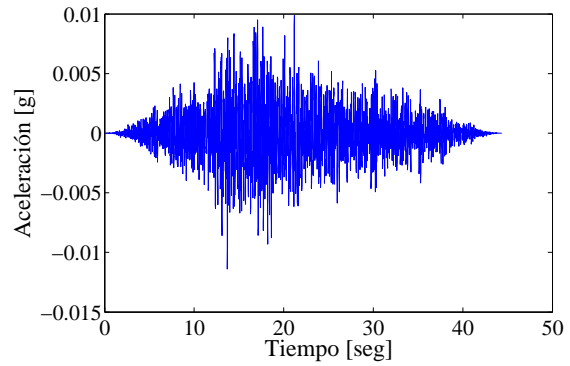
Figura 136: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1995043001 - EO

Figura 137: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1995062801 - NS

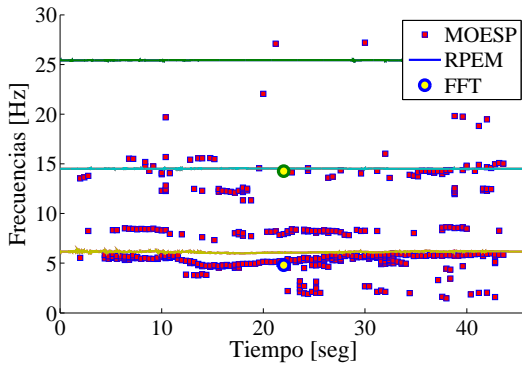
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Débil - Horizontal



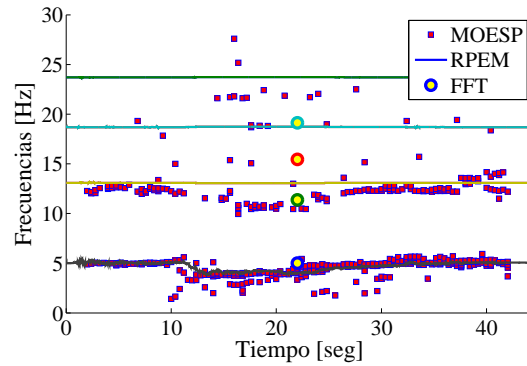
(a) Aceleración Cuarto Piso



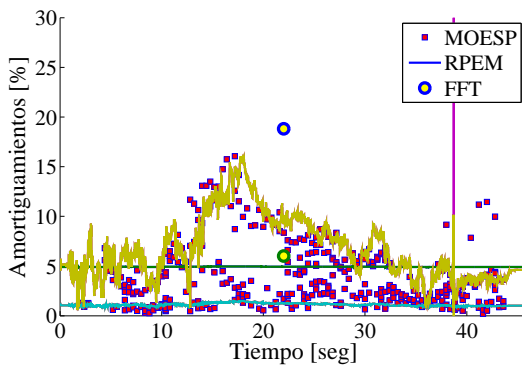
(a) Aceleración Cuarto Piso



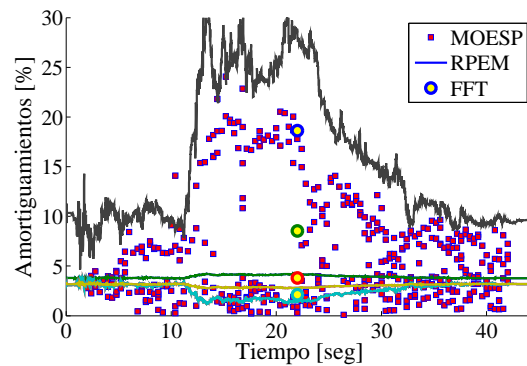
(b) Frecuencias identificadas



(b) Frecuencias identificadas



(c) Amortiguamientos identificados

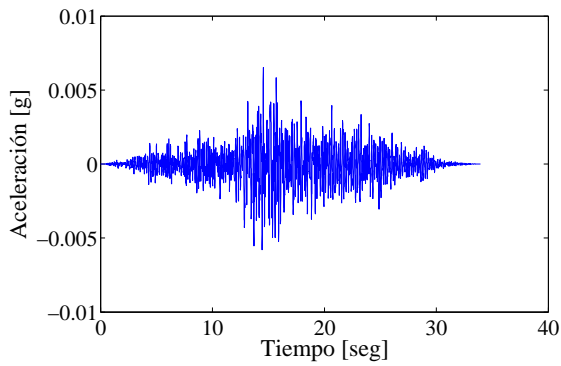


(c) Amortiguamientos identificados

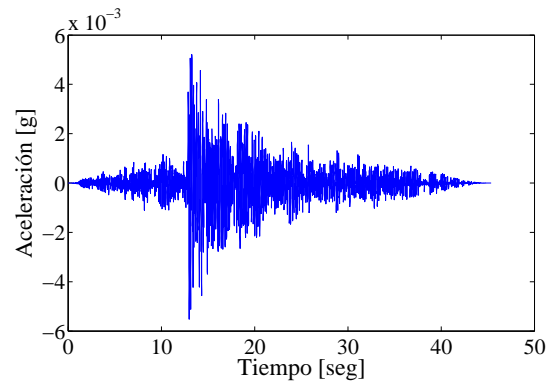
Figura 138: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1998102902 - EO

Figura 139: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1999080301 - NS

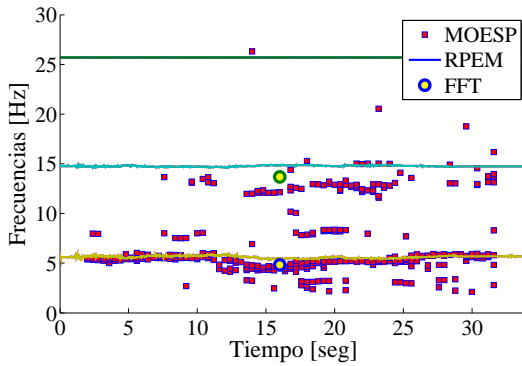
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Débil - Horizontal



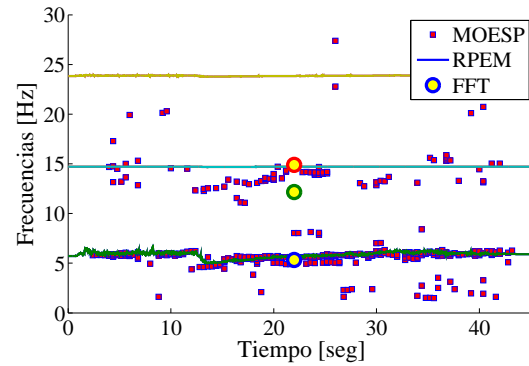
(a) Aceleración Cuarto Piso



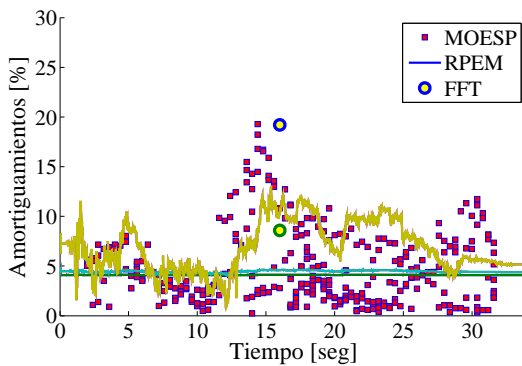
(a) Aceleración Cuarto Piso



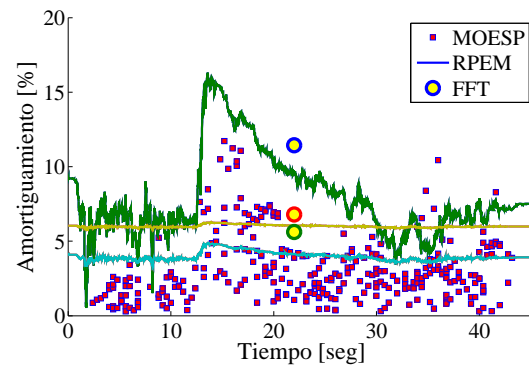
(b) Frecuencias identificadas



(b) Frecuencias identificadas



(c) Amortiguamientos identificados

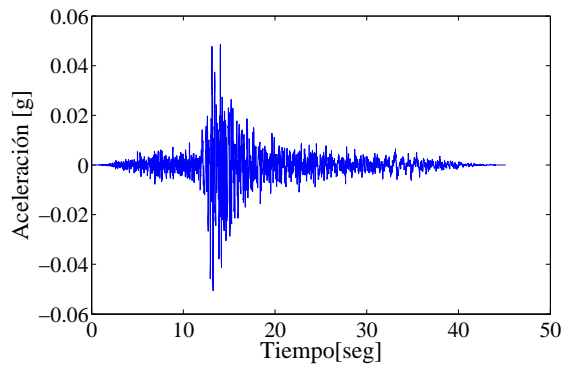


(c) Amortiguamientos identificados

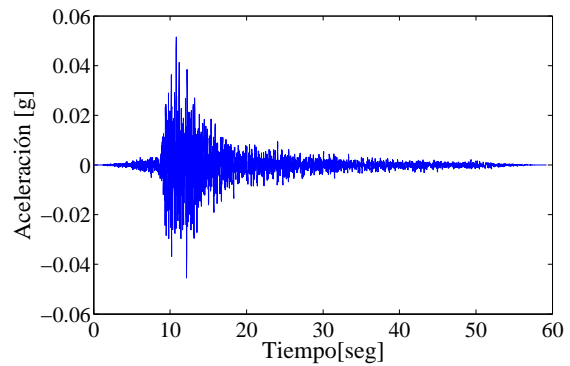
Figura 140: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1999090101 - EO

Figura 141: Propiedades Modales identificadas en Evento: 2004102601 - EO

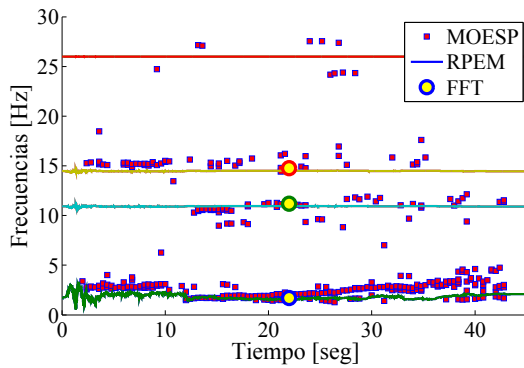
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Fuerte - Horizontal



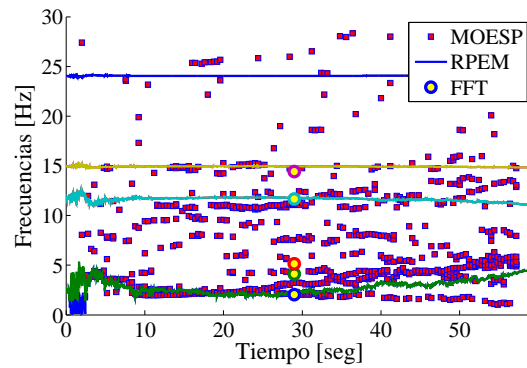
(a) Excitación Basal



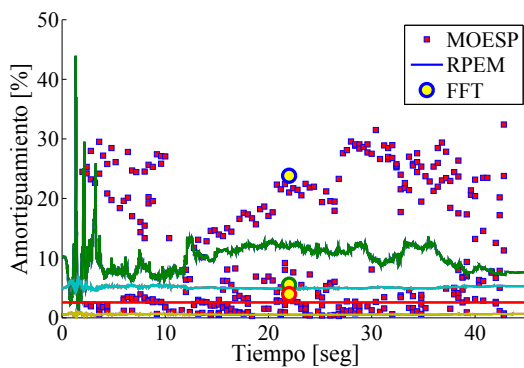
(a) Excitación Basal



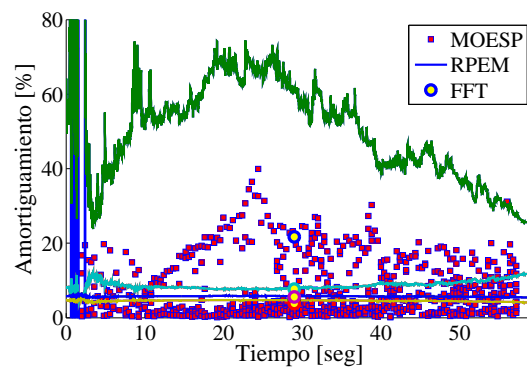
(b) Frecuencias identificadas



(b) Frecuencias identificadas



(c) Amortiguamientos identificados

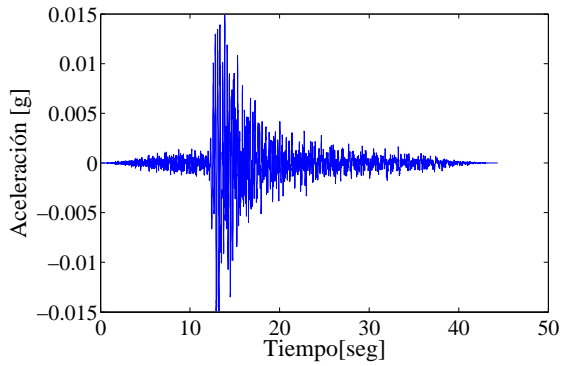


(c) Amortiguamientos identificados

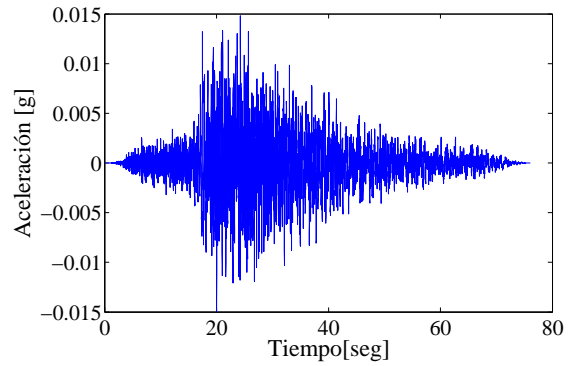
Figura 142: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1996022201 - EO

Figura 143: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1997032401 - EO

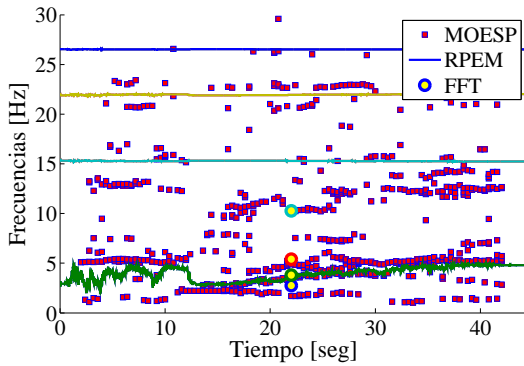
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Fuerte - Horizontal



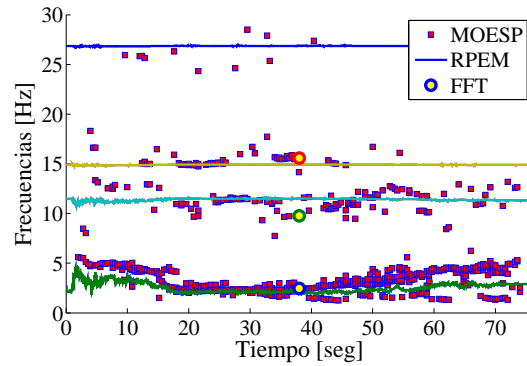
(a) Excitación Basal



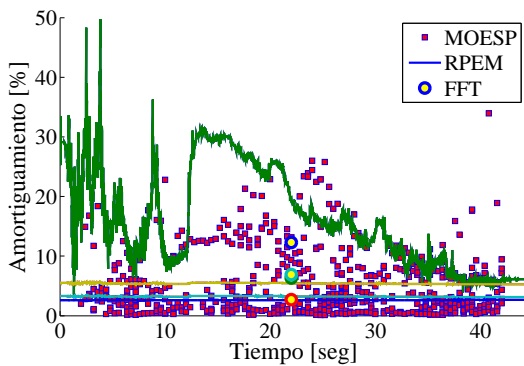
(a) Excitación Basal



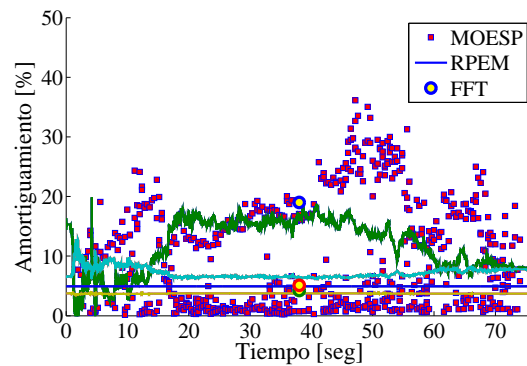
(b) Frecuencias identificadas



(b) Frecuencias identificadas



(c) Amortiguamientos identificados

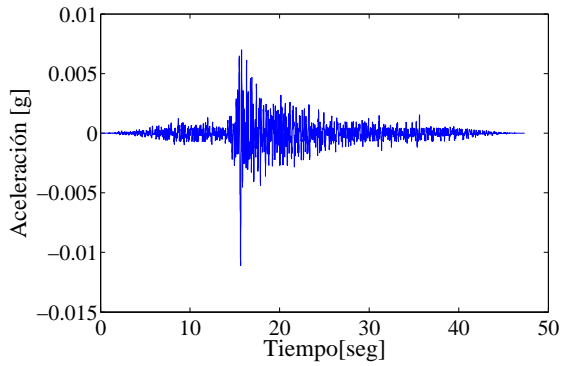


(c) Amortiguamientos identificados

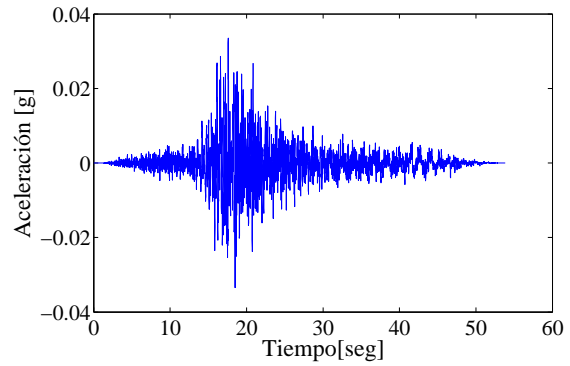
Figura 144: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1997061901 - NS

Figura 145: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1998072901 - EO

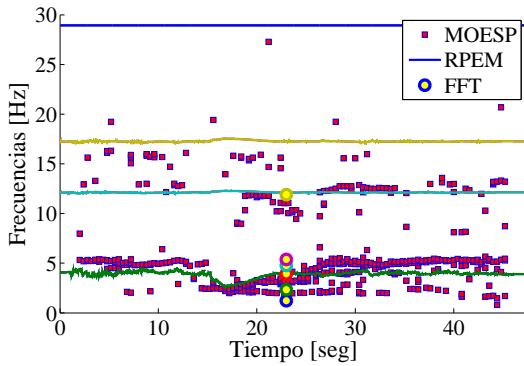
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Fuerte - Horizontal



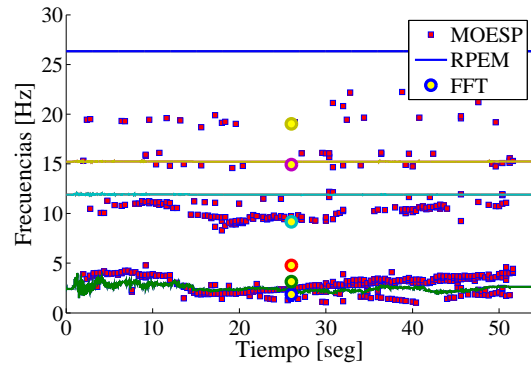
(a) Excitación Basal



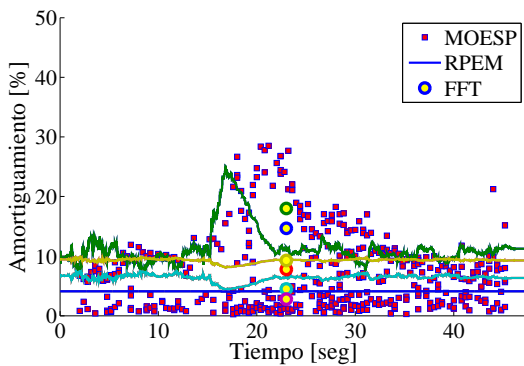
(a) Excitación Basal



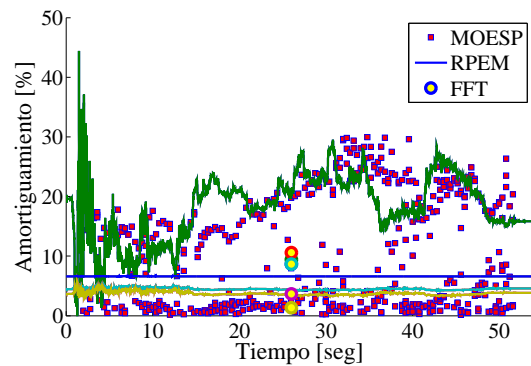
(b) Frecuencias identificadas



(b) Frecuencias identificadas



(c) Amortiguamientos identificados

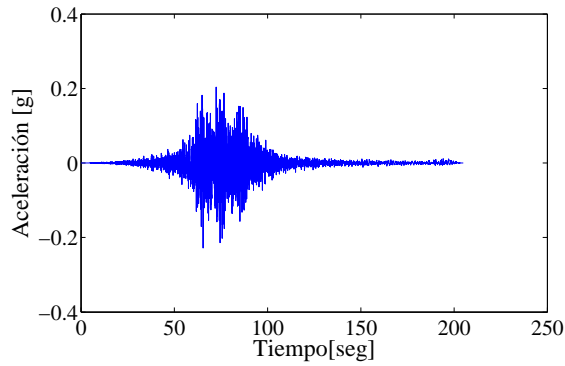


(c) Amortiguamientos identificados

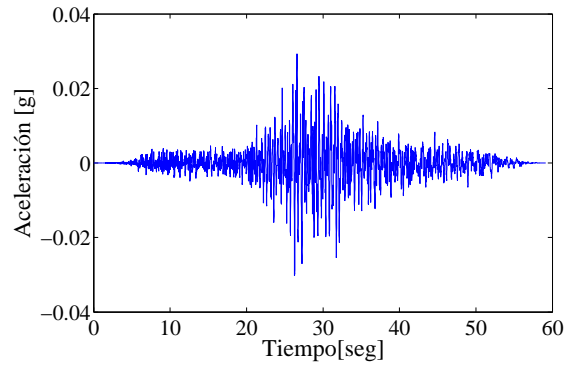
Figura 146: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1999040601 - EO

Figura 147: Propiedades Modales identificadas en Evento: 2000061601 - NS

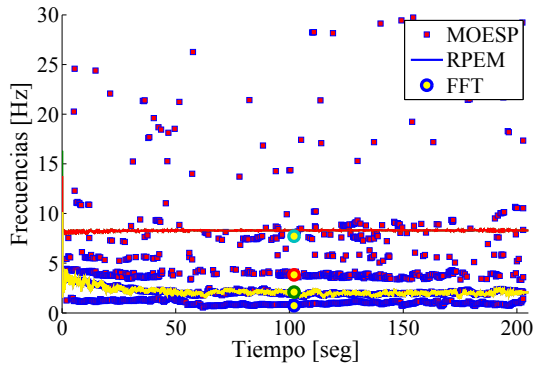
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Fuerte - Horizontal



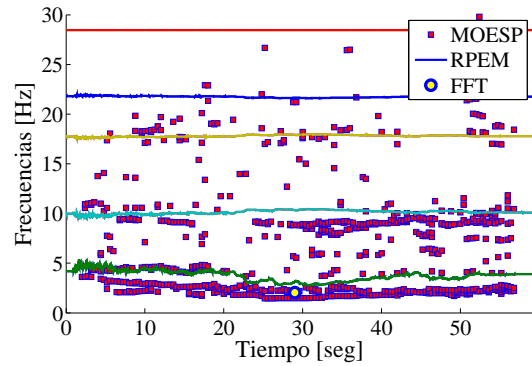
(a) Excitación Basal



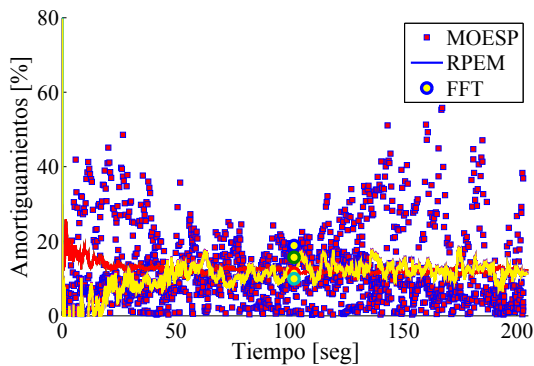
(a) Excitación Basal



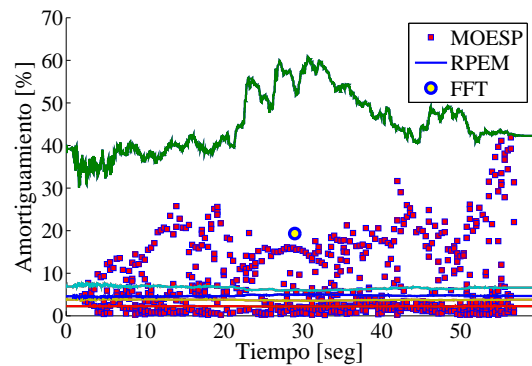
(b) Frecuencias identificadas



(b) Frecuencias identificadas



(c) Amortiguamientos identificados

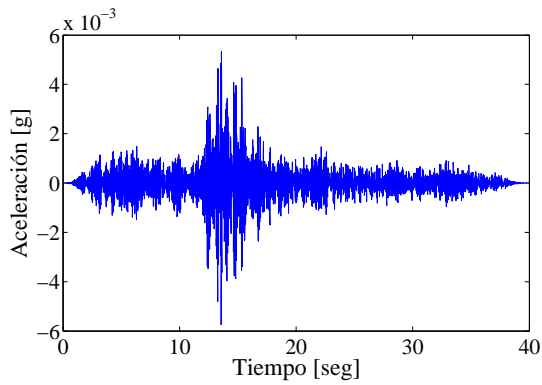


(c) Amortiguamientos identificados

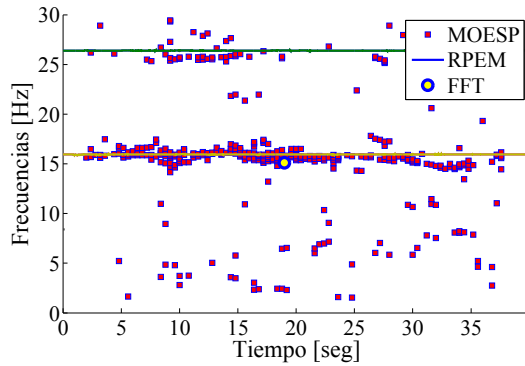
Figura 148: Propiedades Modales identificadas en Evento: 2010022701 - NS

Figura 149: Propiedades Modales identificadas en Evento: 2010031106 - NS

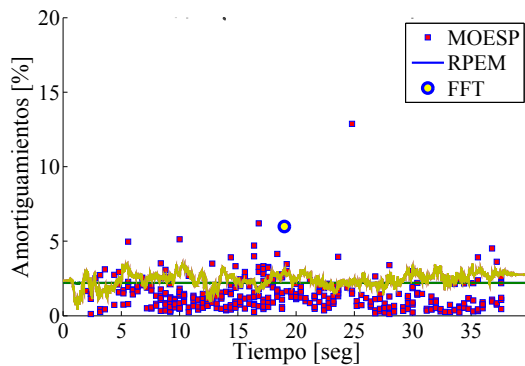
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Débil - Vertical



(a) Aceleración Cuarto Piso

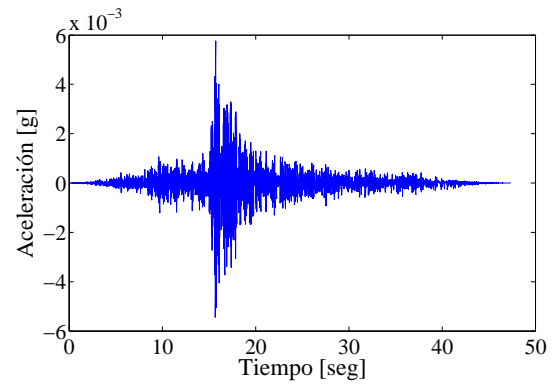


(b) Frecuencias identificadas

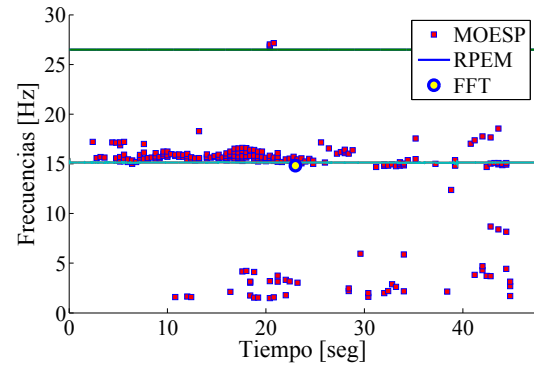


(c) Amortiguamientos identificados

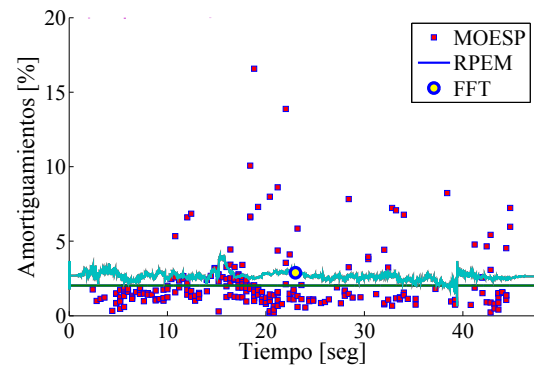
Figura 150: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1994102201 - V



(a) Aceleración Cuarto Piso



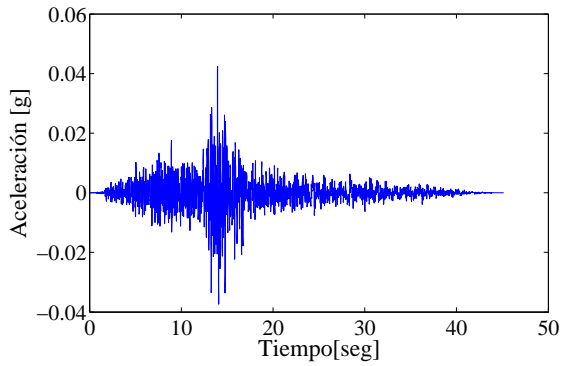
(b) Frecuencias identificadas



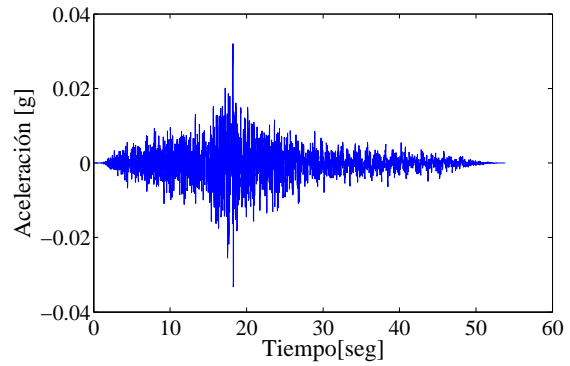
(c) Amortiguamientos identificados

Figura 151: Propiedades Modales identificadas en Evento: 2006061701 - V

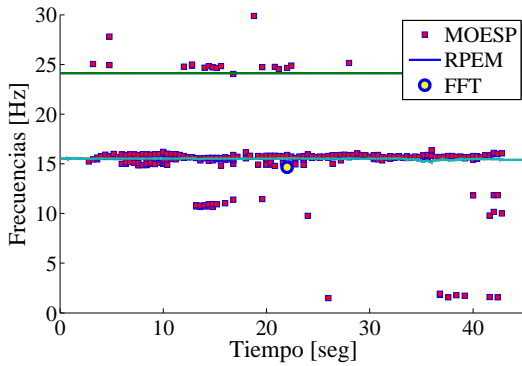
• Frecuencias/Amortiguamientos - Eventos con Respuesta Fuerte - Vertical



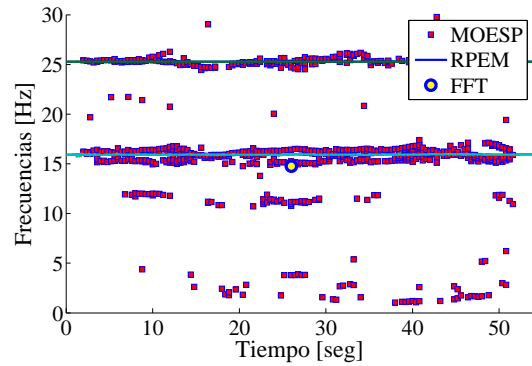
(a) Excitación Basal



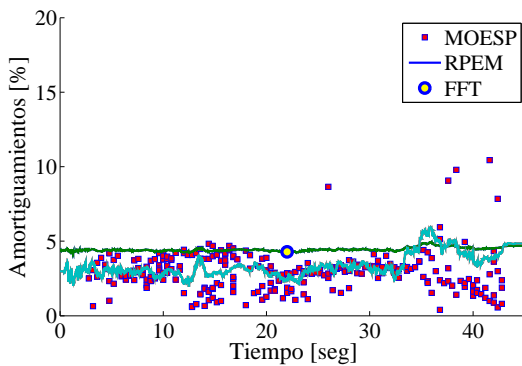
(a) Excitación Basal



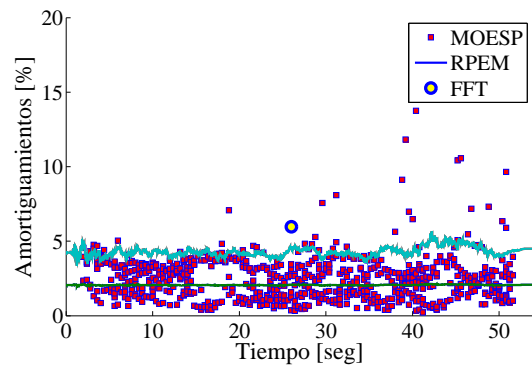
(b) Frecuencias identificadas



(b) Frecuencias identificadas



(c) Amortiguamientos identificados

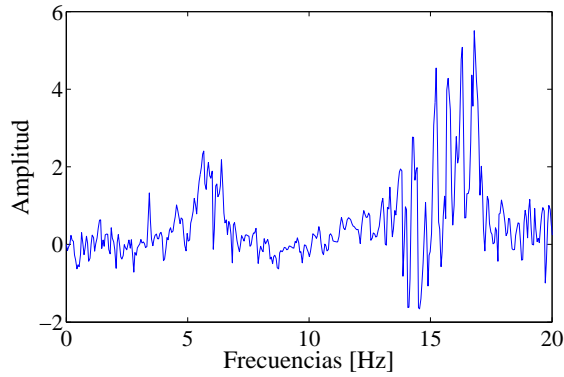


(c) Amortiguamientos identificados

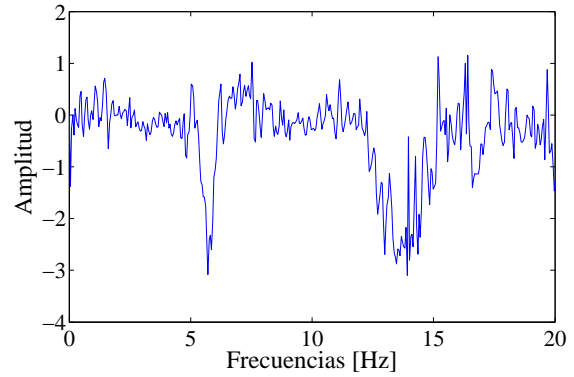
Figura 152: Propiedades Modales identificadas en Evento: 1996022201 - V

Figura 153: Propiedades Modales identificadas en Evento: 2000061601 - V

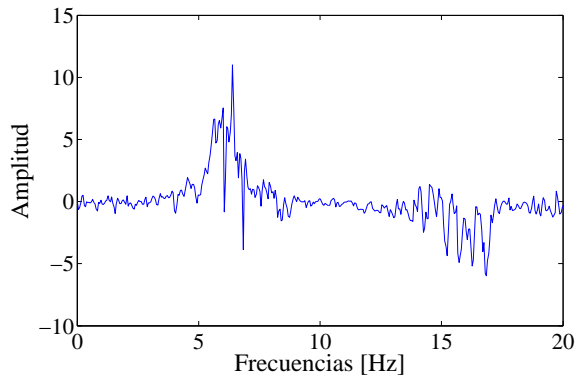
• Formas Modales - Eventos con Respuesta Débil - Horizontal



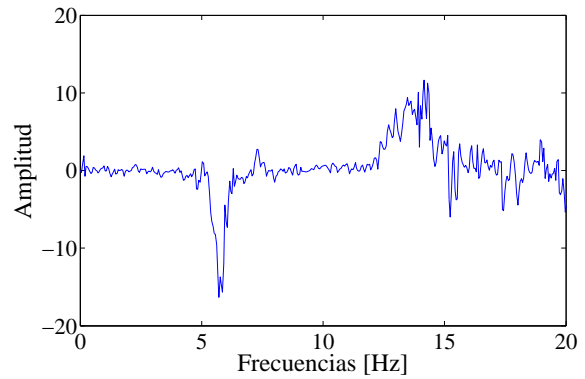
(a) FRF Losa Primer Piso E-O



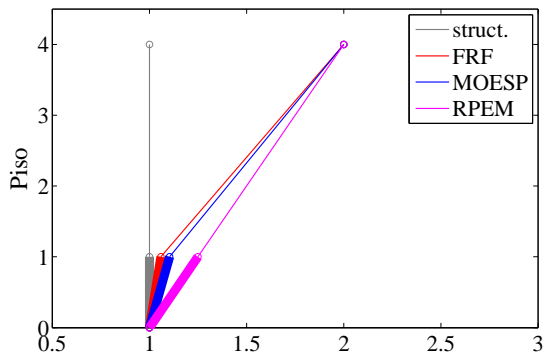
(b) FRF Losa Primer Piso N-S



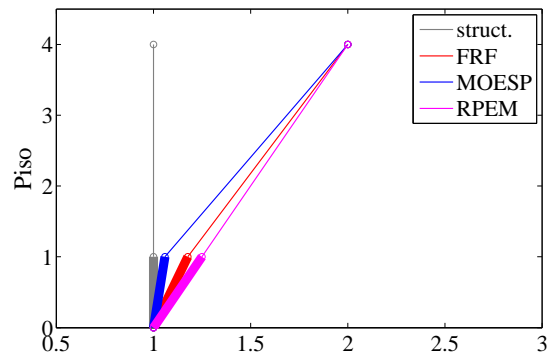
(c) FRF Cuarto Piso E-O



(d) FRF Cuarto Piso N-S



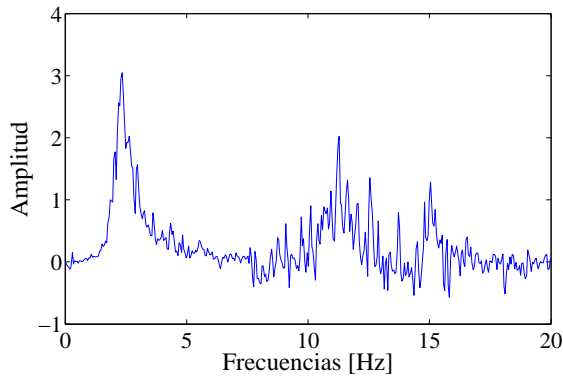
(e) Forma Modal $f_{EO} = 6.4$ Hz



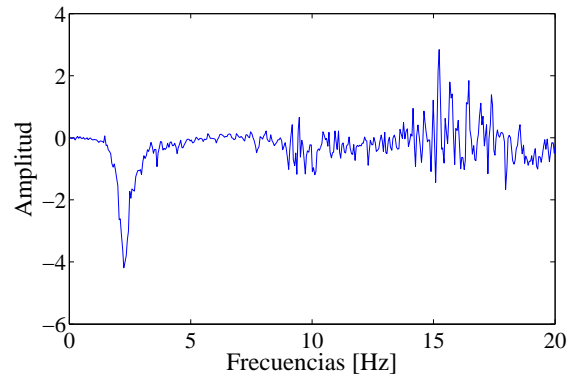
(f) Forma Modal $f_{NS} = 5.76$ Hz

Figura 154: Formas Modales Identificadas en Evento: 1994102201

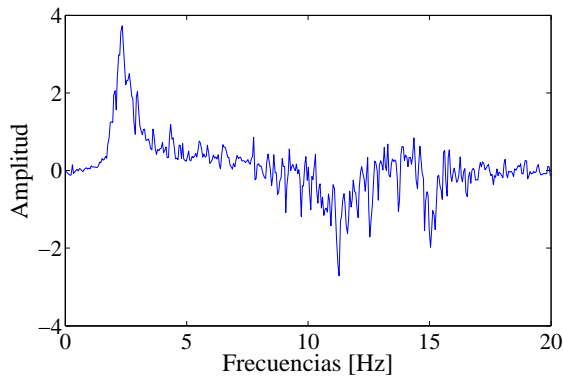
- Formas Modales - Eventos con Respuesta Fuerte - Horizontal



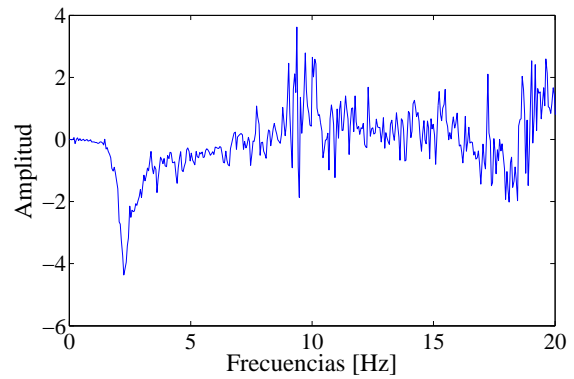
(a) FRF Losa Primer Piso E-O



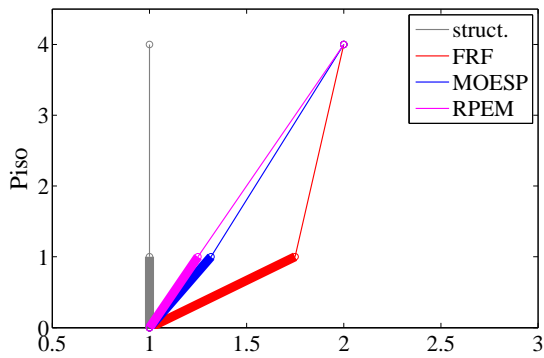
(b) FRF Losa Primer Piso N-S



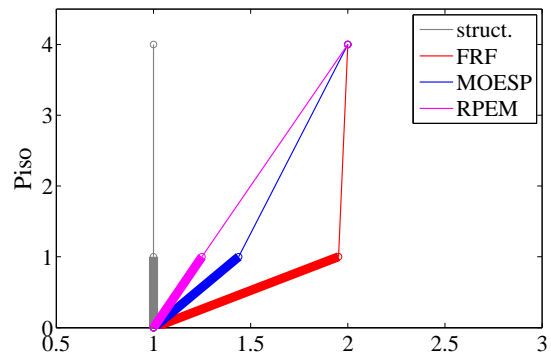
(c) FRF Cuarto Piso E-O



(d) FRF Cuarto Piso N-S



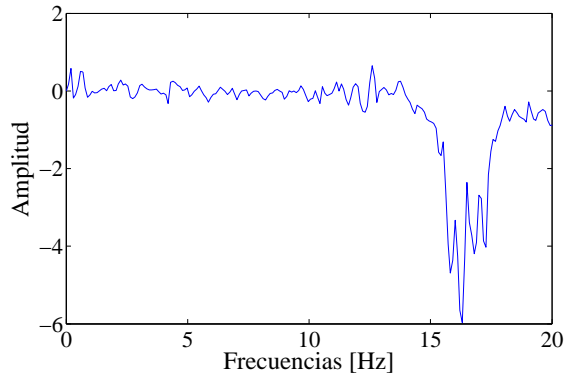
(e) Forma Modal $f_{EO} = 2.34$ Hz



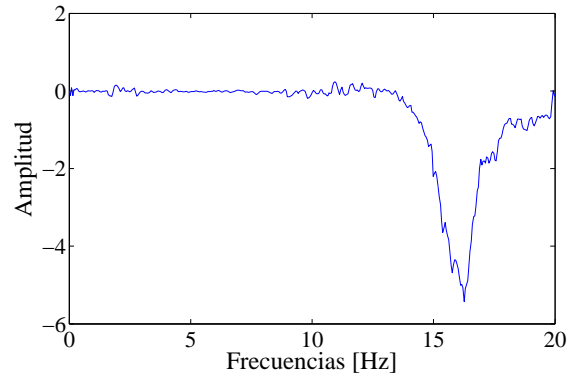
(f) Forma Modal $f_{NS} = 2.2$ Hz

Figura 155: Formas Modales Identificadas en Evento: 1998072901

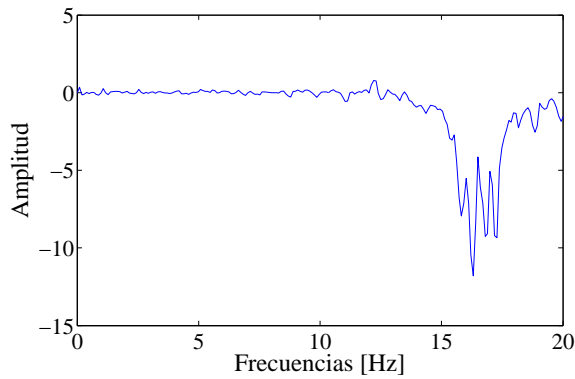
- Formas Modales - Eventos con Respuesta Débil/Fuerte - Vertical



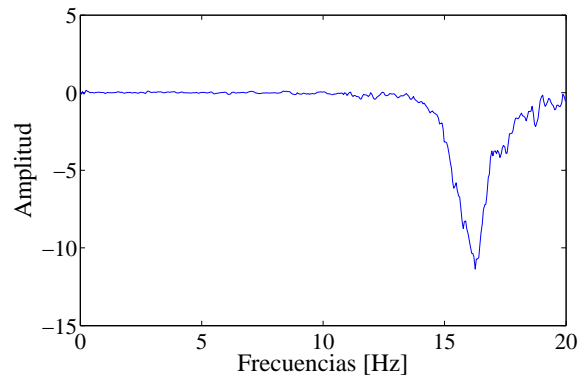
(a) FRF Losa Primer Piso V - Débil



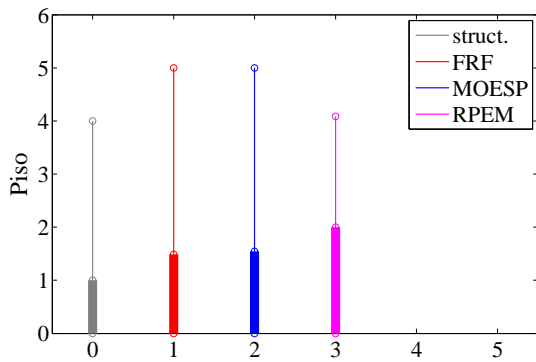
(b) FRF Losa Primer Piso V - Fuerte



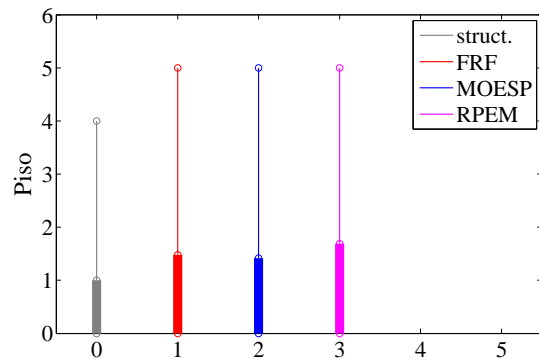
(c) FRF Cuarto Piso V - Débil



(d) FRF Cuarto Piso V - Fuerte



(e) Forma Modal $f_V = 16.31$ Hz - Débil



(f) Forma Modal $f_V = 16.26$ Hz - Fuerte

Figura 156: Formas Modales Identificadas en Eventos: 1999090101 (Débil) y 2000061601 (Fuerte)

Finalmente cabe notar que si bien el modo rotacional indicado en la Tabla 40 no es identificado en gran parte de los eventos por los métodos aplicados, dicho modo es detectado de forma consistente mediante el uso del valor absoluto de la función de transferencia entre los registros de aceleración de losa del primer piso (nodo lateral) y cuarto piso (nodo central) para una dirección determinada, lo que es consistente con lo detallado en la Sección 4.6.4.

Dicho modo se muestra en las Figuras 157-158, siendo identificado para un rango entre los 7.7 - 8.1 Hz. Mientras que con los registros verticales se muestra un comportamiento regular entre las respuestas con amplitudes cercanas a la unidad en un rango de 0-20 Hz (Figura 159). De forma complementaria se observa que los resultados obtenidos mediante las técnicas de identificación aplicadas presentan consistencia con los resultados obtenidos mediante el uso de espectrogramas en las respuestas relativas de aceleración para cada tipo de evento, método que permite observar la evolución en el tiempo y en el espacio de las frecuencias de los modos predominantes en la respuesta de la estructura, como se muestra en las Figuras 160-161.

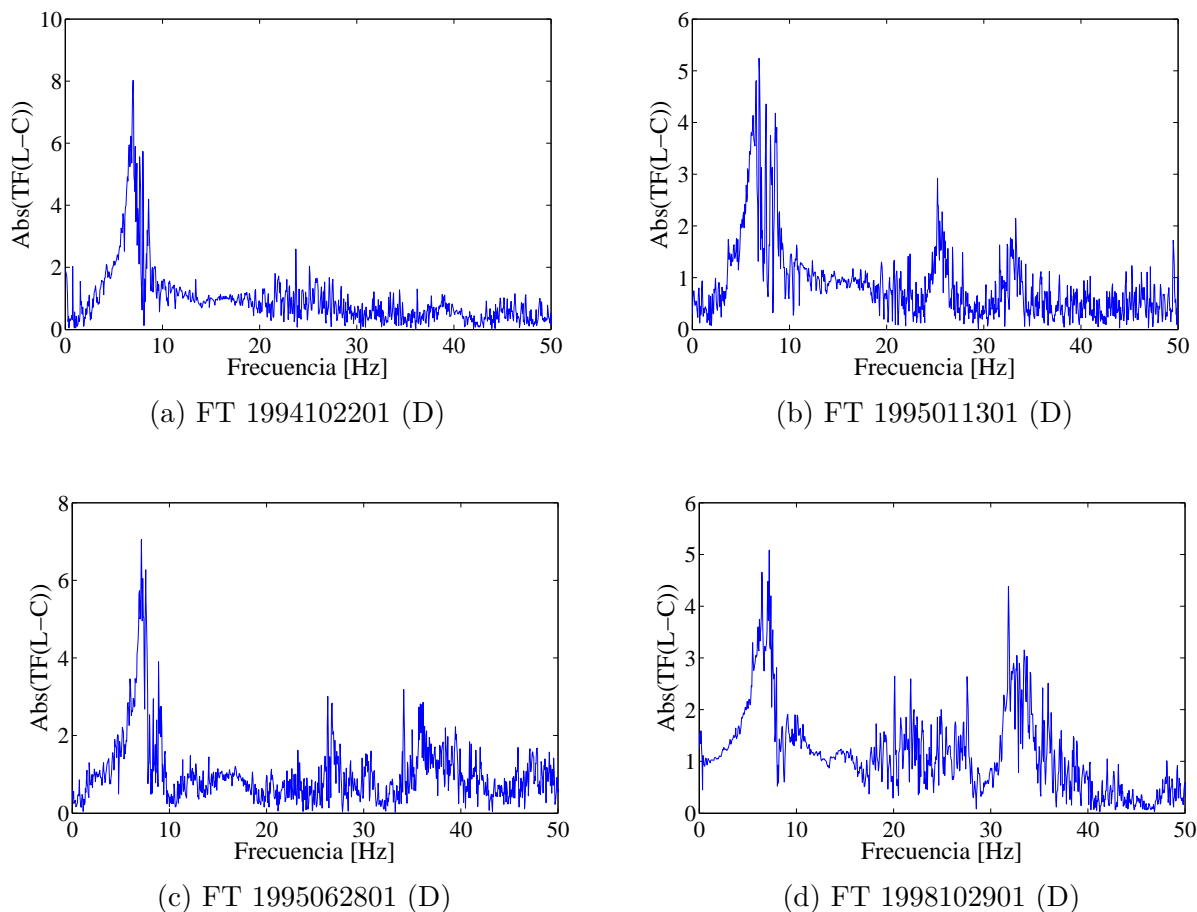
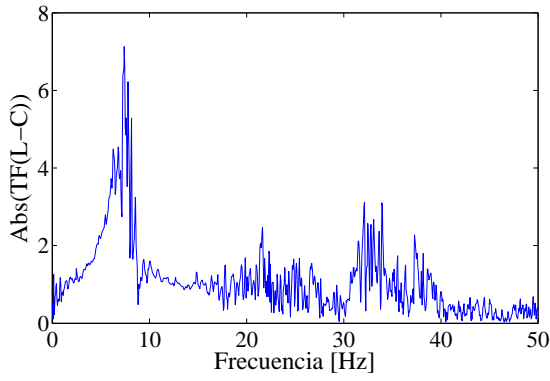
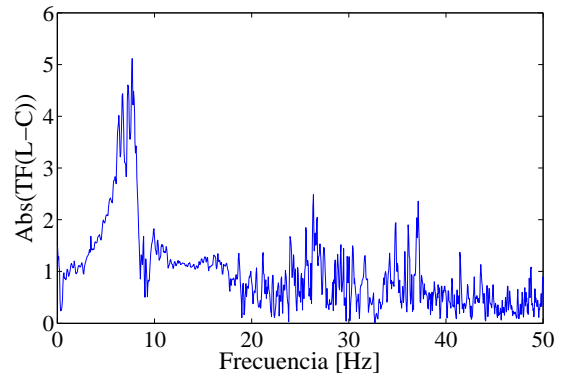


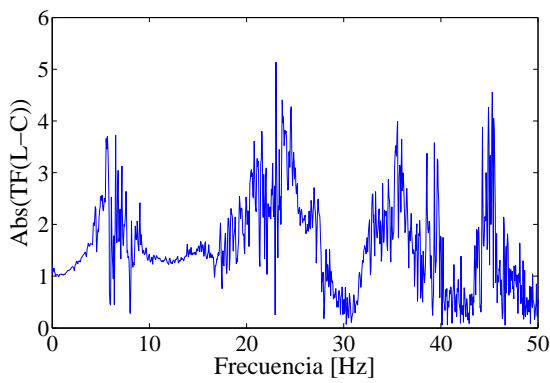
Figura 157: Valor Absoluto de Función de transferencia entre registros de aceleración horizontal de losa (L) y cuarto piso (C) para distintos eventos sísmicos



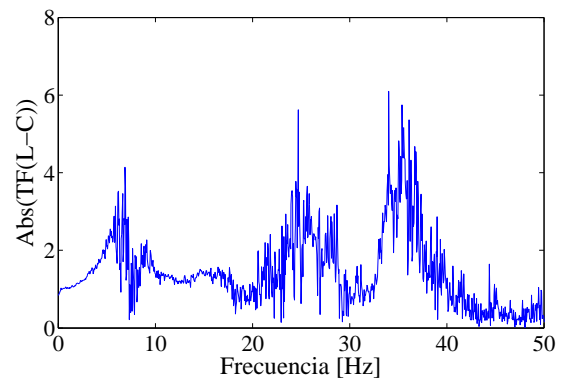
(a) FT 1998102902 (D)



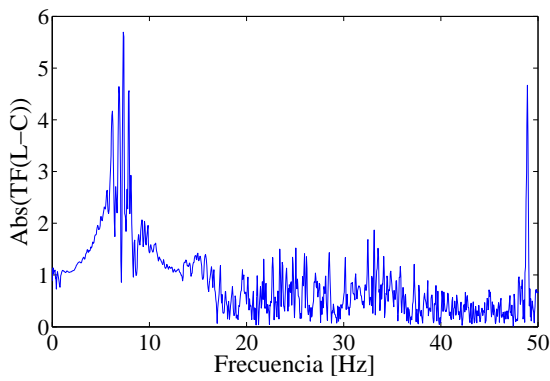
(b) FT 1999090101 (D)



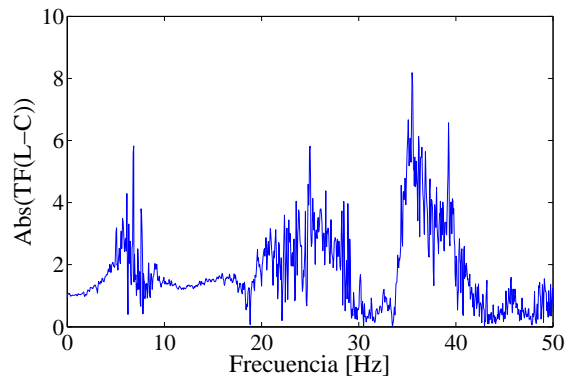
(c) FT 1996022201 (F)



(d) FT 1998072901 (F)

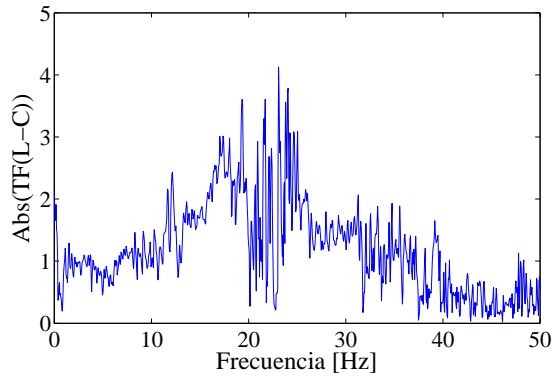


(e) FT 1999040601 (F)

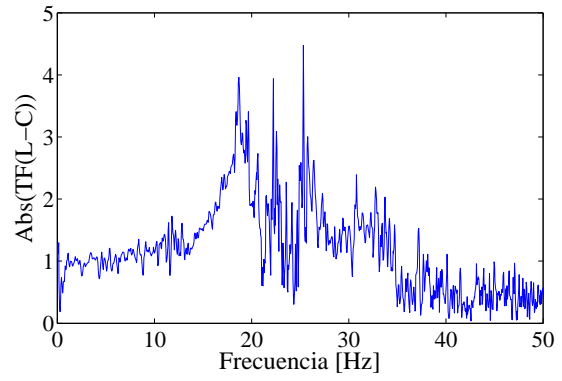


(f) FT 2000061601 (F)

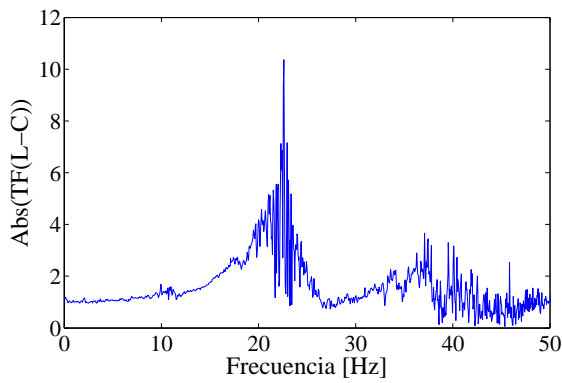
Figura 158: Valor Absoluto de Función de transferencia entre registros de aceleración horizontal de losa (L) y cuarto piso (C) para distintos eventos sísmicos



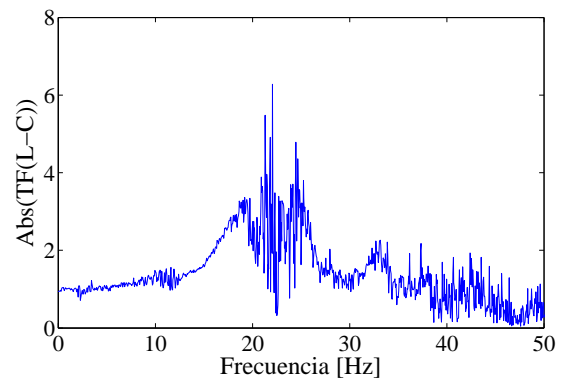
(a) FT 1998102902 (D)



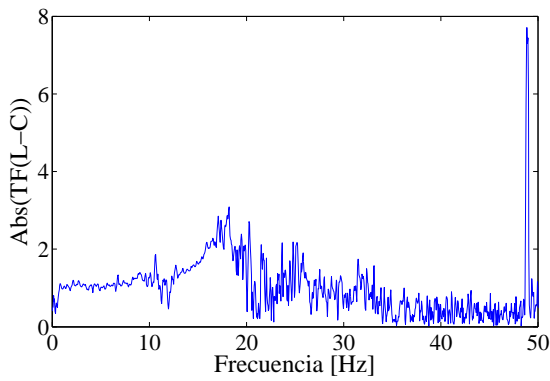
(b) FT 1999090101 (D)



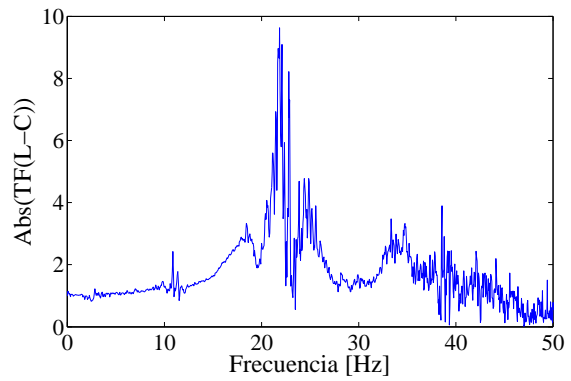
(c) FT 1996022201 (F)



(d) FT 1998072901 (F)

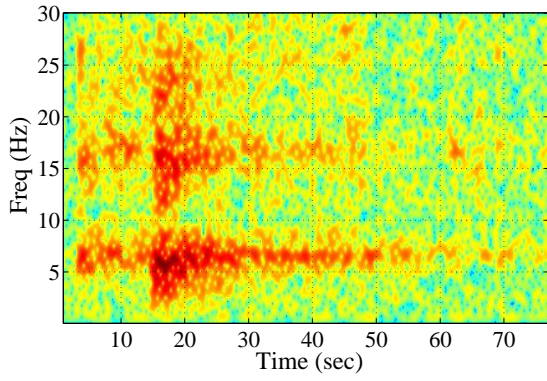


(e) FT 1999040601 (F)

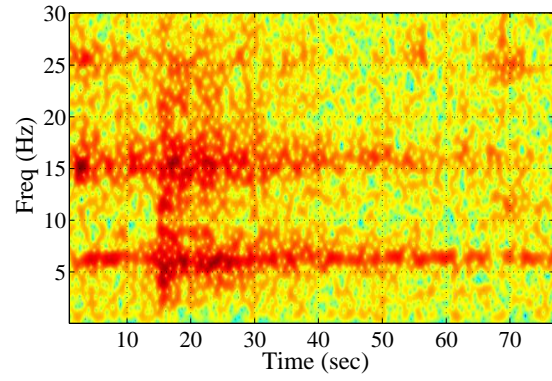


(f) FT 2000061601 (F)

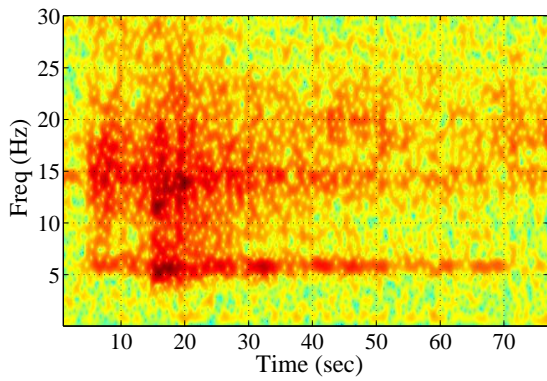
Figura 159: Valor Absoluto de Función de transferencia entre registros de aceleración vertical de losa (L) y cuarto piso (C) para distintos eventos sísmicos



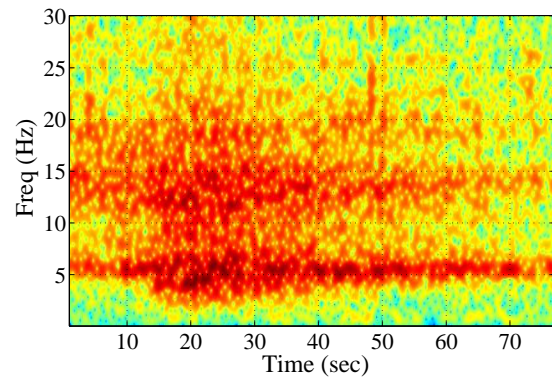
(a) Espectrograma 1994102201 C EO



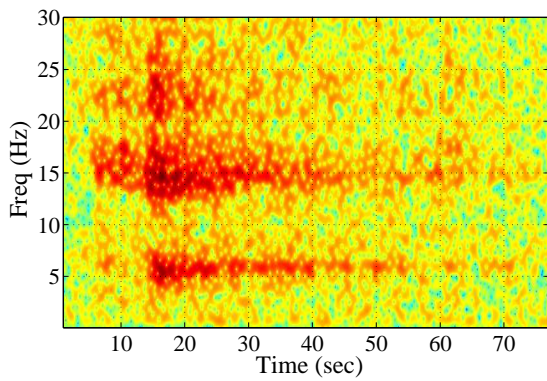
(b) Espectrograma 1995011301 C EO



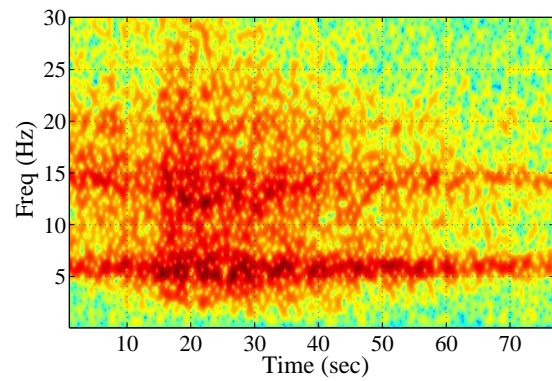
(c) Espectrograma 1995020101 C NS



(d) Espectrograma 1995040501 C NS

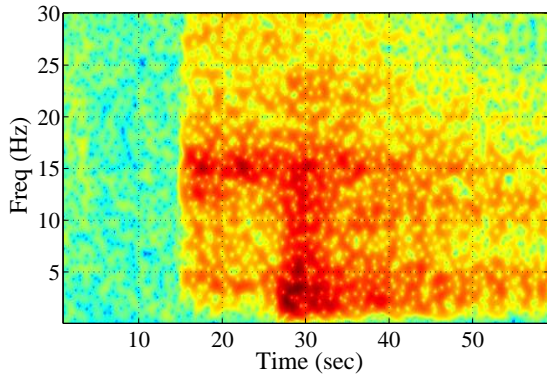


(e) Espectrograma 1995043001 L NS

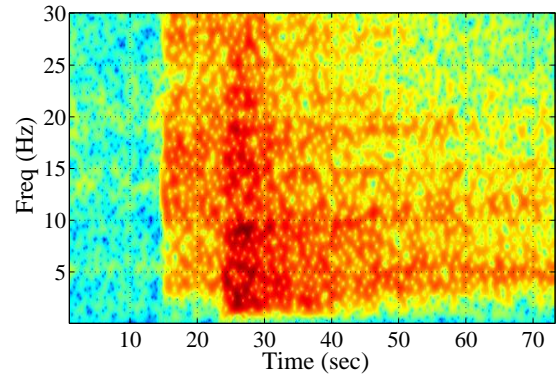


(f) Espectrograma 1995060201 C NS

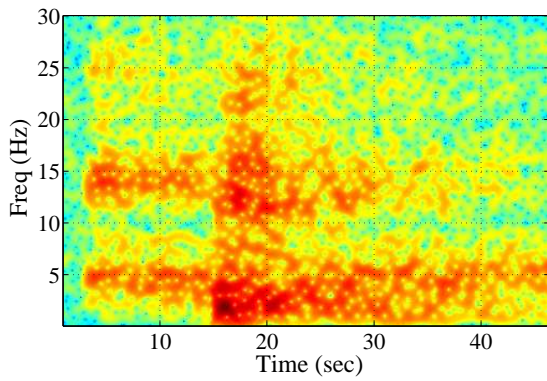
Figura 160: Espectrogramas de respuestas de aceleración relativa horizontal para eventos débiles



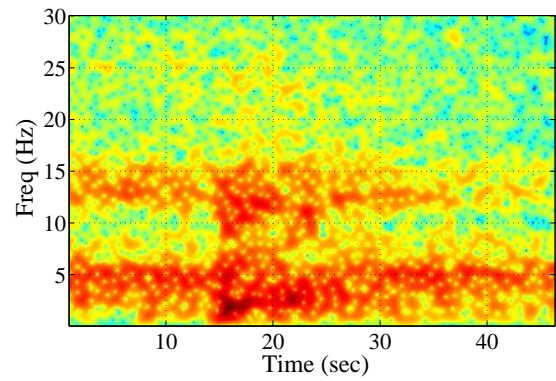
(a) Espectrograma 1996022201 L NS



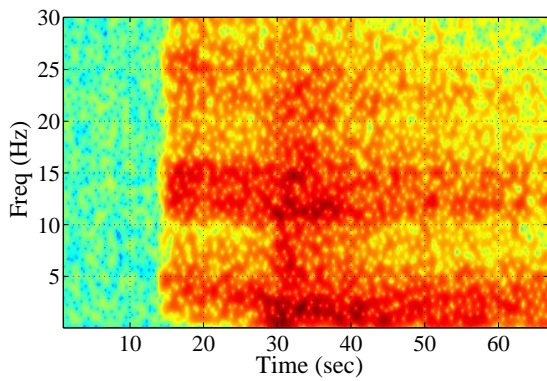
(b) Espectrograma 1997032401 C NS



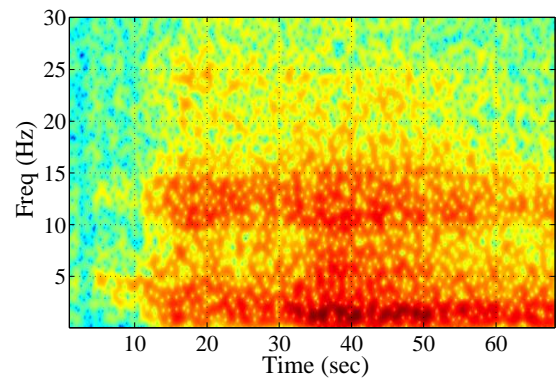
(c) Espectrograma 1997061901 C EO



(d) Espectrograma 1999040601 C EO

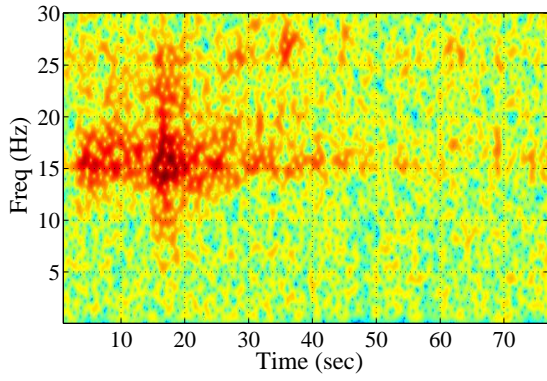


(e) Espectrograma 2000061601 C EO

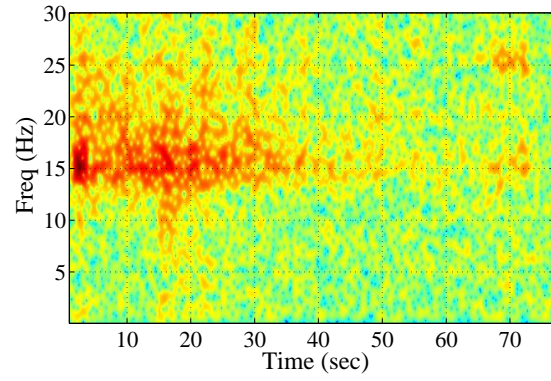


(f) Espectrograma 2010031106 C EO

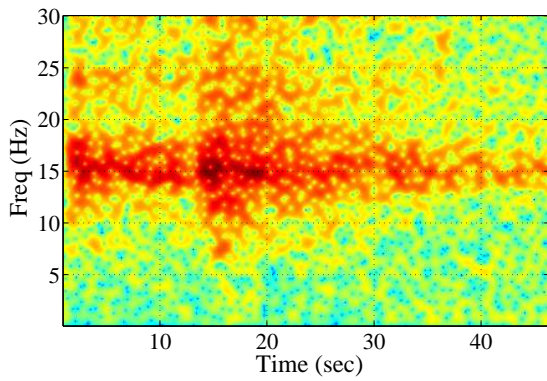
Figura 161: Espectrogramas de respuestas de aceleración relativa horizontal para eventos fuertes



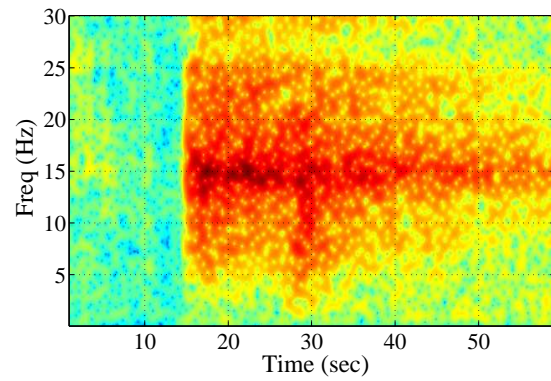
(a) Espectrograma 1994102201 C V



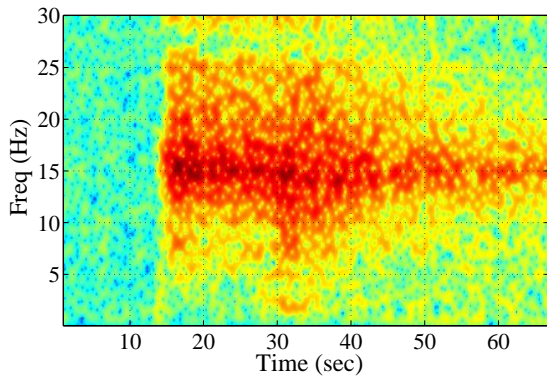
(b) Espectrograma 1995011301 C V



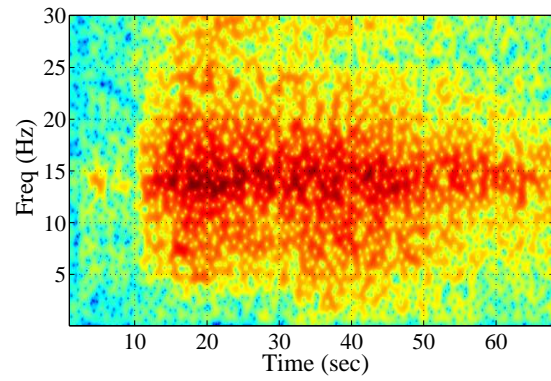
(c) Espectrograma 1998102902 C V



(d) Espectrograma 1996022201 C V



(e) Espectrograma 2000061601 L V



(f) Espectrograma 2010031106 C V

Figura 162: Espectrogramas de respuestas de aceleración relativa vertical para eventos débiles y fuertes

Comentarios

Los métodos de identificación basados en propiedades modales como FFT, MOESP y RPEM muestran resultados consistentes en la identificación de valores de frecuencia y amortiguamiento. Mientras que las formas modales quedan limitadas por el número de sensores dispuestos en la estructura, lo cual permite obtener de forma parcial una estimación para formas modales correspondientes a los dos primeros modos de la estructura en las direcciones horizontales y al modo predominante en la dirección vertical.

Los métodos de identificación online como MOESP y RPEM, permiten observar un cambio en el comportamiento de la estructura en la duración del evento sísmico asociado a la acción disipativa de los aisladores. Mientras que con la identificación no paramétrica se obtienen rangos de frecuencias predominantes en la totalidad del registro, las cuales corresponden en la mayoría de los casos a aquellas obtenidas en la fase fuerte del registro.

Las frecuencias estimadas son consistentes con los valores obtenidos para identificaciones previamente realizadas en la estructura mediante métodos no paramétricos [26][30] [31], presentando un comportamiento constante a lo largo del registro para eventos con excitación débil, y un decaimiento de la frecuencia del primer modo en la fase fuerte del registro en eventos con amplitudes mayores de excitación. Esto responde a un aumento en la no linealidad de la respuesta de la estructura debido un incremento en el nivel de desplazamientos relativos en la interfaz de aislación.

El amortiguamiento del primer modo presenta un cambio inestable, incrementando su valor con el aumento de no linealidad en el sistema, incluso para valores pequeños de excitación en la estructura, obedeciendo a un comportamiento no elástico ante bajos niveles de desplazamientos.

Finalmente, tanto los modos superiores como el comportamiento en la dirección vertical no muestran mayores cambios con el nivel de no linealidad, debido a que en el primer caso el fenómeno histerético solo afecta en mayor medida al primer modo de la estructura, por el cambio de rigidez horizontal aparente en los aisladores.

Mientras que en el segundo caso, el comportamiento estacionario de las propiedades modales obedece a una respuesta predominantemente lineal en esta dirección, debido a la gran rigidez axial de los aisladores, presentando al mismo tiempo una estimación de valores menos variables para el amortiguamiento en comparación a las estimaciones de este parámetro en la dirección horizontal.

5.3.4. Edificio Aislado Comunidad Andalucía - Identificación mediante Filtro de Partículas (PF)

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos mediante el algoritmo del Filtro de Partículas utilizando los registros sísmicos del edificio aislado de la Comunidad Andalucía. El modelo en el cual se basa la estimación corresponde al modelo MCAEA (Figura 163), el cual posee la geometría y propiedades de materiales asignadas a la superestructura basado en un ajuste de las propiedades modales del edificio convencional, detalladas en el Capítulo II.

Las posiciones utilizadas para obtener la respuesta numérica del modelo corresponden a los nodos 89 y 104, los que se encuentran en la losa del primer piso (en el contacto con la interfaz de aislación) y en el cuarto piso respectivamente, en posiciones análogas a la ubicación de los acelerómetros dispuestos en la estructura.

Las observaciones a utilizar en el procedimiento de identificación corresponden a los registros de aceleración traslacional del suelo y de la estructura en las posiciones anteriormente mencionadas.

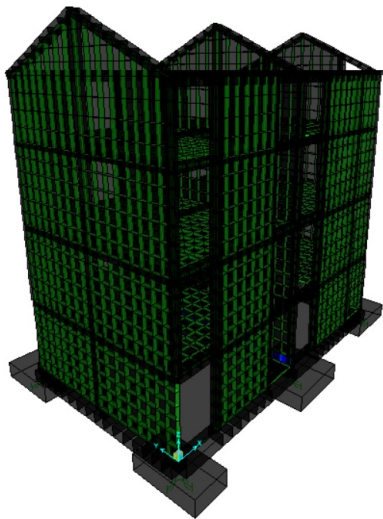


Figura 163: Modelo asumido para identificación del edificio aislado Comunidad Andalucía mediante PF

Los resultados obtenidos mediante este algoritmo consideran 2 tipos de función de verosimilitud. La primera consiste en una función gamma $\Gamma(N,L)$ utilizada en el estudio analítico, mientras que el segundo caso considera una verosimilitud sigmoideal, dependiente de la mejor estimación en la muestra.

Este último enfoque consiste en estricto rigor en un algoritmo de aprendizaje basado en el procedimiento del Filtro de Partículas, el cual sólo busca la convergencia al mejor candidato a solución del sistema, teniendo en cuenta las limitaciones del modelo numérico en la simulación de la respuesta real de la estructura, acorde a lo detallado en la sección 4.6.3. Esto no hace posible garantizar la convergencia a una solución debido a que con la inclusión de una función arbitraria de verosimilitud, el sistema pierde las propiedades Markovianas que permiten asegurar dicha condición, ya que el procedimiento de identificación pasa a ser “alterado” por el usuario de forma de “favorecer” la búsqueda de la solución.

El algoritmo asume que la perturbación en la respuesta corresponde a un proceso de ruido blanco gaussiano de media nula y varianza conocida σ_{obs} , la cual se define a partir de los tramos iniciales y finales de los registros, donde solo se observan mediciones de aceleración correspondientes a ruido instrumental como se indica en la Figura 164. Los valores de las varianzas de cada registro utilizado en la identificación de los eventos sísmicos mostrados se detallan en el Anexo E.

Los resultados mostrados corresponden a la identificación con $N_p = 200-1000$ partículas, definiendo el espacio de búsqueda entre los valores límites detallados en la Tabla 41. Para lograr una mejor representación del comportamiento de la estructura, se estudian dos tipos de modelos histerético: de Bouc-Wen y el Biaxial (acoplado entre direcciones ortogonales, asignando la propiedad “Rubber”) en los elementos Links del modelo numérico, por lo que los parámetros a identificar consisten en la rigidez inicial k_i , razón de rigideces α , el esfuerzo de fluencia F_y y el exponente de transición n.

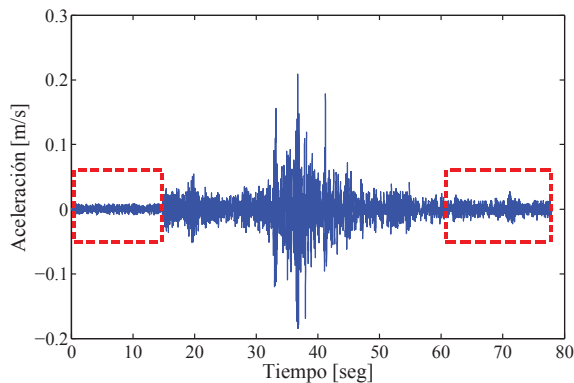


Figura 164: Elección de tramos para calcular varianza de observación

Tabla 41: Rangos de búsqueda de parámetros para identificación de edificio aislado mediante PF

Modelo			
MSBA acoplado $N_p = 200-1000$			
Param.	inf	sup	ϵ_{cap}
k_0	8000	14000	1000-3000
α	0.01	0.1	0.005-0.01
F_y	0.01	2	0.05-0.1
n	0.1	3	0.5

5.3.4.1 Identificación con Función de verosimilitud gama (Filtro de Partículas)

Las Figuras 165a-e muestran los valores de MSE obtenidos para las partículas junto con la función de verosimilitud $\Gamma(N,L)$. Todos los intentos de abordar la identificación del edificio aislado mediante el Filtro de Partículas, no otorgan una solución basada en el modelo MCAEA, presentando $MSE \sim 10^2 - 10^4$, muy alejados de la vecindad de los valores con alta verosimilitud ($L = 4$). Lo anterior es consistente con los siguientes puntos:

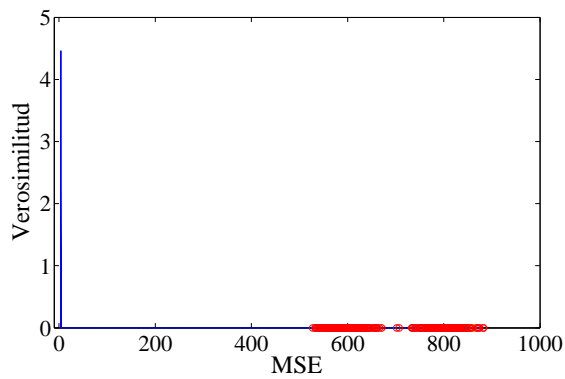
- La cantidad de datos del que se compone cada registro ($N > 4000$) produce una función de verosimilitud muy aguda, mientras que el bajo nivel de ruido de observación en gran parte de las señales obliga a que el modelo numérico evaluado en las partículas candidatas, deba representar de una forma muy precisa la respuesta real del sistema

- Dicha condición se ve limitada por las características propias del modelo de elementos finitos MCAEA, el que si bien incluye las características geométricas y de material del edificio, no es capaz de simular respuestas similares a las medidas en terreno en las direcciones horizontales, las cuales son utilizadas como observación sin considerar la respuesta vertical (ya que el comportamiento lineal en esta dirección se encuentra mayormente calibrado)

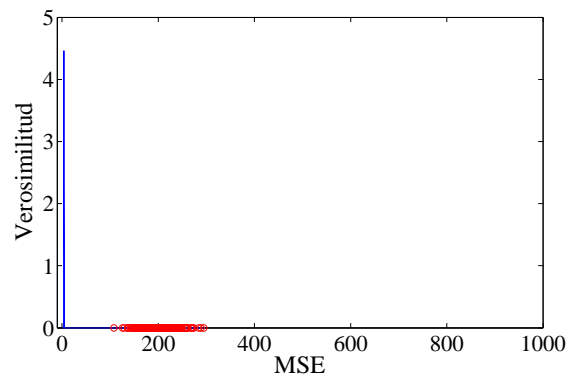
- Al la vez, la limitación en la capacidad de simulación de la respuesta puede asociarse al tipo de modelo histerético escogido para representar el comportamiento no lineal de la estructura, simplificado como un modelo controlado por solo dos valores de rigideces. Como se observa en el estudio analítico, esta condición no permite simular la transición continua del primer modo de vibrar con el nivel de excitación aplicado, por lo que un mayor número de grados de libertad del modelo histerético (o equivalentemente un aumento en la complejidad y/o cantidad de parámetros a identificar), puede ser necesario para mejorar el desempeño en la simulación de la respuesta no lineal del sistema.

Debido a los puntos expuestos es que una mejor calibración y mejora de condiciones de entrada del algoritmo deben llevarse a cabo, puesto que el modelo en el cual se basa la estimación no presenta la capacidad de simulación de la respuesta dinámica en las direcciones horizontales de la estructura.

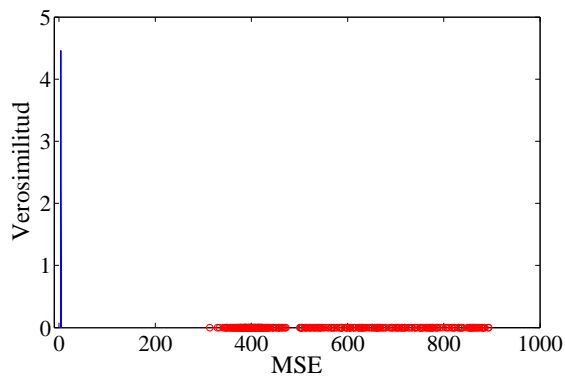
Por lo tanto el algoritmo de Filtro de Partículas, no resulta aplicable para la identificación de la estructura aislada en estudio, principalmente debido a las limitaciones que presenta este último en la simulación de la respuesta de la estructura, generando diferencias considerables entre la respuesta asociada a cada muestra en el conjunto de partículas y la observación del edificio aislado.



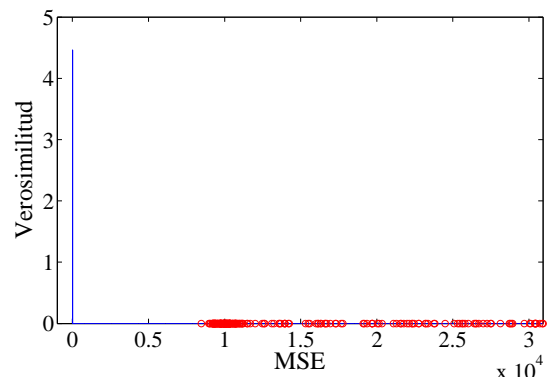
(a) Evento 1994102201 (D)



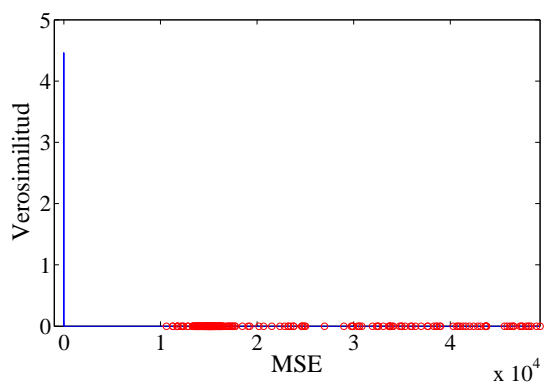
(b) Evento 1995011301 (D)



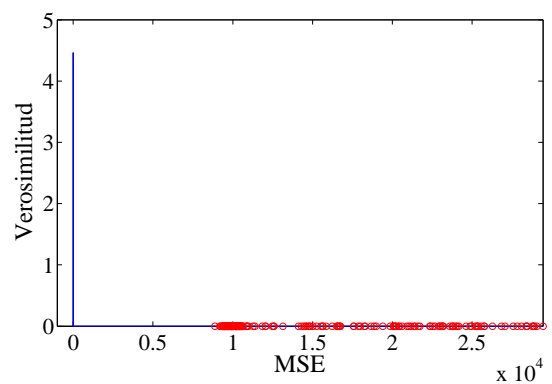
(c) Evento 1995043001 (D)



(d) Evento 1996022201 (F)



(e) Evento 1997032401 (F)



(f) Evento 1997061901 (F)

Figura 165: Valores de MSE para conjunto de partículas muestreadas en distintos eventos sísmicos para identificación mediante Filtro de Partículas de edificio aislado

5.3.4.2 Identificación con Función de verosimilitud sigmoial

La presente sección muestra los resultados de la aplicación del algoritmo de aprendizaje, basado en el Filtro de Partículas, asumiendo una función de verosimilitud sigmoial. En la Figura 133c-d se observó que la fuerza restitutiva aproximada para eventos débiles puede representar un punto o un tramo del comportamiento inicial (pre-fluencia) exhibido en la respuesta histerética del sistema ante un evento con excitación mayor.

Con el objetivo de obtener los parámetros de un modelo único que permita capturar el comportamiento no estacionario de la respuesta del sistema ante distintos regimenes de excitación, se utiliza como set de entrenamiento, las observaciones provenientes de un evento sísmico clasificado en el grupo de excitación fuerte (ya que en este se presenta una respuesta asociada al tramo post-fluencia), el cual consiste en el evento 1996022201.

Utilizando los datos de dicho evento se llevan a cabo dos tipos de identificaciones para el sistema en estudio. La primera consiste en el uso de la respuesta de aceleración relativa en toda la duración del evento sísmico, cuyos resultados se muestran en las Figuras 166-170. Esta exhibe una muy buena estimación durante la fase fuerte de la respuesta de la estructura, en desmedro de la estimación en la fase débil, donde el modelo identificado no permite capturar el modo de 15 Hz predominante para el régimen débil de respuesta en la dirección NS y a nivel de la losa del primer piso en la dirección EO.

Por otra parte, las Figuras 171-172 muestra la identificación de un segundo set de parámetros para el mismo evento, haciendo uso solo de la fase débil de la respuesta del sistema como observación. Las distintas estimaciones hechas para esta fase exhiben un alto nivel de variabilidad para el esfuerzo de fluencia F_y estimado, donde los valores mayores $F_y \sim 0.2$ [Tonf] permiten identificar un comportamiento que incorpora en mayor medida el modo de 15 Hz que no se puede capturar con el primer set de parámetros, pero presentando una menor precisión en el ajuste de la fase fuerte, al no capturar de forma adecuada el cambio del primer modo de vibración horizontal. Aún así, los parámetros que mejor ajustan el conjunto de respuestas utilizadas como observación muestran ser del orden de los obtenidos utilizando la respuesta completa del sistema.

Ante estos resultados, se infiere que el modelo histerético asumido no permite representar el comportamiento bimodal del sistema de forma apropiada, quedando sujeto a distintos desempeños en la estimación de la respuesta dependiendo de la fase considerada para llevar a cabo la identificación del sistema, presentando mayores dificultades para abordar el ajuste de las respuestas en la fase débil del excitación aplicada al sistema.

• Identificación con Respuesta Completa de Evento: 1996022201

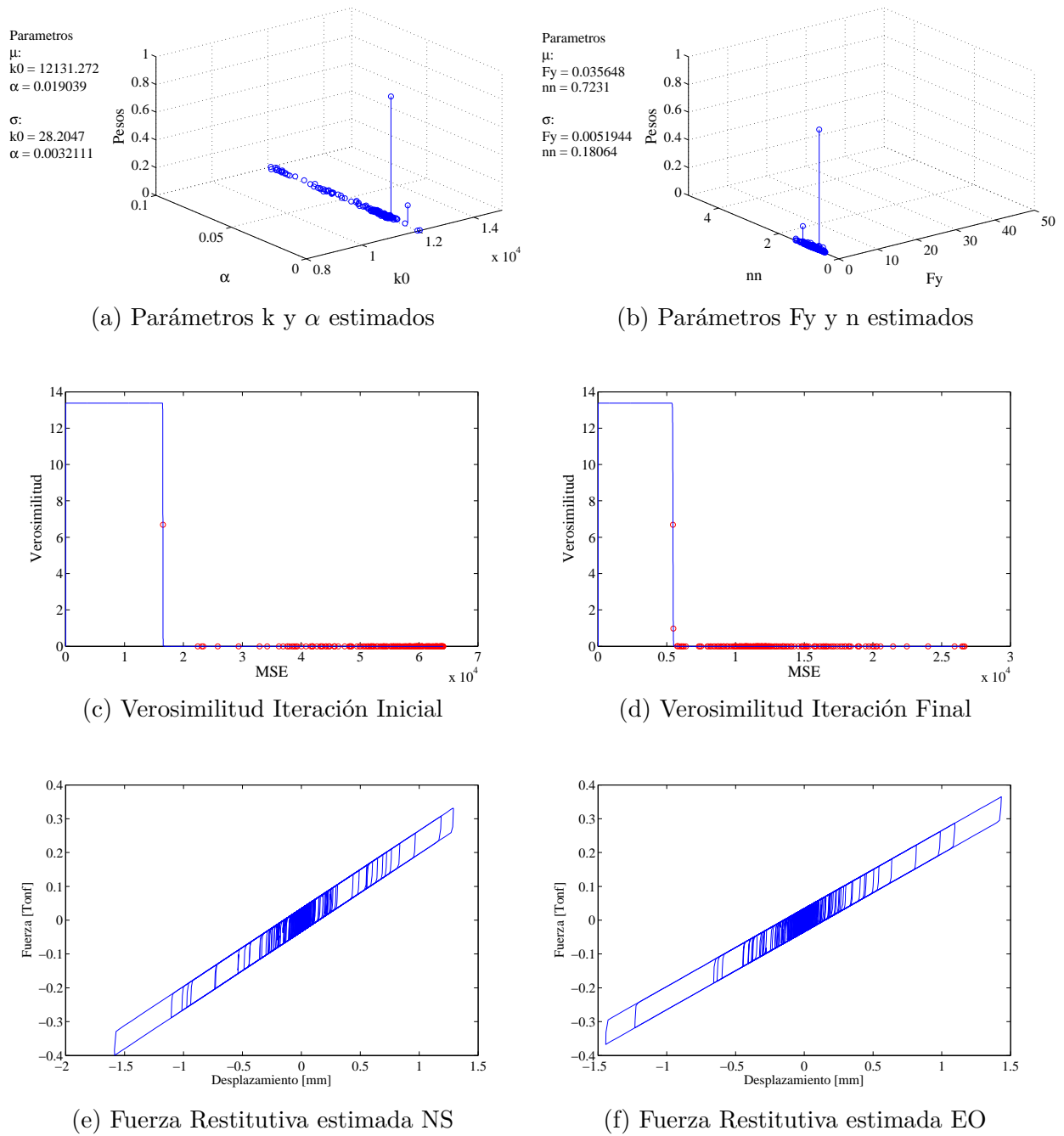
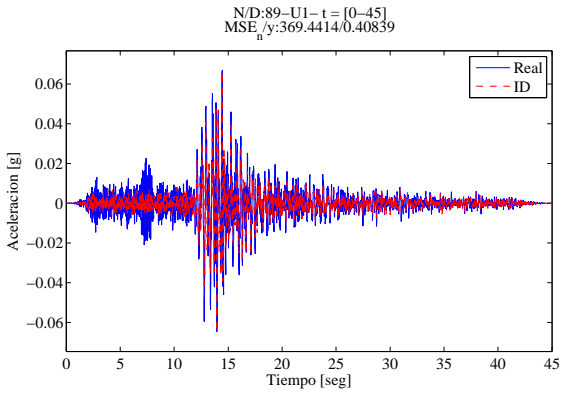
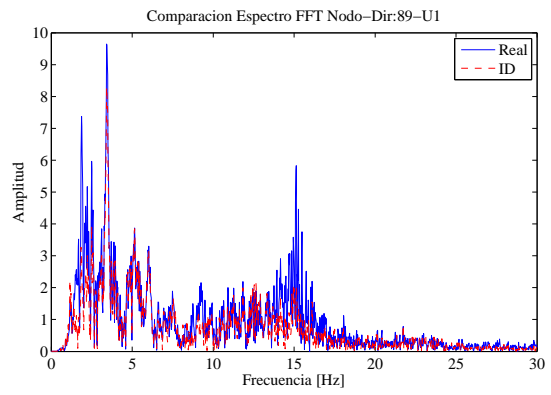


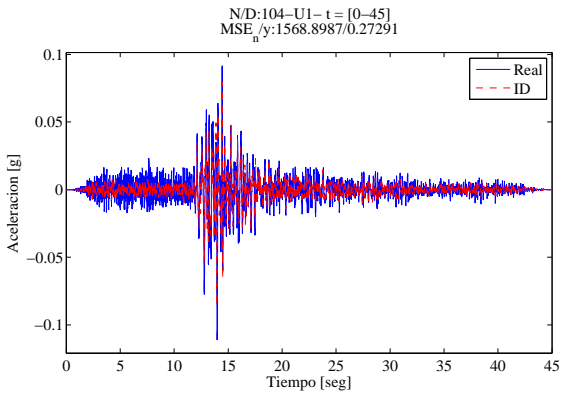
Figura 166: Parámetros y respuestas histeréticas estimadas en Evento 1996022201 utilizando respuesta Completa $t = [0-45]$ [seg]



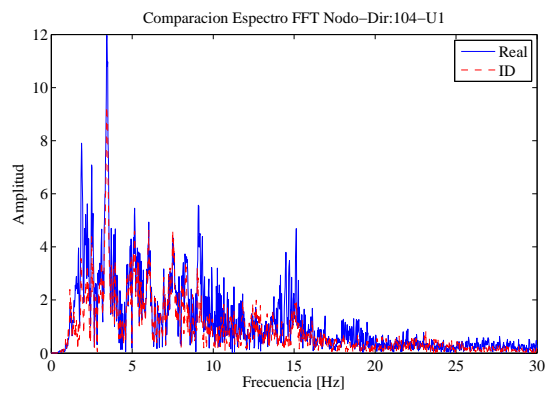
(a) Aceleración Losa NS



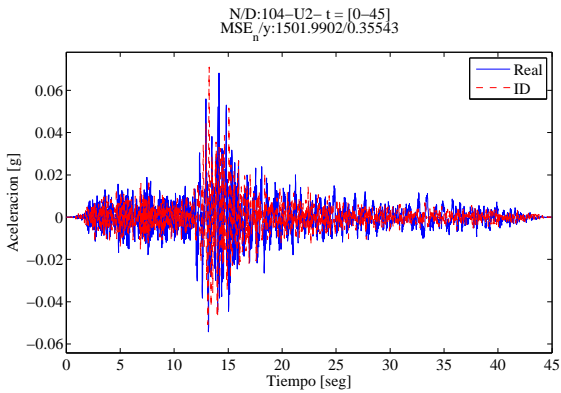
(b) Espectro de frecuencia Losa NS



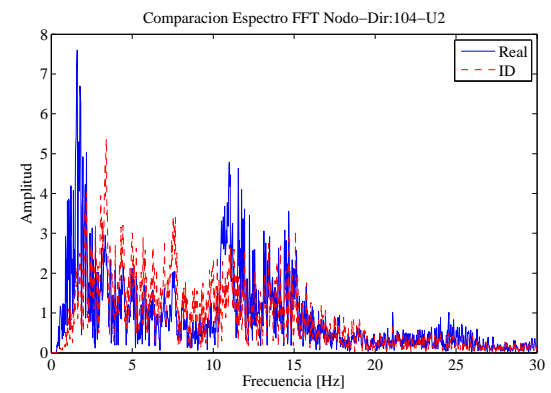
(c) Aceleración Cuarto Piso NS



(d) Espectro de frecuencia Cuarto Piso NS



(e) Aceleración Cuarto Piso EO



(f) Espectro de frecuencia Cuarto Piso EO

Figura 167: Respuestas de aceleración estimadas en el tiempo y en frecuencia para el Evento 1996022201 utilizando respuesta completa $t = [0-45]$ [seg]

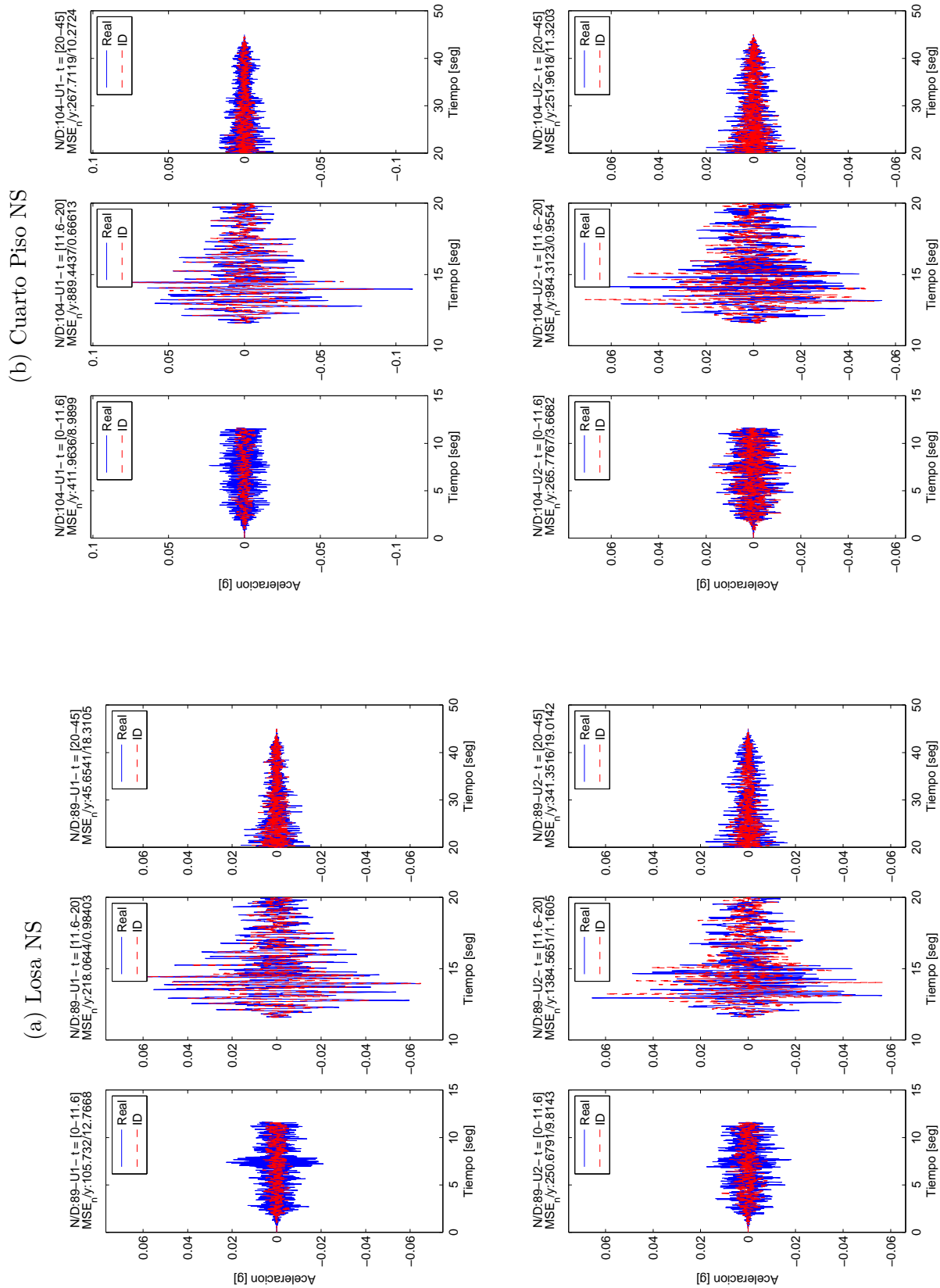
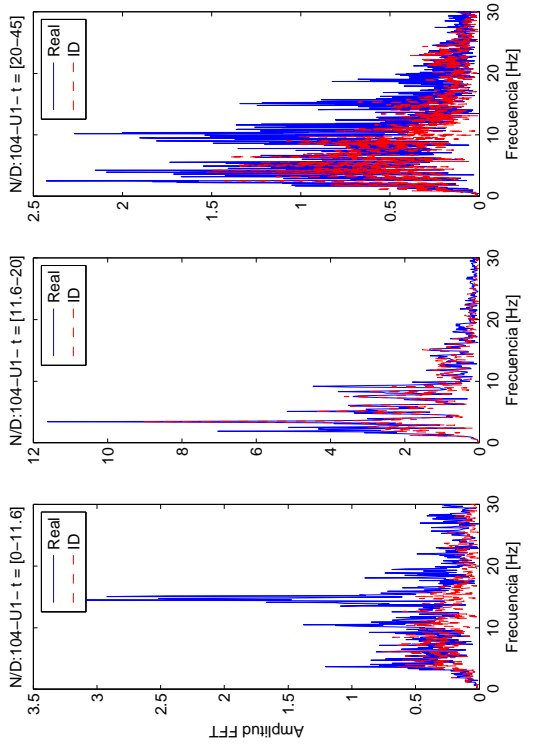
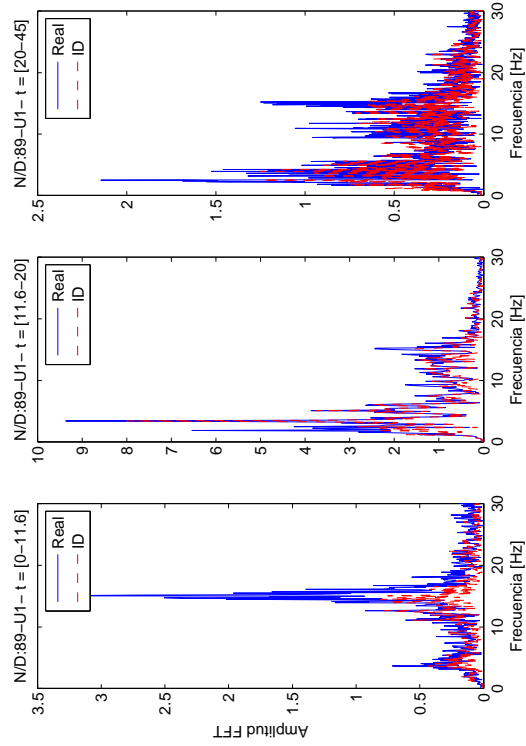


Figura 168: Estimaciones de respuestas de aceleración en el tiempo por fases para Evento 1996022201

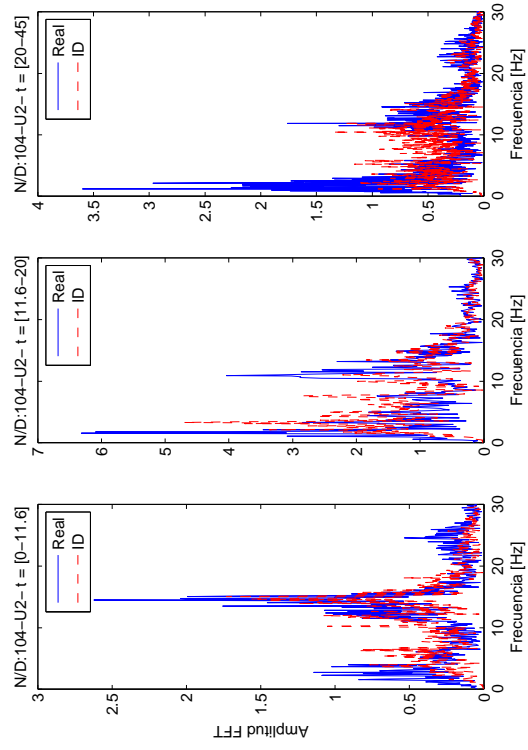
(b) Cuarto Piso NS



(a) Losa NS



(d) Cuarto Piso EO



(c) Losa EO

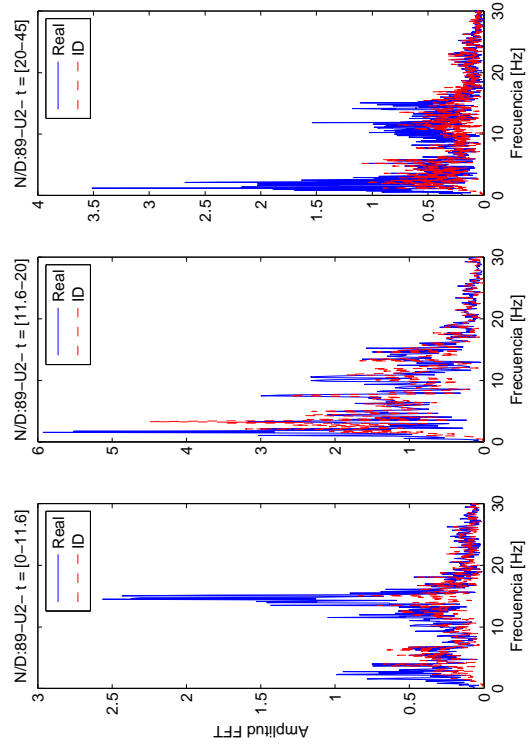
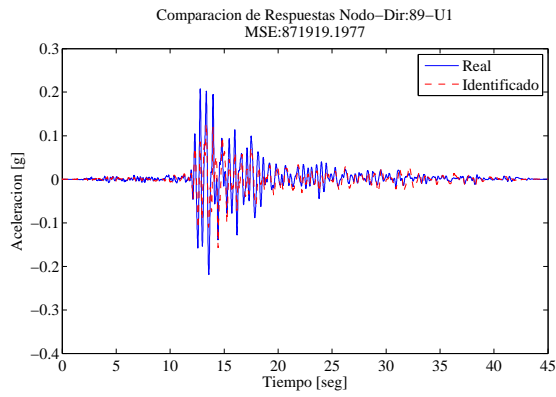
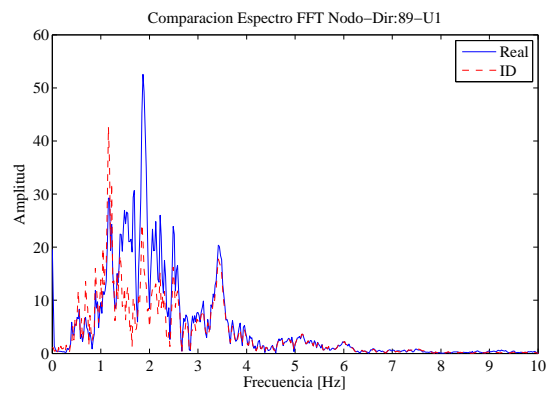


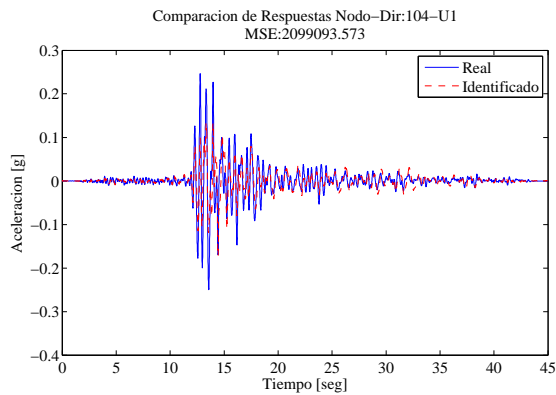
Figura 169: Estimación de espectros de frecuencias por fases en Evento 1996022201



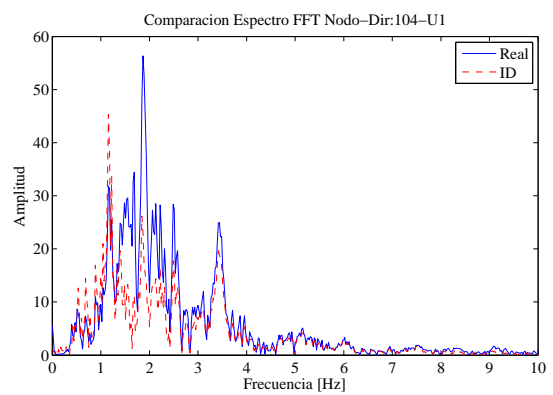
(a) Desplazamiento Losa NS



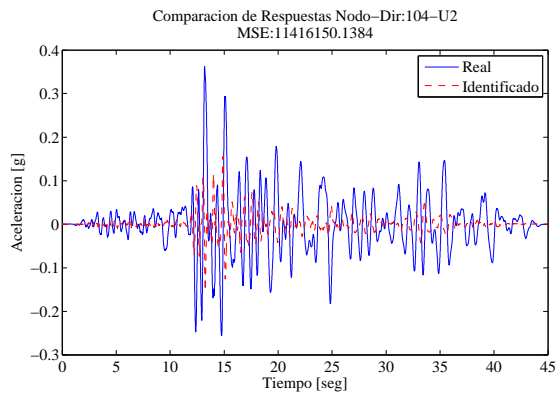
(b) Espectro de frecuencia Losa NS



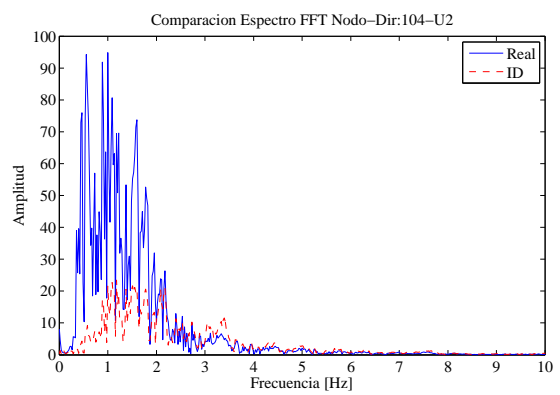
(c) Desplazamiento Cuarto Piso NS



(d) Espectro de frecuencia Cuarto Piso NS



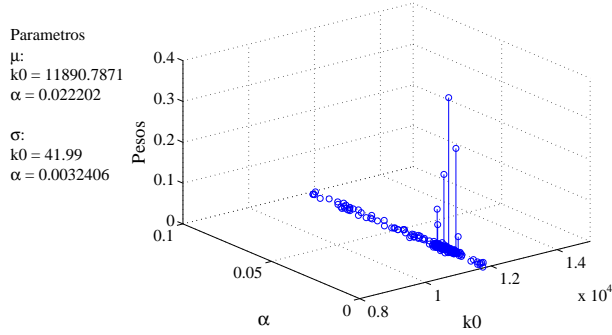
(e) Desplazamiento Cuarto Piso EO



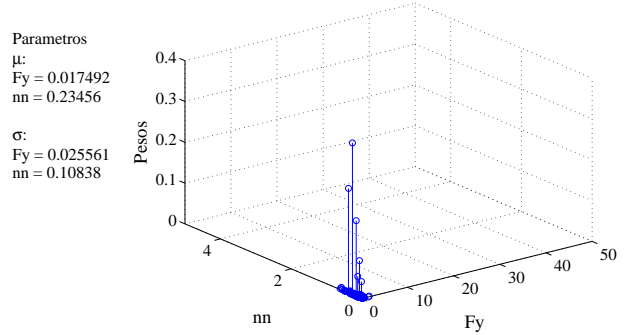
(f) Espectro de frecuencia Cuarto Piso EO

Figura 170: Respuestas de desplazamiento estimadas en el tiempo y en frecuencia para el Evento 1996022201 utilizando respuesta completa $t = [0-45]$ [seg]

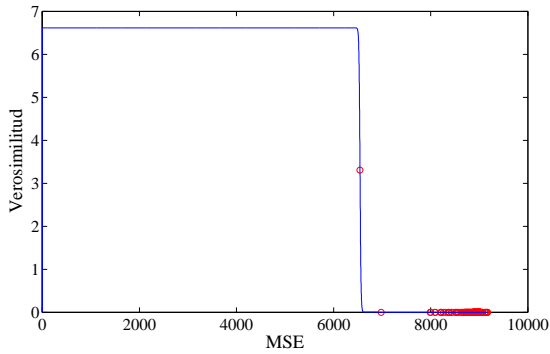
• Identificación con Fase Débil de Evento: 1996022201



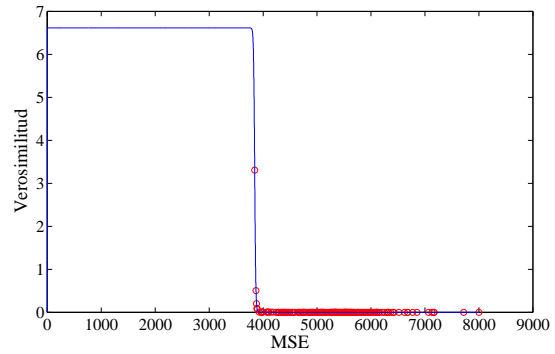
(a) Parámetros k y α estimados



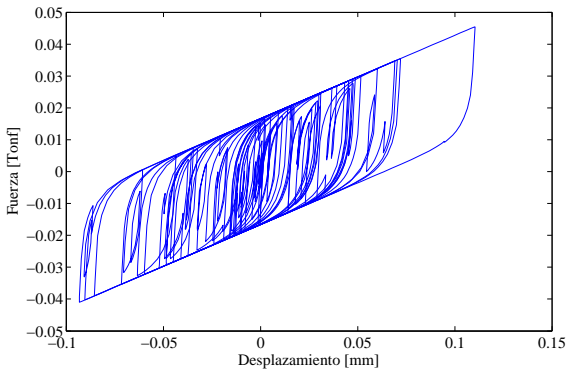
(b) Parámetros Fy y n estimados



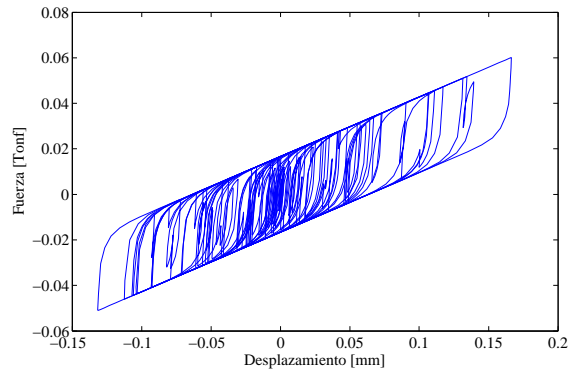
(c) Verosimilitud Iteración Inicial



(d) Verosimilitud Iteración Final

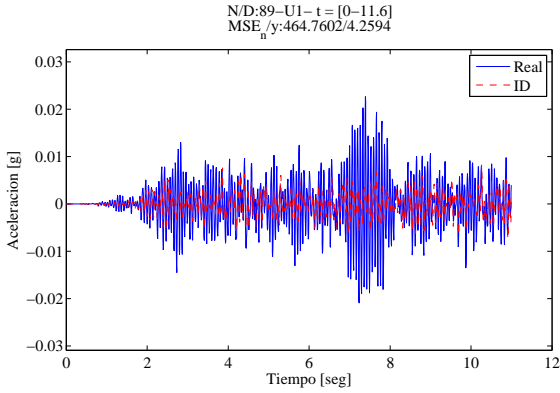


(e) Fuerza Restitutiva estimada NS

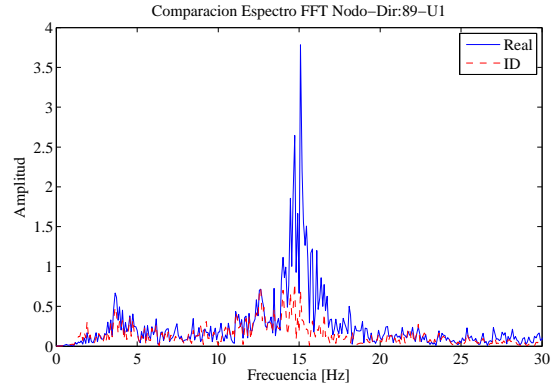


(f) Fuerza Restitutiva estimada EO

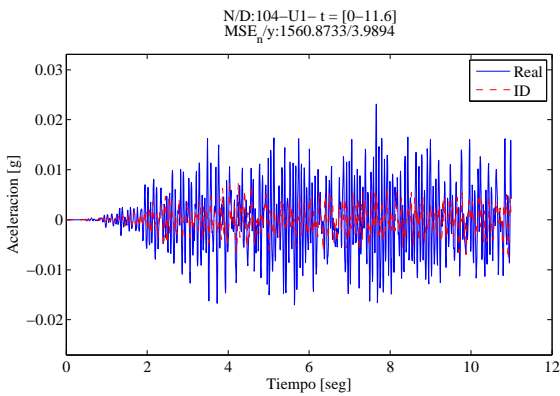
Figura 171: Parámetros y respuestas histeréticas estimadas en Evento 1996022201 utilizando respuesta en Fase Débil $t = [0 - 11.6]$ [seg]



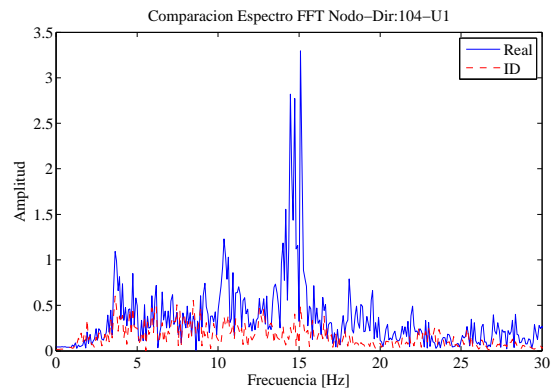
(a) Aceleración Losa NS



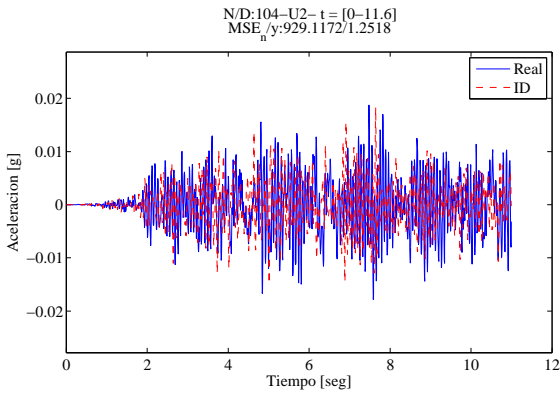
(b) Espectro de frecuencia Losa NS



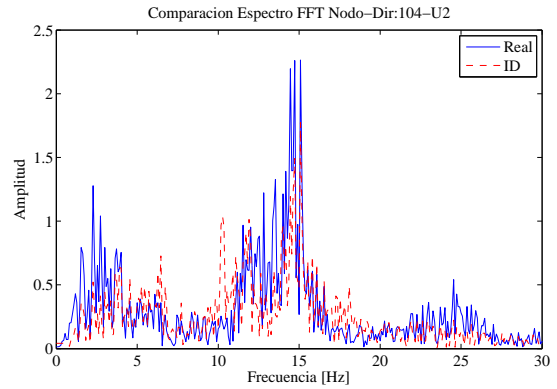
(c) Aceleración Cuarto Piso NS



(d) Espectro de frecuencia Cuarto Piso NS



(e) Aceleración Cuarto Piso EO



(f) Espectro de frecuencia Cuarto Piso EO

Figura 172: Respuestas de aceleración estimadas en el tiempo y en frecuencia para el Evento 1996022201 utilizando respuesta en Fase Débil $t = [0 - 11.6]$ [seg]

Complementariamente la Figura 170 muestra las estimaciones de respuestas de desplazamiento y espectros de frecuencia del registro en intervalos de tiempo predefinidos, permitiendo observar las fases en las cuales se produce la mayor discrepancia en el ajuste de las observaciones tanto en el espacio del tiempo como de las frecuencias.

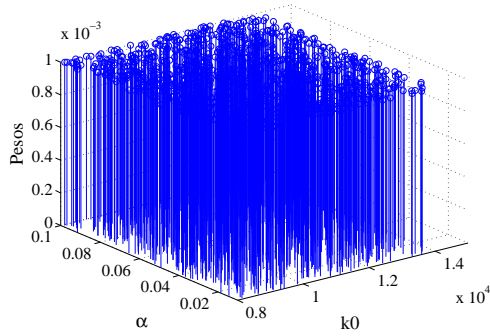
De estos se obtiene que los parámetros estimados permiten ajustar de buena manera el primer modo de los espectros de frecuencia de la respuesta de desplazamiento en la dirección NS, pero no permite realizar ajustes precisos para la dirección EO, presentando un contenido en frecuencia un tanto mayor al exhibido por la respuesta real del sistema. Esto resulta consistente con los resultados obtenidos para las respuestas de aceleración, donde en la dirección NS se obtienen buenos ajustes del contenido en frecuencia de la respuesta para rangos de frecuencias menores a 10 Hz. Por otro lado, la respuesta en el cuarto piso de la dirección EO exhibe una buena estimación del modo de 15 Hz en las fases débiles, no pudiendo capturar tan efectivamente como en las otras direcciones el comportamiento del primer modo horizontal, presentando un contenido en frecuencia siempre superior al que exhibe el espectro de la respuesta real.

Las Figuras 173-178 muestran los resultados obtenidos para eventos de distinto nivel de excitación, los cuales se resumen en la Tabla ???. En estos se observan valores variables para los parámetros acorde al set de observaciones utilizadas para un evento sísmico particular. Sin embargo, se obtienen dos rangos de valores recurrentes para las estimaciones de la rigidez inicial, correspondiendo a los intervalos $k_i \in [8500 - 1000]$ y $k_i \in [12000 - 13000]$. Mientras que para el resto de los parámetros se obtuvieron valores comprendidos entre $\alpha \in [0.019 - 0.05]$, $F_y \in [0.0007 - 0.2]$ y $n \in [0.5 - 2]$

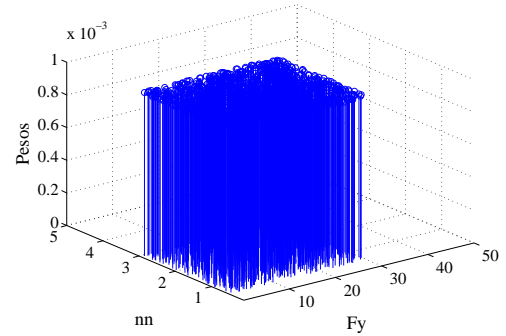
Cabe notar que los eventos con excitación débil, muestran valores de MSE cercanos a ~ 100 para las mejores estimaciones dentro de la muestra de partículas, exhibiendo un grado no menor de error en la estimación de las respuestas de la estructura. Por otra parte, los eventos de excitación fuerte alcanzan mayores valores, cercanos a $\text{MSE} \sim 4000$ para la mejor estimación. Esto indica que en la medida en que la no linealidad de la respuesta es mayor, el modelo posee una menor capacidad de ajustar el conjunto de respuestas de aceleración de la estructura, particularmente en la fase débil, lo que da cuenta de la baja capacidad del modelo para capturar el comportamiento no lineal de la estructura entre fases.

Finalmente en la Figura 179 se muestran las curvas de histéresis predichas por el modelo para distintas soluciones obtenidas, presentándose tanto formas histeréticas consistentes con lo esperado, como otras en las cuales la rigidez post-fluencia es predominante en la respuesta, lo que permite ajustar de mejor manera la fase fuerte de las respuestas sísmicas para los eventos de mayor excitación, pero sin poder capturar el comportamiento bimodal del sistema.

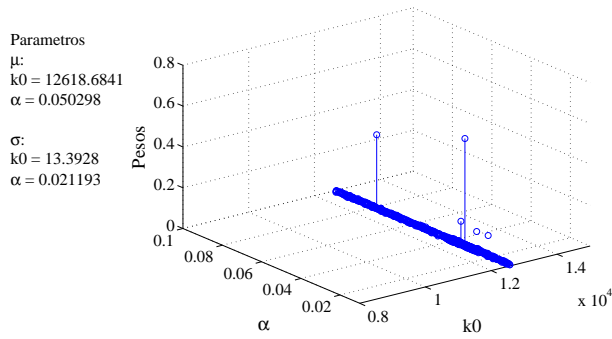
• Filtro de Partículas Evento Débil 1: 1994102201



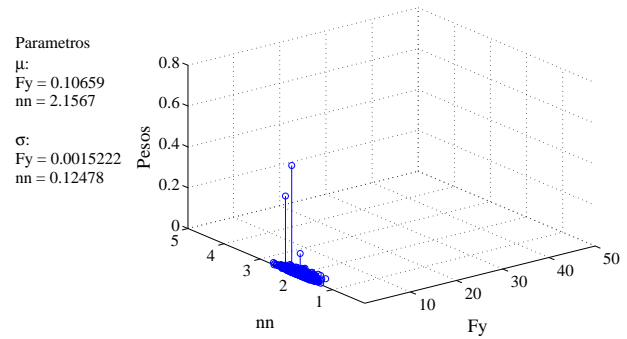
(a) Parámetros k y α Iteración 1



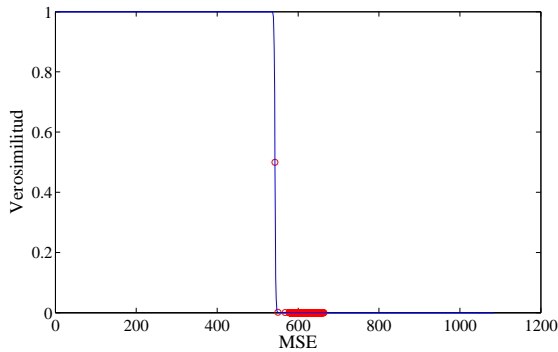
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



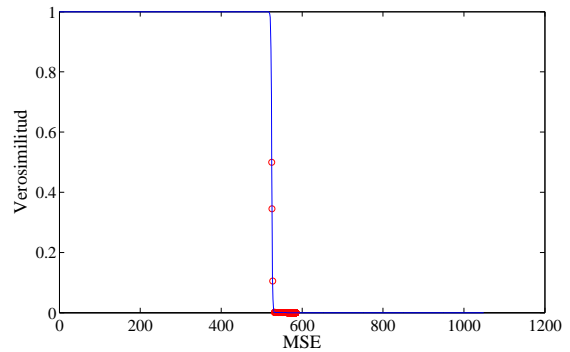
(c) Parámetros k y α Iteración 3



(d) Parámetros F_y y n Iteración 3



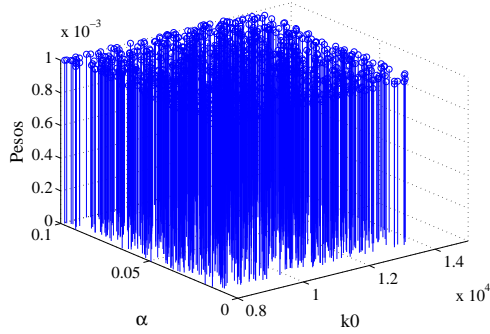
(e) Verosimilitudes Iteración 2



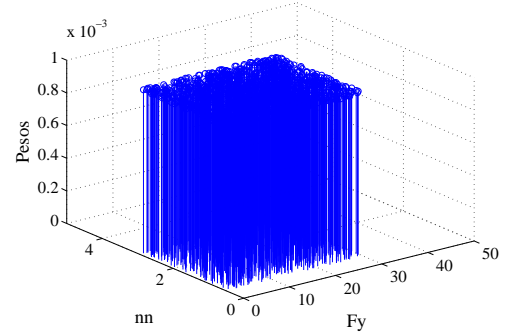
(f) Verosimilitudes Iteración 3

Figura 173: Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1994102201

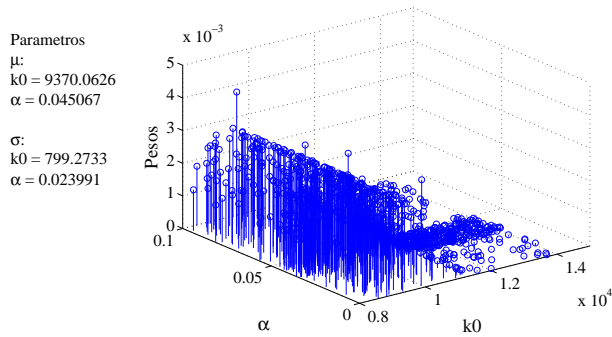
• Filtro de Partículas Evento Débil 2: 1995011301



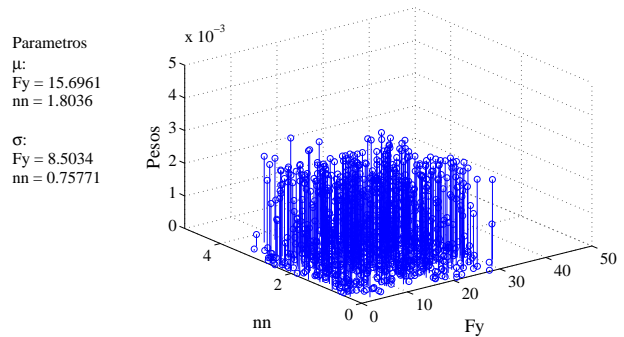
(a) Parámetros k y α Iteración 1



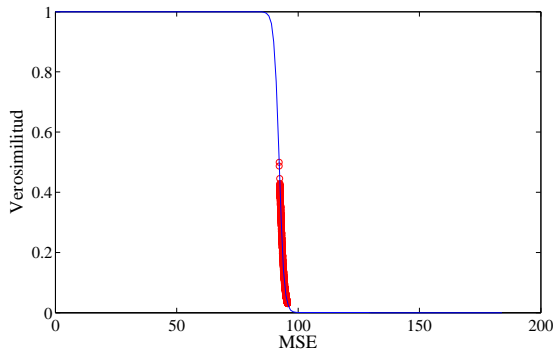
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



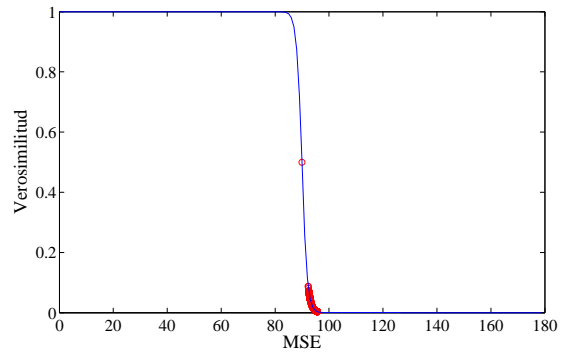
(c) Parámetros k y α Iteración 3



(d) Parámetros F_y y n Iteración 3



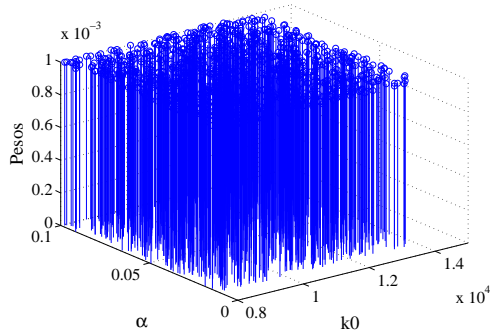
(e) Verosimilitudes Iteración 2



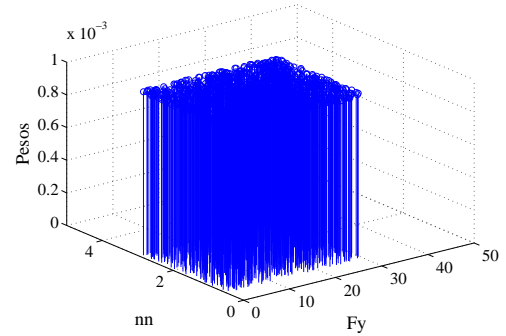
(f) Verosimilitudes Iteración 3

Figura 174: Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1995011301

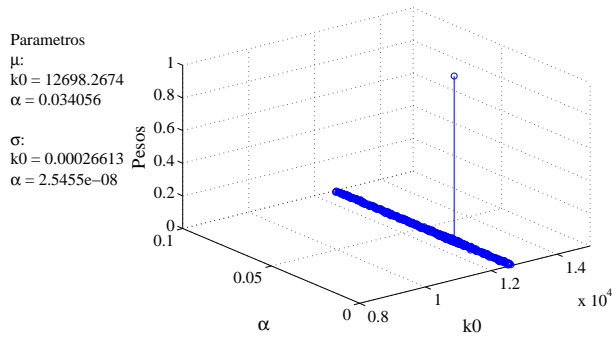
• Filtro de Partículas Evento Débil 3: 1995043001



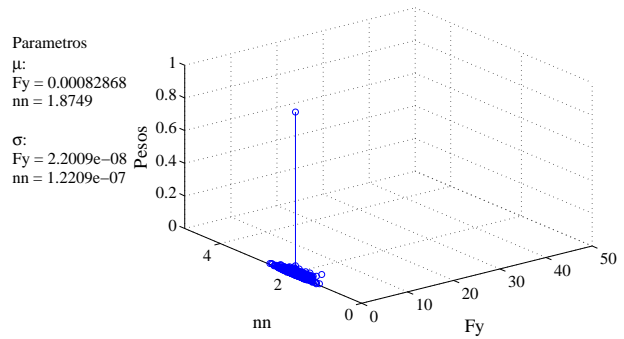
(a) Parámetros k y α Iteración 1



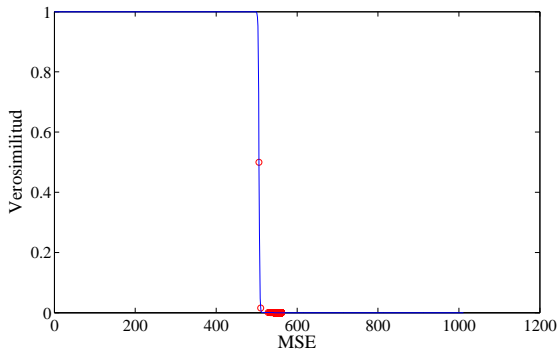
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



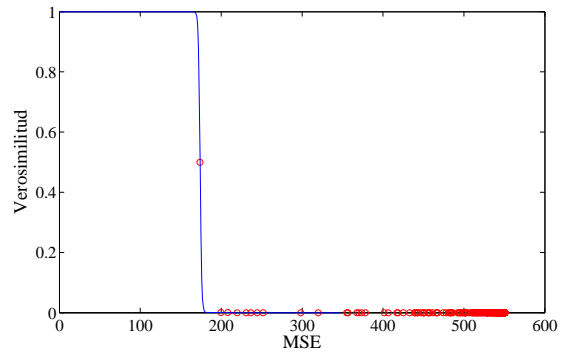
(c) Parámetros k y α Iteración 4



(d) Parámetros F_y y n Iteración 4



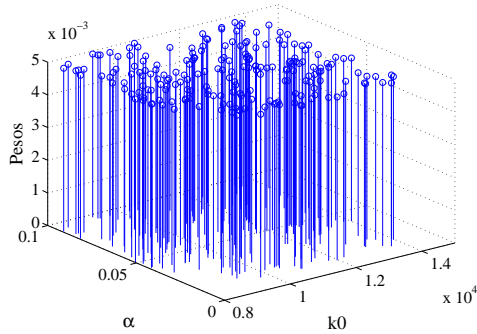
(e) Parámetros k y α Iteración 2



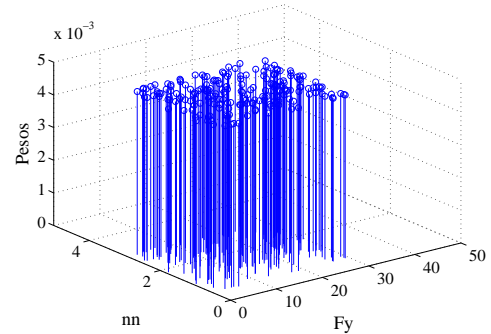
(f) Parámetros F_y y n Iteración 4

Figura 175: Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1995043001

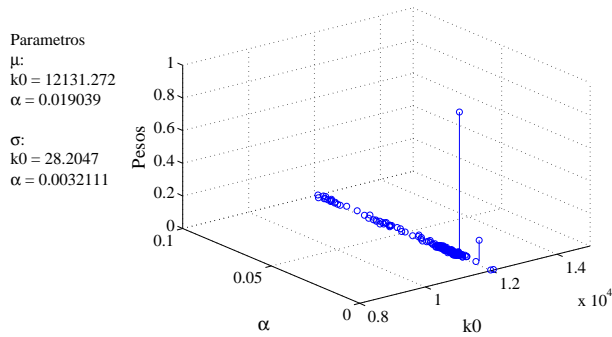
• Filtro de Partículas Evento Fuerte 1: 1996022201



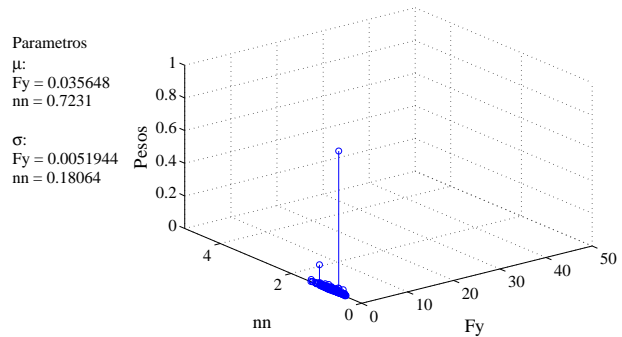
(a) Parámetros k y α Iteración 1



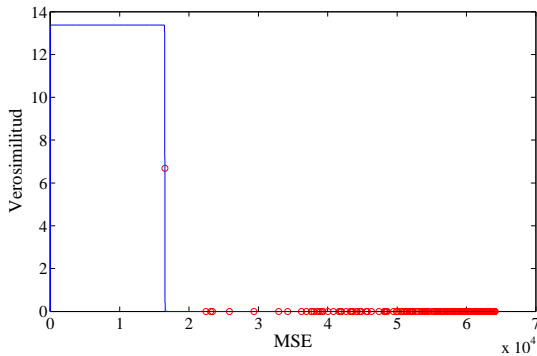
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



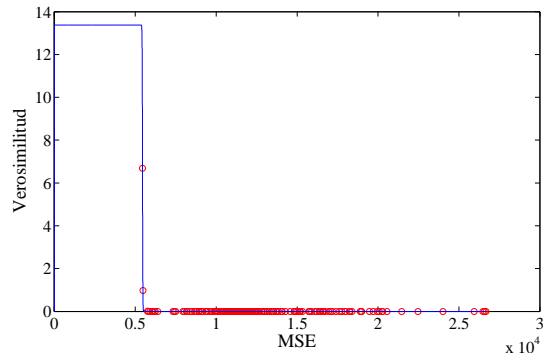
(c) Parámetros k y α Iteración 6



(d) Parámetros F_y y n Iteración 6



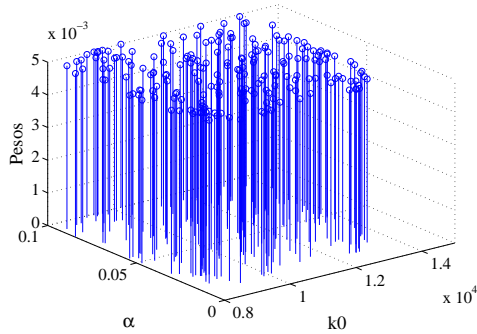
(e) Parámetros k y α Iteración 2



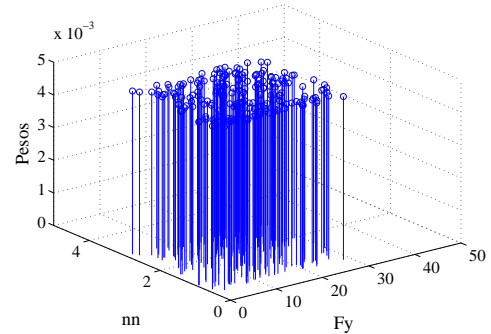
(f) Parámetros F_y y n Iteración 6

Figura 176: Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1996022201

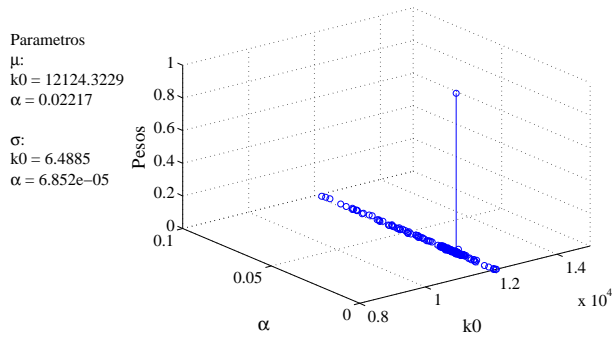
• Filtro de Partículas Evento Fuerte 2: 1997032401



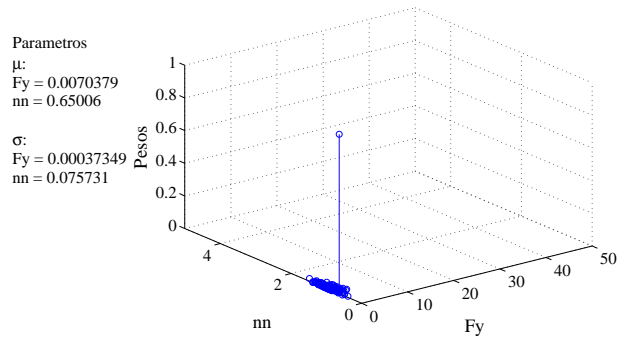
(a) Parámetros k y α Iteración 1



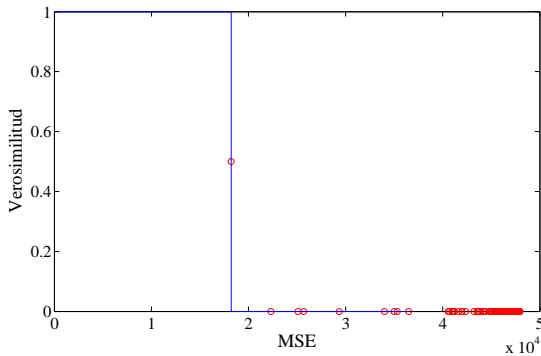
(b) Parámetros Fy y n Iteración 1



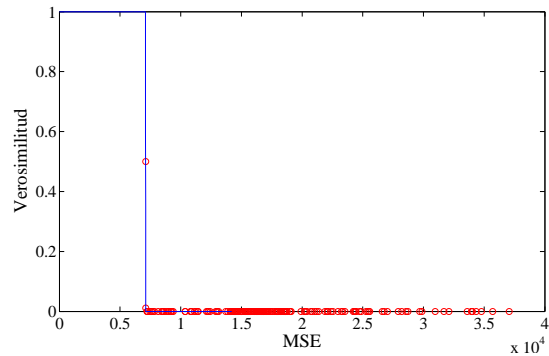
(c) Parámetros k y α Iteración 5



(d) Parámetros Fy y n Iteración 5



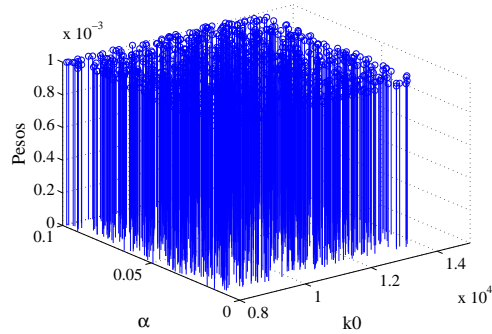
(e) Parámetros k y α Iteración 2



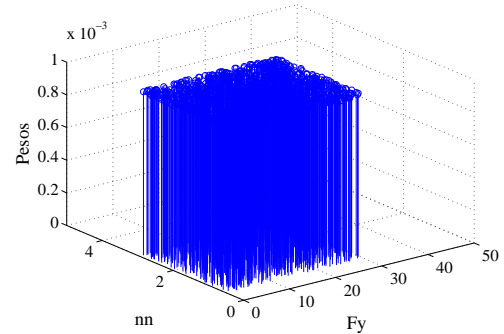
(f) Parámetros Fy y n Iteración 5

Figura 177: Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1997032401

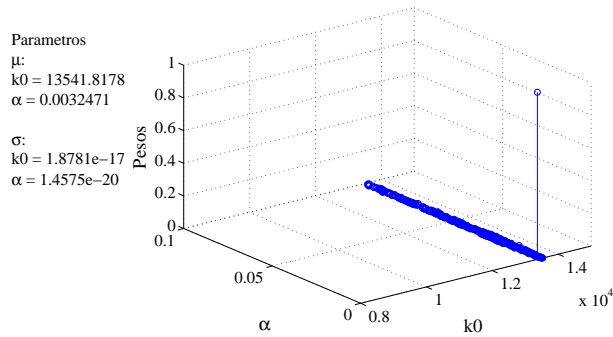
• Filtro de Partículas Evento Fuerte 3: 1997061901



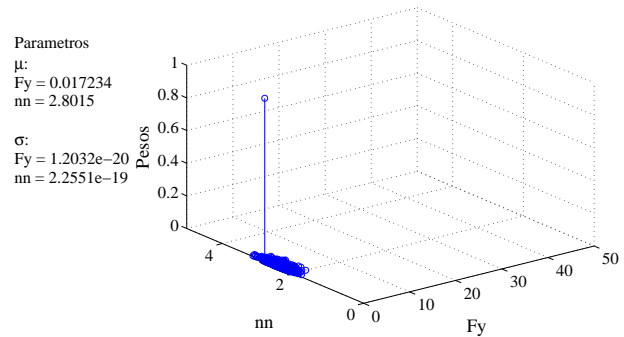
(a) Parámetros k y α Iteración 1



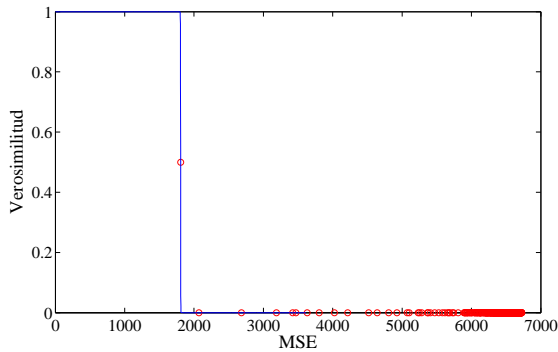
(b) Parámetros F_y y n Iteración 1



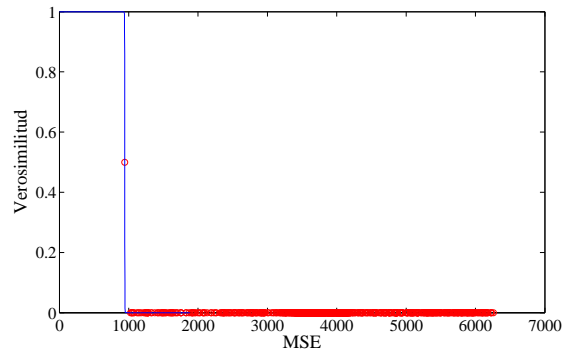
(c) Parámetros k y α Iteración 3



(d) Parámetros F_y y n Iteración 3

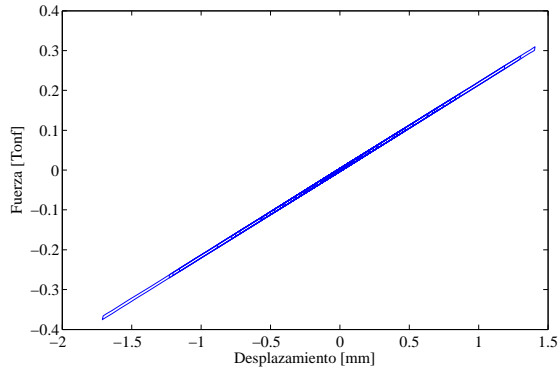


(e) Parámetros k y α Iteración 2

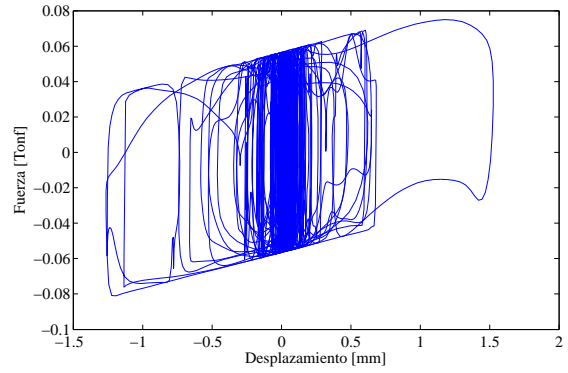


(f) Parámetros F_y y n Iteración 3

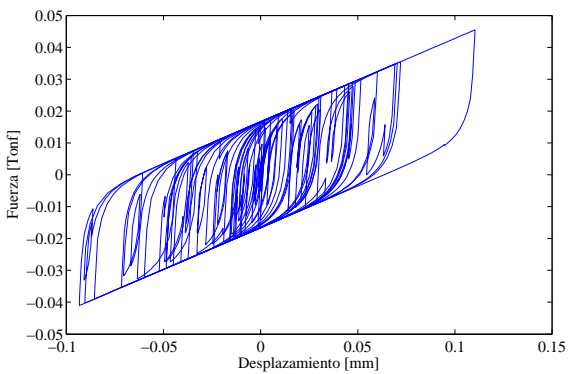
Figura 178: Distribuciones Posteriores de parámetros estimados Evento 1997061901



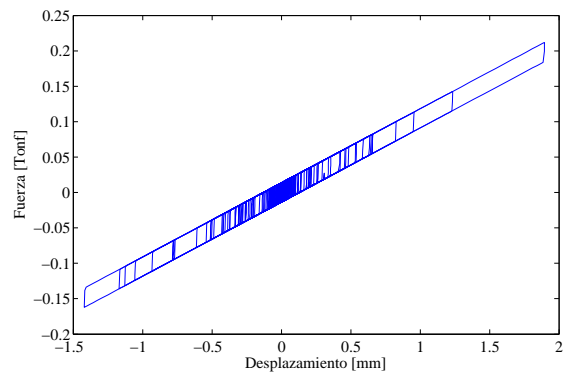
(a) Identificación con respuesta completa Ind: 1



(b) Identificación con modelo acoplado* Ind: 2



(c) Identificación con fase débil Ind: 5



(d) Identificación con respuesta completa Ind: 10

Figura 179: Curvas de histéresis identificadas para distintas soluciones en evento 1996022201

Ind.	Evento	Tipo o Fase	k_i [Tonf/cm]	α	Fy [Tonf]	n	MSE
1	1996022201	Fuerte	8686.25	0.024	0.0041	2.01	5123.4
2	1996022201	Fuerte	12910.43	0.0056	0.015	0.94	5034.48
3	1996022201	Fuerte	12546.6	0.019	0.022	1.23	5138.22
4	1996022201	Débil	12154.37	0.022	0.0056	1.17	3936.2
5	1996022201	Débil	12156.2	0.023	0.084	0.76	4582.3
6	1996022201	Débil	11931.4	0.026	0.045	0.6	4436.2
7	1994102201	Débil	12618.68	0.05	0.106	2.15	541.93
8	1995011301	Débil	9370.06	0.045	15.69	1.80	92.3
9	1995043001	Débil	12698.26	0.034	0.0008	1.87	183.2
10	1996022201	Fuerte	12131.27	0.019	0.035	0.72	5175.4
11	1997032401	Fuerte	12124.32	0.022	0.0007	0.65	6849.7
12	1997061901	Fuerte	13541.81	0.0032	0.017	2.8	975.2

Tabla 42: Estimaciones de parámetros de distintos eventos sísmicos utilizando verosimilitud sigmoideal

Comentarios Identificación con Filtro de Partículas

Los resultados muestran que el algoritmo Filtro de Partículas no es aplicable en el sistema en estudio, debido a las limitaciones que presenta el modelo para reproducir la respuesta de la estructura aislada.

La limitación mostrada por el algoritmo se asocia a la alta densidad de datos de cada registro sísmico ($N > 4000$ para un registro de duración de 20 [seg]), lo cual genera una función de verosimilitud muy aguda, requiriendo de un ajuste a la respuesta de alta precisión para encontrar partículas con peso no nulo, condición que no se logra con el modelo numérico planteado (MCAEA) aún si es que este incluye las características geométricas y de material calibradas previamente en la superestructura.

Debido a lo anterior es que el modelo en el cual se basa la estimación requiere de una mejor capacidad de simulación de las respuestas, con el objetivo de lograr un mayor grado de ajuste con respecto a las obtenidas en los registros sísmicos, así como también de una mejora en los parámetros de entrada (como un aumento en el conocimiento a priori mediante rangos de búsqueda mas acotados), de modo de favorecer la identificación de parámetros que representen de forma precisa el comportamiento de la estructura.

Por otra parte, el uso de una función de verosimilitud sigmoideal permite encontrar la mejor solución del conjunto de muestras, sujeto a las limitaciones del modelo descritas anteriormente. Dicho enfoque, siendo dependiente de las partículas iniciales que posean el menor MSE del conjunto, no garantiza la convergencia a vectores de parámetros que correspondan a soluciones óptimas del sistema asumido, puesto que a diferencia del primer caso, la elección arbitraria de esta función no toma en cuenta la descripción del fenómeno en estudio, modificando las propiedades de convergencia del algoritmo, buscando solo incluir soluciones que son descartadas por la agudez de la función gamma.

Los resultados obtenidos presentan una variabilidad considerable en la identificación de parámetros, siendo solo capaz de estimar de forma parcial las respuestas de aceleración y otorgar inferencias del comportamiento histerético del sistema que difieren por mucho en relación a la aproximación de la curva de rigidez obtenida mediante los desplazamientos calculados a partir de las soluciones encontradas.

Los resultados obtenidos permiten inferir que el modelo utilizado no resulta lo suficientemente adecuado para representar el comportamiento del sistema, pudiendo asociarse al nivel de restricción del mismo en sus relaciones, siendo necesario analizar el desempeño de otros modelos que incorporen el comportamiento biaxial del sistema con un mayor grado de libertad con respecto a los parámetros que controlan el comportamiento del modelo asumido.

5.4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.4.1. Identificación de parámetros modales

Los algoritmos FFT, MOESP y RPEM muestran resultados consistentes en la estimación de las propiedades modales obtenidas, siendo capaces de identificar el comportamiento no estacionario de la estructura, mediante los cambios detectados para los valores de frecuencias y amortiguamientos en la duración del evento, acorde al nivel de no linealidad en la respuesta del edificio aislado.

Para eventos débiles, se observan frecuencias prácticamente constantes mientras que para los eventos clasificados como fuertes, se obtienen comportamientos decrecientes de la frecuencia del primer modo de la estructura coincidiendo con la ocurrencia de la fase fuerte de la excitación basal aplicada, identificando un cambio en la respuesta de la estructura ante un mayor nivel de excitación.

Los amortiguamientos identificados para el primer modo de vibración horizontal presentan un comportamiento irregular con una tendencia al aumento en su valor con el incremento en la amplitud de la excitación en la estructura, siendo consistente con lo obtenido en forma analítica.

Tanto los modos superiores como las frecuencias obtenidas con registros verticales de aceleración presentan un comportamiento que se mantiene estable entre los tipos de eventos considerados, dando cuenta de que la no linealidad exhibida por el sistema no afecta dichas propiedades de forma notoria.

Los métodos detectan en gran parte de los registros, propiedades modales coincidentes con aquellas predominantes en direcciones ortogonales a la de análisis, confirmando el comportamiento acoplado que presentan los modos de la estructura en su respuesta durante un evento sísmico.

Finalmente las formas modales quedan limitadas en su resolución debido al número de registros disponibles para la identificación, acentuándose esta en los casos de FRF y RPEM, los cuales consideran una enfoque escalar, dificultando la compatibilidad entre propiedades identificadas mediante registros en distintas posiciones, por lo que las formas modales estimadas representan una primera aproximación de los primeros modos de vibración basado en las amplitudes modales a nivel de la losa del primer piso y del cuarto piso.

5.4.2. Identificación de parámetros estructurales

El algoritmo de Filtro de Partículas muestra no ser aplicable en el sistema en estudio, debido a las limitaciones que presenta el modelo en el cual se basa la estimación para simular las respuestas observadas en la estructura aislada durante los eventos sísmicos en estudio.

Ante esto, se concluye que el modelo asumido requiere de una mayor calibración para lograr la simulación de respuestas similares a las obtenidas en los registros sísmicos, así como también de una mejora en las características de entrada al algoritmo, de modo de favorecer la identificación de las distribuciones de parámetros que representen de forma precisa el comportamiento de la estructura.

Por otra parte, el uso de una función sigmoïdal como verosimilitud, no garantiza que los vectores de parámetros encontrados correspondan a soluciones óptimas del sistema, puesto que a diferencia del primer caso, la elección arbitraria esta función no toma en cuenta la descripción del fenómeno en estudio, buscando solo incluir soluciones que son descartadas por la agudeza de la función gamma debido a las limitaciones del modelo.

Por lo tanto, los resultados obtenidos presentan una variabilidad considerable en la identificación de parámetros, haciendo posible solo una estimación de forma parcial de las respuestas de aceleración y de inferencias del comportamiento histerético del sistema mediante los desplazamientos, considerando las limitaciones del modelo numérico utilizado.

5.5. COMENTARIOS

En el capítulo se presentaron los resultados obtenidos mediante los procedimientos de identificación abarcados en el estudio, utilizando los registros de aceleración de una estructura aislada existente, buscando validar los resultados obtenidos en forma analítica.

Las estimaciones realizadas mediante los algoritmos FFT, MOESP-MV Y RPEM- λ , muestran ser consistentes para las frecuencias de la estructura, permitiendo identificar el comportamiento no estacionario del sistema.

Tanto el amortiguamiento como las formas modales se ven limitadas en su estimación por factores tales como el aumento de no linealidad, compatibilidad de propiedades obtenidas por canales distintos en métodos escalares y el número de canales dispuestos en la estructura para realizar la identificación. Aún así, estas permiten obtener rangos de valores como primeras aproximaciones de las propiedades asociadas al edificio aislado.

Por otra parte el algoritmo de Filtro de Partículas con Evolución Artificial de Parámetros (PF) presentó grandes limitaciones asociadas al modelo analítico en el cual se basa la estimación, el cual aunque considera las características “reales” de la estructura, no logra simular las respuestas horizontales de la estructura en estudio de forma precisa, no siendo posible encontrar partículas cercanas a las zonas de máxima verosimilitud, descartando la aplicabilidad del método en esta estructura particular.

También se estudió el uso de una función de verosimilitud sigmoideal buscando estimar los parámetros estructurales que mejor expliquen las observaciones utilizadas, sujeto a las restricciones del modelo. Aunque este método permitió incorporar la diferencia entre el sistema real y el modelo propuesto, solo presenta una estimación variable de los parámetros y un ajuste parcial de las respuestas de la estructura ante los eventos sísmicos estudiados.

CAPITULO VI
CONCLUSIONES

CAPITULO VI. CONCLUSIONES

El objetivo principal del trabajo de tesis desarrollado consiste en proponer un procedimiento de identificación para edificios con aislación sísmica, mediante la evaluación de una serie de procedimientos, aplicados a respuestas asociadas a distintos niveles de no linealidad en este tipo de estructuras.

Para ello, se consideraron los algoritmos: Espectro de Densidad de Potencia (PSD), Método de subespacio con error de salida multivariable aplicado en ventanas traslapadas (MOESP-MV), Método Recursivos de Error de Predicción con Factor de Olvido (RPEM- λ) y Filtro de Partículas con Evolución Artificial de Parámetros (PF), los cuales fueron aplicados utilizando respuestas generadas a partir de modelos numéricos de edificios aislados, y posteriormente registros de aceleración de una estructura aislada existente, correspondiente al edificio ubicado en el conjunto habitacional Comunidad Andalucía.

La identificación de sistemas con aislación sísmica requiere el uso de métodos que permitan estimar propiedades dinámicas de la estructura por medio de respuestas fuertemente no lineales, debido al gran nivel de desplazamientos desarrollados en la interfaz de aislación, ante excitaciones sísmicas de mayor amplitud. El desempeño mostrado por los procedimientos de identificación abordados, permite concluir los siguientes puntos

a) Los procedimientos de identificación PSD, MOESP-MV y RPEM- λ son capaces de detectar un comportamiento no estacionario en la estructura ante excitaciones de mayor amplitud. En el primer caso, esta diferencia se observa entre resultados de distintos eventos sísmicos, puesto que el espectro de amplitud incluye las frecuencias predominantes en cada régimen de respuesta. Mientras que en los otros dos casos, dicha identificación es lograda de forma offline mediante la obtención de parámetros modales variantes en el tiempo, asociados a representaciones lineales simples del sistema (modelos de espacio estado y estructuras polinomiales), durante la ocurrencia del evento sísmico.

Un aumento de no linealidad en la respuesta afecta principalmente al valor de la frecuencia del primer modo horizontal de la estructura, la cual presenta un decrecimiento junto con un aumento irregular del amortiguamiento. Mientras que los modos superiores horizontales no presentan cambios notorios con el aumento de no linealidad, debido a la baja participación que presentan estos en la respuesta en relación al primer modo predominante. El modo vertical identificado también presenta un comportamiento estable, debido al carácter predominantemente lineal en esta dirección asociada a la gran rigidez axial de los aisladores.

La naturaleza acoplada de los modos en este tipo de estructura es detectada, siendo identificados en direcciones ortogonales a la del registro utilizado, como en el caso de los modos superiores de rocking/cabeceo. Por otra parte, la identificación de las formas modales queda fuertemente sujeta al número de canales de observación disponibles, siendo posible obtener solo una primera aproximación para la forma del primer modo de la estructura a partir de los registros del primer y último piso.

b) El estudio muestra que los modelos histeréticos abordados, y que son típicamente utilizados en el diseño de de sistemas aislados (Bouc-Wen y Bilineal), presentan un comportamiento distinto al esperado, acorde a lo observado en algunos casos en la práctica .

Esto se infiere del caso analítico, donde se presenta una transición discreta del primer modo horizontal entre 2 valores asociados a las rigideces que predominan en la respuesta histerética de los aisladores para una amplitud de excitación determinada [24]. Esto difiere de lo obtenido en el caso experimental, donde se observa un cambio continuo de la frecuencia del primer modo con el aumento del nivel de desplazamientos en la interfaz de aislación, durante la aplicación de la excitación sísmica.

En los resultados se identificaron valores de frecuencias controladas por la rigidez inicial para los dos primeros casos histeréticos, los cuales consisten en respuestas asociadas a un comportamiento donde no se supera el desplazamiento de fluencia, y una respuesta histerética moderada. Estas presentan diferencias principalmente en el amortiguamiento del primer modo, el cual muestra una tendencia creciente con el nivel de no linealidad en la respuesta. Por otra parte, solo se identifica un cambio notorio en el valor de la frecuencia del primer modo horizontal para el caso de histéresis extrema, cuya respuesta queda controlada de forma predominante por la rigidez post-fluencia de la curva histerética del modelo respectivo.

Debido a lo anterior es que un modelo de histéresis biaxial, que incorpore la interacción entre las respuestas horizontales, y con un mayor grado de libertad, reflejado en un mayor número de parámetros, puede ser requerido para representar con un mayor nivel de precisión el comportamiento dinámico de los aisladores sísmicos en forma analítica, de modo de obtener resultados mas consistentes con lo observado en la práctica para la identificación de estructuras aisladas.

c) El algoritmo Filtro de Partículas (PF) permite realizar una estimación efectiva de los parámetros que definen el modelo histerético asumido para la identificación. Sin embargo, el procedimiento se encuentra sujeto a la capacidad del modelo propuesto para reproducir las respuestas observadas en la estructura aislada.

Lo anterior se debe al gran número de datos en los registros de respuesta del sistema, lo que genera una función de verosimilitud muy aguda en su forma y produce que el modelo asumido posea una influencia mayor en la capacidad de identificación del método, aún ante un nivel estándar de incertidumbre en la medición. Esto obliga a utilizar un modelo específico con una gran capacidad de incorporar las incertidumbres del sistema para lograr la simulación de respuestas similares a las observaciones, en términos de un MSE normalizado, con el objetivo de obtener partículas de peso no nulo para la distribución.

En el caso analítico la identificación de los sistemas en estudio fue satisfactoria, principalmente debido a que las observaciones utilizadas fueron generadas desde el mismo tipo de modelo asumido para la estimación, permitiendo realizar ajustes e inferencias de distintos tipos de respuestas en la estructura con una gran precisión. Sin embargo, el caso experimental no muestra el mismo desempeño debido a que el modelo utilizado presenta un nivel de incertidumbre muy alto en los parámetros conocidos, no pudiendo ser capaz de ajustar de forma precisa las respuestas medidas, y por lo tanto entrega partículas con valores de MSE muy alejados de las zonas de alta verosimilitud.

Ante esto, se propuso una sigmoide como función de verosimilitud, dependiente de parámetros asignados por el usuario, de modo de obtener las mejores estimaciones de los parámetros del sistema, tomando en cuenta las limitaciones que presentó el modelo propuesto para una identificación mediante una función de verosimilitud gamma. Con este algoritmo, se obtuvieron parámetros variables que permiten efectuar estimaciones precisas dependientes del régimen de respuesta utilizada como observación, dando cuenta de la incapacidad del modelo utilizado para reproducir el comportamiento de la estructura ante distintas fases de excitación.

d) El estudio se abordó 3 clases de metodologías según las relaciones entre las entradas(I) y salidas(O) del sistema, las cuales consisten en: algoritmos de salida única (SO) como PSD/FFT, entrada-salida única (SISO) como RPEM/FRF y de entradas-salidas múltiples (MIMO) como MOESP-MW/Filtro de Partículas.

Procedimientos como RPEM (SISO) muestran las mayores limitaciones debido al carácter tridimensional de la estructura, produciendo que el alcance en la identificación resulte fuertemente dependiente de la localización de la observación en el sistema, siendo solo posible detectar propiedades modales en posiciones que no se vean sujetas a efectos rotacionales en su respuesta. Al mismo tiempo, la dependencia en la selección de la estructuras polinomial, basada en el ajuste y simplicidad del modelo no permite contar con una metodología robusta que permita diferenciar entre polos reales y numéricos, condición que se mejoró solo de

forma parcial al incorporar las restricciones asociadas al sistema en estudio.

Los algoritmos de identificación no paramétrica como FFT/PSD (SO) permiten identificar gran parte de los modos de la estructura, quedando su efectividad sujeta al nivel de participación de dichos modos en la posición del registro utilizado. Sin embargo el método no permite discriminar el comportamiento temporal de los modos identificados.

Por otra parte, tanto MOESP como el Filtro de Partículas permiten abordar el problema de identificación mediante un enfoque vectorial (MIMO), haciendo uso de las excitaciones y respuestas del sistema en distintas direcciones. En el primer caso, la efectividad en la detección de las propiedades modales de la estructura recae en la elección adecuada de los parámetros asociados a los diagramas de estabilización, especialmente en el ancho de bin, número de polos estables y los límites admisibles para las diferencias entre polos de distintos órdenes, considerando un alto nivel de no linealidad en la respuesta.

Mientras que el algoritmo Filtro de Partículas resulta fuertemente dependiente de la capacidad del modelo para reproducir el set de respuestas incluidas como observación, para lo cual un modelo histerético adecuado debe ser escogido y calibrado para efectuar estimaciones precisas de los parámetros a identificar.

A partir de los puntos expuestos, se infiere que la selección de un procedimiento particular, para abordar el problema de identificación en un edificio sísmicamente aislado, dependerá en primera instancia de la aplicación de interés: **Modelamiento o Monitoreo Estructural**. Luego, los factores como la complejidad del modelo utilizado, disponibilidad y ubicación de registros sísmicos, nivel de conocimiento de condiciones iniciales y representiación de la incertidumbre de la observación y del sistema, entre otros, toman una gran importancia para la identificación del sistema sujeto a respuestas no lineales.

Tomando en cuenta tanto la efectividad como la simplicidad en el uso e interpretación de resultados en la identificación de propiedades de la estructura en estudio, tanto MOESP-MW como las técnicas no paramétricas como FFT/PSD poseen una ventaja con respecto a RPEM-FF aplicado con modelos polinomiales, ya que este último muestra ser muy dependiente del orden del polinomio escogido, sin un procedimiento robusto que permita lidiar con el descarte de propiedades modales espurias. Mientras que su enfoque de entrada y salida única no permite compatibilizar de manera efectiva los resultados entre distintos canales de respuesta de la estructura, dado su carácter tridimensional.

Considerando que MOESP-MW posee un enfoque vectorial, siendo posible incorporar canales de observación en diferentes direcciones, y que el procedimiento permite identificar

el comportamiento no estacionario de las propiedades modales del sistema en tiempo real, este posee una ventaja con respecto a las técnicas no paramétricas como PSD, ya que este tipo de procedimientos permite identificar las frecuencias predominantes en la respuesta, sin la capacidad de discriminar su carácter variante en el tiempo, como en el caso del primer modo horizontal de la estructura, pudiendo presentarse una redundancia en su identificación. Una segunda ventaja notoria lo presenta en la capacidad de estimación del amortiguamiento del sistema, el cual arroja resultados con mayor consistencia en el caso de MOESP-MW en relación a las estimaciones realizadas mediante el método de ancho de banda (FFT/PSD) para un caso sísmico.

Por otra parte, el algoritmo de Filtro de Partículas muestra no ser aplicable para el caso de estudio de la estructura aislada existente abordada en el presente trabajo. Sin embargo, dicha condición solo surge debido a una limitación del modelo asumido, por lo que ante la incorporación de un modelo histerético que logre simular con un mayor nivel de precisión la respuesta dinámica de la estructura, este procedimiento de identificación sería el primero(***) en la lista propuesta de entre los algoritmos estudiados, basado en el desempeño mostrado en el estudio analítico, ya que permitiría llevar a cabo una identificación, tomando en cuenta las características particulares del sistema en estudio (geometría y propiedades de materiales conocidas a priori), y a la vez cuantificar el nivel de incertidumbre en la estimación de los parámetros que controlan el comportamiento no lineal de la estructura aislada.

El mayor inconveniente que muestra consiste en el tiempo requerido para realizar la identificación, causado principalmente por el costo computacional de generar la respuesta correspondiente a cada partícula a partir de un modelo de elementos finitos externo (caja negra), siendo apropiado principalmente para la construcción y validación de un modelo numérico no lineal, pero no respondiendo a las necesidades de un procedimiento de monitoreo estructural en tiempo real.

Basado en los aspectos discutidos con anterioridad, los algoritmos propuestos para abordar el problema de identificación en una estructura aislada se ordenan de la siguiente forma

- 1) MOESP-MW
- 2) FFT/PSD
- 3) RPEM
- 4) Filtro de Partículas ***

Teniendo en cuenta las limitaciones que muestra el estudio realizado, en relación al alcance de los algoritmos y modelos utilizados, las siguientes extensiones quedan propuestas para profundizar en el de la identificación en este tipo de sistemas:

- 1) Estudiar el uso de otros modelos de histéresis para simular el comportamiento dinámico

de los aisladores sísmicos, con el objetivo de disponer de un modelo numérico que permita reducir las discrepancias entre las respuestas predichas y los registros de aceleración medidos, de modo de mejorar el nivel de aplicación del algoritmo de Filtro de Partículas en este tipo de sistemas.

2) Estudiar el impacto que posee la inclusión de observaciones adicionales en la identificación mediante el Filtro de Partículas, añadiendo registros de velocidad, desplazamiento y deformación del sistema.

3) Implementar un procedimiento vectorial para el método recursivo de error de predicción (RPEM-FF), que permita incorporar las observaciones de distintos canales de observación del sistema y obtener las propiedades modales de la estructura de forma consistente. A la vez, estudiar metodologías más eficientes en la diferenciación de las propiedades modales reales y espurias, en comparación a los criterios estudiados (AIC, BIC, FPE), buscando disminuir la dependencia del método del conocimiento previo del usuario.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografía

- [1] Aguilera, P. (2002). Efecto de vibraciones verticales en la respuesta de un edificio aislado sísmicamente. *Civil Engineering Thesis*.
- [2] Andrade Trujillo, F. A. B. (2014). Estimación de capacidad y demanda de muros, en edificio de vivienda social, durante el sismo del 27 de febrero de 2010.
- [3] Araya, M. (1994). Desarrollo y fabricación de aisladores sísmicos para edificio habitacional. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile*.
- [4] Bakir, P. G. (2011). Automation of the stabilization diagrams for subspace based system identification. *Expert Systems with Applications*, 38(12):14390–14397.
- [5] Beck, J. L. (1979). *Determining models of structures from earthquake records*. PhD thesis, California Institute of Technology.
- [6] Bendat, J. and Piersol, A. G. (1986). Random data: measurement and analysis procedures.
- [7] Candy, J. V. (2011). *Bayesian signal processing: Classical, modern and particle filtering methods*, volume 54. John Wiley & Sons.
- [8] Chatzi, E. N. and Smyth, A. W. (2009). The unscented kalman filter and particle filter methods for nonlinear structural system identification with non-collocated heterogeneous sensing. *Structural control and health monitoring*, 16(1):99–123.
- [9] Chaudhary, M. T. A., Abe, M., Fujino, Y., and Yoshida, J. (2000). System identification of two base-isolated bridges using seismic records. *Journal of Structural Engineering*, 126(10):1187–1195.
- [10] Constantinou, M. C. and Kneifati, M. C. (1987). *Dynamics of Soil-base-isolated Structure Systems: Nonlinear Systems. Report 3*. [Department of Civil Engineering], Drexel University.

- [11] Cooley, J. W. and Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of computation*, 19(90):297–301.
- [12] CSI (2013). Analysis reference manual sap2000. *Computer and Structures, Inc*, 1:269–270.
- [13] Del Moral, P. and Formulae, F.-K. (2004). genealogical and interacting particle systems with applications, probability and its applications.
- [14] Departamento de Ingeniería Civil - Geofísica - Universidad de Chile (1994 - 2014). Informes Renadic. <http://terremotos.ing.uchile.cl/eventos/>.
- [15] Doucet, A., Godsill, S., and Andrieu, C. (2000). On sequential monte carlo sampling methods for bayesian filtering. *Statistics and computing*, 10(3):197–208.
- [16] Giannitrapani, A., Ceccarelli, N., Scortecci, F., and Garulli, A. (2011). Comparison of ekf and ukf for spacecraft localization via angle measurements. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 47(1):75–84.
- [17] Julier, S. J. and Uhlmann, J. K. (1996). A general method for approximating nonlinear transformations of probability distributions. Technical report, Technical Report, RRG, Department of Engineering Science, University of Oxford.
- [18] Kadakal, U. and Yüzügüllü, Ö. (1996). A comparative study on the identification methods for the autoregressive modelling from the ambient vibration records. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 15(1):45–49.
- [19] Kerschen, G., Worden, K., Vakakis, A. F., and Golinval, J.-C. (2006). Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. *Mechanical systems and signal processing*, 20(3):505–592.
- [20] Liu, J. and West, M. (2001). Combined parameter and state estimation in simulation-based filtering. In *Sequential Monte Carlo methods in practice*, pages 197–223. Springer.
- [21] Ljung, L. (1987). System identification: Theory for the user. *PTR Prentice Hall Information and System Sciences Series*, 198.
- [22] Loh, C.-H., Weng, J.-H., Chen, C.-H., and Lu, K.-C. (2013). System identification of mid-story isolation building using both ambient and earthquake response data. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(2):139–155.

- [23] Ma, F., Zhang, H., Bockstedte, A., Foliente, G. C., and Paevere, P. (2004). Parameter analysis of the differential model of hysteresis. *Journal of Applied Mechanics*, 71(3):342–349.
- [24] Martinez, J. M., Boroschek, R., and Bilbao, J. (2012). System identification procedures for nonlinear response of buclinkg restraint braces. *IZIIS-50 International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, pages 1–8.
- [25] Moore, S. and Lai, J. (2006). Armax modal parameter identification for structures excited with piezoceramic actuators. *IMAC-XXIV-Conference*.
- [26] Moroni, M. O., Sarrazin, M., and Boroschek, R. (1998). Experiments on a base-isolated building in santiago, chile. *Engineering Structures*, 20(8):720–725.
- [27] Nagarajaiah, S. and Xiaohong, S. (2000). Response of base-isolated usc hospital building in northridge earthquake. *Journal of structural engineering*, 126(10):1177–1186.
- [28] Orderud, F. (2005). Comparison of kalman filter estimation approaches for state space models with nonlinear measurements. In *Proc. of Scandinavian Conference on Simulation and Modeling*, pages 1–8.
- [29] Proakis, J. G. and Manolakis, D. G. (1996). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall.
- [30] Riveros, P. (1998). Análisis de registros sísmicos horizontales obtenidos en un edificio aislado en su base. *Civil Engineering Thesis*.
- [31] Rojas, C. (1998). Análisis de registros sísmicos verticales obtenidos en el edificio aislado de la comunidad andalucía. *Civil Engineering Thesis*.
- [32] Safak, E. (1989a). Adaptive modeling, identification, and control of dynamic structural systems. i: Theory. *Journal of Engineering Mechanics*, 115(11):2386–2405.
- [33] Safak, E. (1989b). Adaptive modeling, identification, and control of dynamic structural systems. ii: applications. *Journal of engineering mechanics*, 115(11):2406–2426.
- [34] Stewart, J. P., Conte, J. P., and Aiken, I. D. (1999). Observed behavior of seismically isolated buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125(9):955–964.
- [35] Vanmarcke, E. H. (1972). Properties of spectral moments with applications to random vibration. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 98(2):425–446.

- [36] Verhaegen, M. and Dewilde, P. (1992). Subspace model identification part 1. the output-error state-space model identification class of algorithms. *International journal of control*, 56(5):1187–1210.
- [37] Wagenmakers, E.-J. and Farrell, S. (2004). Aic model selection using akaike weights. *Psychonomic bulletin & review*, 11(1):192–196.
- [38] Wan, L., LIU, Y.-c., and PI, Y.-m. (2007). Comparing of target-tracking performances of ekf, ukf and pf [j]. *Radar Science and Technology*, 1:003.
- [39] Xie, Z. and Feng, J. (2012). Real-time nonlinear structural system identification via iterated unscented kalman filter. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28:309–322.
- [40] Yoshimoto, R. (2004). *Damage detection of base-isolated buildings using multi-inputs multi-outputs subspace identification*. PhD thesis, Department of System Design Engineering, Keio University.

ANEXO A

BASE DE DATOS EDIFICIO

AISLADO ANDALUCIA

Registros Filtrados entre 0.25 - 30 Hz - Orientación de sensores - Fundacion (F): E-O (Longitudinal) / N-S (Transversal)
 - Primer Piso (L) y Cuarto Piso (C) : N-S (Longitudinal) / E-O (Transversal)

Ind.	Idcompleto	Nombre v1	Dia	Mes	Año	Magnitud	Ubicación	Hr.	Min.	Seg.	Lat.	Long.	Dh [Km]	Intensidad	H [Km]	Ti_reg [seg]	Tf_reg [seg]
1	1993071601	9307161	16	7	1993	5.26	F/L/C	21	21	25	33.280	72.148	141.3	N/A	18.58	14	78.08
2	1993080601	9308061	6	8	1993	4.56	F/L/C	8	18	20	33.229	70.17	52.16	N/A	108.5	14.5	78.08
3	1994101001	9410101	10	10	1994	5.3	F/L/C	22	30	0	N/A	N/A	165	N/A	N/A	0	78.08
4	1994101801	9410181	18	10	1994	4.2	F/L/C	6	34	0	33.3	70.3	37.69	N/A	N/A	2	78.08
5	1994102201	9410221	22	10	1994	4.1	F/L/C	12	40	0	33	70.4	56.92	N/A	N/A	2.5	78.08
6	1994102801	9410281	28	10	1994	4.9	F/L/C	18	0	0	33.2	70.4	37.84	N/A	N/A	14	78.08
7	1995011301	9501131	13	1	1995	4.6	F/L/C	23	37	45	34.17	71.22	94.1	N/A	60	0	78.08
8	1995020101	9502011	1	2	1995	4.1	F/L/C	20	6	15	33.15	71.3	69.81	N/A	56	4.5	78.08
9	1995031501	9503151	15	3	1995	4.7	F/L/C	9	53	51	34.04	71.45	97.53	N/A	46	12.5	78.08
10	1995040501	9504051	5	4	1995	4.9	F/L/C	1	43	6	32.421	71.321	131.75	N/A	46.51	0	78.08
11	1995043001	9504301	30	4	1995	4.25	F/L/C	13	44	57	33.518	70.868	20.86	N/A	78.61	5	78.08
12	1995060201	9506021	2	6	1995	5.3	F/L/C	16	7	33	32.153	71.481	165.07	N/A	4.5	0	78.08
13	1995061201	9506121	12	6	1995	4.81	F/L/C	17	47	17	33.731	70.732	39.22	N/A	11.73	10	78.08
14	1995062801	9506281	28	6	1995	4.6	F/L/C	15	4	7	34.765	71.833	180.6	N/A	42	15	78.08
15	1995092201	9509221	22	9	1995	4.6	F/L/C	17	59	20	32.567	70.154	110.19	IV	105	0	47.36
16	1995100901	9510091	9	10	1995	5	F/L/C	5	57	47	32.258	71.37	124.04	IV	45	0	47.36
17	1995102201	9510221	22	10	1995	4.5	F/L	1	11	32	N/A	N/A	69.83	N/A	105	1.5	37.18
18	1995112701	9511271	27	11	1995	4.3	F/L/C	16	34	44	33.4502	71.1505	64.56	II	56	5	25.35
19	1996010301	9601031	3	1	1996	4.4	F/L/C	9	25	27	33.1803	70.2100	33.3	IV	97	3.4	47.36
20	1996022201	9602221	22	2	1996	5.9	F/L/C	10	40	55	33.3800	71.3606	90.67	VI	46	15	60.16
21	1996030201	9603021	2	3	1996	4.5	F/L/C	14	26	51	33.1708	70.5905	35.83	IV	61	5.5	47.36
22	1996072301	9607231	23	7	1996	4.6	F/L/C	23	21	17	33.0106	71.0307	61.98	IV	78	5	47.36
23	1996090801	9609081	8	9	1996	6.2	F/L/C	20	20	39	31.5402	71.4601	202.9	IV	38	0	47.36
24	1996101801	9610181	18	10	1996	5.1	F/L/C	10	41	8	33.2405	70.2304	25.27	IV	124	0	47.36
25	1997020501	9702051	5	2	1997	4.6	F/C	19	17	35	34.2805	70.3500	112.24	N/A	110	15	51.2
26	1997032401	9703241	24	3	1997	5.3	F/C	21	14	46	33.2801	70.4701	12.33	VI	80	15	74.24
27	1997060801	9706081	8	6	1997	4.4	F/C	14	5	1	32.4104	70.0909	97.5	II	109	0	47.36
28	1997061901	9706191	19	6	1997	5.1	F/C	8	21	3	33.0904	70.1801	47.41	V	107	3	47.36
29	1997101401	9710141	14	10	1997	6.8	F/L/C	22	3	30	30.4405	71.1907	309.64	V	55	0	106
30	1998011201	9801121	12	1	1998	5.9	F/L/C	7	14	13	31.1808	71.2501	249.98	III	50	0	47.36
31	1998041701	9804171	17	4	1998	5.1	F/L/C	15	48	53	32.4702	71.3105	111	IV	36	1	47.36
32	1998050301	9805031	3	5	1998	4.8	F/L/C	18	42	34	33.1602	71.2802	79.05	IV	51	4	47.36
33	1998072901	9807291	29	7	1998	6.2	F/L/C	3	14	24	32.2202	71.2703	143.1	V	36	11	87.04
34	1998080101	9808011	1	8	1998	4.5	F/L/C	9	56	44	34.4908	71.0809	158.32	III	95	0	47.36
35	1998101001	9810101	10	10	1998	5.1	F/L/C	1	12	5	33.3201	72.1802	153.3	III	10	11.5	49.92
36	1998102901	9810291	29	10	1998	5	F/L/C	16	55	56	32.5200	70.3907	66.68	V	89	3	57.6
37	1998102902	9810292	29	10	1998	4.7	F/L/C	17	30	40	32.5107	70.3906	67.25	IV	90	1.8	47.36
38	1998112701	9811271	27	11	1998	5.1	F/L/C	7	27	3	32.0504	69.5001	171.04	III	147	0	47.36
39	1998122001	9812201	20	12	1998	4.7	F/L/C	8	46	27	33.3805	70.5502	31.54	IV	65	6.7	47.36
40	1999040401	9904041	4	4	1999	4.2	F/L/C	17	4	26	33.3900	71.0000	38.15	N/A	73	6.5	47.36
41	1999040601	9904061	6	4	1999	4.9	F/L/C	3	45	36	34.1502	72.0200	154.67	IV	40	0	47.36
42	1999062501	9906251	25	6	1999	4.4	F/L/C	7	8	48	33.5502	70.5807	58.77	III	72	4.2	47.36
43	1999080101	9908011	1	8	1999	5.1	F/L/C	21	6	39	33.0708	70.2105	46.31	V	98	15	52.48
44	1999080301	9908031	3	8	1999	4.8	F/L/C	12	24	44	32.5101	70.4700	69.62	IV	78	3	47.36
45	1999090101	9909011	1	9	1999	4.6	F/L/C	22	37	19	33.1809	70.1209	43.91	III	112	13.5	47.36

Registros Filtrados entre 0.25 - 30 Hz - Orientación de sensores - Fundacion (F): E-O (Longitudinal) / N-S (Transversal)
 - Primer Piso (L) y Cuarto Piso (C) : N-S (Longitudinal) / E-O (Transversal)

Ind.	Idcompleto	Nombre v1	Dia	Mes	Año	Magnitud	Ubicación	Hr.	Min.	Seg.	Lat.	Long.	Dh [Km]	Intensidad	H [Km]	Ti_reg [seg]	Tf_reg [seg]
46	2000061601	0006161	16	6	2000	6.4	F/L/C	3	55	36	33.5307	70.1302	62.2	N/A	112	14	67.84
47	2001040501	0104051	5	4	2001	4.9	F/L/C	1	16	57	34.2155	70.2906	100.36	III	108	0	47.36
48	2001040901	0104091	9	4	2001	6.2	F/C	5	0	54	32.4202	73.1703	259.82	IV	6.5	0	47.36
49	2001072401	0107241	24	7	2001	5.1	F/C	13	42	41	32.5105	71.4600	123.8	IV	53	2	46.7
50	2002071901	0207191	19	7	2002	5	F/L/C	2	55	47	33.1804	70.4607	21.29	N/A	80	6	46.9
51	2002080601	0208061	6	8	2002	4.6	F/L/C	18	20	32	34.216	71.184	116.28	N/A	64	0	47.36
52	2003010601	030106	6	1	2003	6	F/L/C	21	54	0	33.4507	70.1355	51.33	V	111	14	49.92
53	2003030801	030308	8	3	2003	4.3	F/L/C	3	6	0	33.4723	71.1604	50	III	60.4	15.2	47.36
54	2003061601	0306161	16	6	2003	5.2	F/C	11	10	0	33.5606	71.0639	73.21	III	74.2	4	47.36
55	2004043001	040430	30	4	2004	5.4	F/L	6	3	0	33.3057	70.3357	9.83	IV	95.8	4.6	47.36
56	2004082801	040828	28	8	2004	6.2	F/L/C	9	41	0	35.1315	70.21107	196.81	V	10	0	47.36
57	2004102601	041026	26	10	2004	4.4	F/L/C	14	17	0	34.0813	71.1727	94.79	III	61.8	2	47.36
58	2004121101	041211	11	12	2004	5	F/L/C	6	34	0	33.5721	70.5226	57.82	IV	77.1	4.5	47.36
59	2006061701	060617	17	6	2006	4.7	F/L/C	23	45	0	34.1846	70.3220	94.34	III	106.6	0	47.36
60	2006090901	060909	9	9	2006	5.2	F/L/C	13	31	10	32.3838	70.3646	91.96	III	100.4	0	47.36
61	2007042201	070422	22	4	2007	5.6	F/L/C	6	22	2	32.2316	71.2652	104.95	IV	25.6	0	47.36
62	2007121501	071215	15	12	2007	6	F/L/C	15	22	27	32.4810	71.4423	125.19	IV	45	0	47.36
63	2007121701	071217	17	12	2007	5.4	F/L/C	6	26	34	32.5237	71.0426	76.66	IV	62.5	0.8	47.36
64	2008121801	0812181	18	12	2008	5.9	F/C	18	19	28	32.2833	71.5400	160.54	IV	24.8	0	47.36
65	2009042601	0904261	26	4	2009	4.7	F/C	4	3	36	32.5031	69.3903	116.16	IV	138.4	0	47.36
66	2009063001	0906301	30	6	2009	4.7	F/C	10	17	15	33.2638	70.4930	16	IV	81.5	5.6	47.36
67	2010021201	1002121	12	2	2010	6.2	F/C	9	3	39	33.3824	69.2858	110.6	IV	209.1	0	47.36
68	2010022701	1002271	27	2	2010	8.8	F/C	3	34	12	36.1228	72.5746	370.08	VIII	47.4	0	205
69	2010022705	1002275	27	2	2010	N/A	F/C	0	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	47.36
70	2010030306	1003036	3	3	2010	N/A	F/C	0	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	47.36
71	2010030501	1003051	5	3	2010	5.3	F/C	0	34	28	34.3245	71.5059	162.25	IV	8.5	0	47.36
72	2010030904	1003094	9	3	2010	4.5	F/C	21	14	49	33.4817	71.2454	79.43	III	11.6	4	47.36
73	2010031105	1003115	11	3	2010	N/A	F/C	0	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	10	75.52
74	2010031106	1003116	11	3	2010	N/A	F/C	0	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	11	69.12
75	2010031115	1031115	11	3	2010	N/A	F/C	0	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	47.36
76	2010031116	1031116	11	3	2010	N/A	F/C	0	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	47.36
77	2010031203	1003123	12	3	2010	4.3	F/C	21	51	30	34.2103	72.0227	161.3	N/A	28.3	0	47.36
78	2010031204	1003124	12	3	2010	4.8	F/C	22	46	55	34.2501	71.5905	162.07	N/A	7.3	0	47.36
79	2010032901	1003291	29	3	2010	5.8	F/C	4	35	6	34.5251	71.5606	196.08	IV	34.1	0	47.36
80	2010040406	1004046	4	4	2010	4.8	F/C	23	32	14	33.2305	71.0050	34.31	IV	68.6	6.5	47.36
81	2010050202	1005022	2	5	2010	5.8	F/C	10	52	39	34.1749	72.0419	159.82	III	32.9	0	47.36
82	2010060502	1106052	5	6	2011	5.6	F/C	6	25	15	35.0000	72.1123	221.32	II	32.4	0	47.36
83	2011071505	1107155	15	7	2011	5.7	F/C	20	26	11	33.5403	72.0556	141.76	IV	26	0	47.36
84	2012041701	1204171	17	4	2012	6.3	F/C	0	50	13	32.4127	71.4853	138.2	VI	31.9	11.5	72
85	2012101101	1210111	11	10	2012	5.7	F/C	14	22	10	32.5244	70.3903	65.88	VI	95	3.5	47
86	2013061904	1306194	19	6	2013	5.5	F/C	17	29	11	32.6201	70.2306	101.84	III	107.1	0	46
87	2013083001	1308301	30	8	2013	5.1	F/C	6	48	13	34.4705	70.6804	111.68	IV	111.7	0	47
88	2014030601	1403061	6	3	2014	5.3	F/C	1	37	5	33.3333	71.2800	60.14	V	59.7	14	46
89	2014082302	1408232	23	8	2014	6.4	F/C	18	32	23	32.7370	71.4980	113.08	VI	40.1	11	67

ANEXO B

PARÁMETROS PROCESADOS DE

BASE DE DATOS

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS																
Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	larias	tiAr	tAr	tiBr	tfBr	DurBr	DurReg	
1	1993071601	E-O	0.0052	0.113	F	0.0052	3.51	0.0009	5.56E-06	18.205	33.905	0	0	0	45.50	
1	1993071601	E-O	0.0052	0.113	L	0.0065	5.33	0.0012	1.08E-05	18.01	33.84	0	0	0	45.50	
1	1993071601	E-O	0.0052	0.113	C	0.0095	5.29	0.0018	2.31E-05	8.355	35.485	0	0	0	45.50	
1	1993071601	N-S	0.0076	0.074	F	0.0076	3.78	0.0010	7.26E-06	18.33	31.235	0	0	0	45.50	
1	1993071601	N-S	0.0076	0.074	L	0.0109	5.98	0.0014	1.45E-05	18.39	30.875	22.05	22.335	0.285	45.50	
1	1993071601	N-S	0.0076	0.074	C	0.0212	7.70	0.0027	5.25E-05	10.36	34.815	18.47	26.745	8.275	45.50	
1	1993071601	V	0.0035	0.004	F	0.0035	4.56	0.0006	2.82E-06	8.305	33.895	0	0	0	45.50	
1	1993071601	V	0.0035	0.004	L	0.0037	7.16	0.0007	3.62E-06	5.395	33.585	0	0	0	45.50	
1	1993071601	V	0.0035	0.004	C	0.0065	10.30	0.0009	6.46E-06	4.28	33.345	29.065	5.225	0.95	45.50	
2	1993080601	E-O	0.0080	0.038	F	0.0080	8.12	0.0008	4.97E-06	13.28	22.3	0	0	0	45.00	
2	1993080601	E-O	0.0080	0.038	L	0.0079	8.80	0.0008	4.92E-06	12.555	28.225	0	0	0	45.00	
2	1993080601	E-O	0.0080	0.038	C	0.0148	7.57	0.0016	1.91E-05	13.04	28.355	13.455	14.86	1.405	45.00	
2	1993080601	N-S	0.0074	0.046	F	0.0074	9.30	0.0007	3.97E-06	13.275	23.255	0	0	0	45.00	
2	1993080601	N-S	0.0074	0.046	L	0.0124	8.49	0.0012	1.01E-05	13.29	23.78	14.18	14.2	0.02	45.00	
2	1993080601	N-S	0.0074	0.046	C	0.0125	9.93	0.0018	2.43E-05	9.01	32.46	13.945	14.525	0.58	45.00	
2	1993080601	V	0.0055	0.004	F	0.0055	9.97	0.0006	2.29E-06	10.03	23.115	13.085	13.89	14.05	45.00	
2	1993080601	V	0.0055	0.004	L	0.0109	13.35	0.0011	9.09E-06	9.26	23.04	13.475	15.62	2.145	45.00	
2	1993080601	V	0.0055	0.004	C	0.0157	14.09	0.0016	1.74E-05	7.975	23.515	13.475	17.58	4.105	45.00	
3	1994101001	E-O	0.0070	0.028	F	0.0070	8.72	0.0008	8.39E-06	18.305	48.375	0	0	0	78.08	
3	1994101001	E-O	0.0070	0.028	L	0.0094	9.64	0.0010	1.36E-05	16.07	50.3	0	0	0	78.08	
3	1994101001	E-O	0.0070	0.028	C	0.0098	7.86	0.0017	3.52E-05	13.785	53.52	0	0	0	78.08	
3	1994101001	N-S	0.0053	0.031	F	0.0053	8.30	0.0008	7.07E-06	18.69	50.97	0	0	0	78.08	
3	1994101001	N-S	0.0053	0.031	L	0.0077	9.55	0.0011	1.61E-05	14.215	49.97	35.755	0	0	78.08	
3	1994101001	N-S	0.0053	0.031	C	0.0141	10.11	0.0024	7.37E-05	13.075	56.495	20.295	27.115	6.82	78.08	
3	1994101001	V	0.0041	0.005	F	0.0041	8.80	0.0006	5.08E-06	12.38	44.55	0	0	0	78.08	
3	1994101001	V	0.0041	0.005	L	0.0086	13.04	0.0012	1.85E-05	10.96	44.94	33.98	19.465	28.545	9.08	78.08
3	1994101001	V	0.0041	0.005	C	0.0129	14.20	0.0018	4.18E-05	10.795	42.765	10.93	35.08	24.15	78.08	
4	1994101801	E-O	0.0043	0.011	F	0.0043	5.67	0.0004	8.50E-07	12.16	17.06	0	0	0	27.00	
4	1994101801	E-O	0.0043	0.011	L	0.0032	8.89	0.0004	6.85E-07	11.485	20.455	0	0	0	27.00	
4	1994101801	E-O	0.0043	0.011	C	0.0115	5.84	0.0010	4.30E-06	12.235	17.225	12.56	12.58	0.02	27.00	
4	1994101801	N-S	0.0025	0.023	F	0.0025	7.92	0.0003	2.78E-07	12.22	18.145	0	0	0	27.00	
4	1994101801	N-S	0.0025	0.023	L	0.0072	7.27	0.0007	2.03E-06	12.21	17.835	0	0	0	27.00	
4	1994101801	N-S	0.0025	0.023	C	0.0064	8.63	0.0011	5.60E-06	10.99	19.41	0	0	0	27.00	
4	1994101801	V	0.0022	0.005	F	0.0022	8.11	0.0002	2.39E-07	8.1	19.355	0	0	0	27.00	
4	1994101801	V	0.0022	0.005	L	0.0030	12.68	0.0004	7.40E-07	8.98	18.49	0	0	0	27.00	
4	1994101801	V	0.0022	0.005	C	0.0033	13.83	0.0005	1.24E-06	8.71	18.42	0	0	0	27.00	
5	1994102201	E-O	0.0024	0.003	F	0.0024	12.42	0.0002	3.84E-07	12.075	22.84	0	0	0	40.00	
5	1994102201	E-O	0.0024	0.003	L	0.0034	13.62	0.0004	1.05E-06	8.855	27.735	0	0	0	40.00	
5	1994102201	E-O	0.0024	0.003	C	0.0049	8.90	0.0008	3.77E-06	11.755	26.48	0	0	0	40.00	
5	1994102201	N-S	0.0020	0.004	F	0.0020	13.72	0.0002	3.75E-07	11.11	25.525	0	0	0	40.00	
5	1994102201	N-S	0.0020	0.004	L	0.0032	13.33	0.0004	1.18E-06	8.675	25.945	0	0	0	40.00	
5	1994102201	N-S	0.0020	0.004	C	0.0095	12.69	0.0014	1.23E-05	7.795	28.695	0	0	0	40.00	
5	1994102201	V	0.0016	0.004	F	0.0016	12.69	0.0002	2.96E-07	5.86	31.245	0	0	0	40.00	
5	1994102201	V	0.0016	0.004	L	0.0042	14.08	0.0005	1.34E-06	6.12	23.995	0	0	0	40.00	
5	1994102201	V	0.0016	0.004	C	0.0060	14.80	0.0007	3.54E-06	5.835	25.03	13.27	15.345	2.075	40.00	
6	1994102801	E-O	0.0099	0.070	F	0.0099	6.86	0.0008	7.18E-06	12.135	24.795	0	0	0	63.78	
6	1994102801	E-O	0.0099	0.070	L	0.0077	9.24	0.0007	5.49E-06	12.15	34.25	0	0	0	63.78	
6	1994102801	E-O	0.0099	0.070	C	0.0209	5.33	0.0018	3.19E-05	12.2	31.1	12.275	13.465	1.19	63.78	
6	1994102801	N-S	0.0067	0.086	F	0.0067	8.86	0.0006	3.60E-06	12.215	33.4	0	0	0	63.78	
6	1994102801	N-S	0.0067	0.086	L	0.0183	5.39	0.0014	1.95E-05	12.225	21.945	0	0	0	63.78	
6	1994102801	N-S	0.0067	0.086	C	0.0109	9.76	0.0017	2.81E-05	10.295	43.335	13.72	15.04	1.32	63.78	
6	1994102801	V	0.0047	0.005	F	0.0047	8.44	0.0005	4.41E-06	11.705	31.39	19.685	0	0	63.78	
6	1994102801	V	0.0047	0.005	L	0.0076	12.84	0.0009	8.68E-06	10.185	28.295	12.175	14.99	2.815	63.78	
6	1994102801	V	0.0047	0.005	C	0.0115	14.06	0.0013	1.85E-05	9.28	28.335	12.11	16.805	4.695	63.78	
7	1995011301	E-O	0.0020	0.003	F	0.0020	12.49	0.0002	1.99E-07	15.305	26	0	0	0	50.00	
7	1995011301	E-O	0.0020	0.003	L	0.0031	12.71	0.0003	8.48E-07	10.735	33.545	0	0	0	50.00	
7	1995011301	E-O	0.0020	0.003	C	0.0039	11.09	0.0006	2.44E-06	3.8	35.64	0	0	0	50.00	
7	1995011301	N-S	0.0020	0.005	F	0.0020	12.53	0.0002	2.22E-07	15.245	28.495	0	0	0	50.00	
7	1995011301	N-S	0.0020	0.005	L	0.0027	13.76	0.0004	1.17E-06	10.775	35.565	0	0	0	50.00	
7	1995011301	N-S	0.0020	0.005	C	0.0086	12.88	0.0011	9.86E-06	3.5	34.87	0	0	0	50.00	
7	1995011301	V	0.0012	0.005	F	0.0012	12.80	0.0002	2.41E-07	10.785	35.275	0	0	0	50.00	
7	1995011301	V	0.0012	0.005	L	0.0028	14.01	0.0003	9.62E-07	7.19	30.155	0	0	0	50.00	
7	1995011301	V	0.0012	0.005	C	0.0043	14.91	0.0007	3.43E-06	2.435	29.465	0	0	0	50.00	
8	1995020101	E-O	0.0030	0.005	F	0.0030	13.95	0.0002	3.55E-07	10.11	31.145	0	0	0	45.00	
8	1995020101	E-O	0.0030	0.005	L	0.0029	12.42	0.0004	1.10E-06	10.065	25.695	0	0	0	45.00	
8	1995020101	E-O	0.0030	0.005	C	0.0050	9.22	0.0006	3.00E-06	10.225	26.44	0	0	0	45.00	

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS																
Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	Iarias	tiAr	tAr	Duracion Arias [seg]	tiBr	tfBr	DurBr	DurReg
8	1995020101	N-S	0.0024	0.003	F	0.0024	13.34	0.0002	3.75E-07	10.09	25.345	15.255	0	0	0	45.00
8	1995020101	N-S	0.0024	0.003	L	0.0029	13.36	0.0004	1.00E-06	8.98	24.82	15.84	0	0	0	45.00
8	1995020101	N-S	0.0024	0.003	C	0.0098	11.94	0.0013	1.20E-05	10.08	27.36	17.28	0	0	0	45.00
8	1995020101	V	0.0015	0.006	F	0.0015	12.00	0.0002	2.23E-07	9.895	15.93	6.035	0	0	0	45.00
8	1995020101	V	0.0015	0.006	L	0.0037	13.65	0.0004	1.32E-06	7.605	20.61	13.005	0	0	0	45.00
8	1995020101	V	0.0015	0.006	C	0.0066	14.36	0.0007	3.38E-06	7.175	22.065	14.89	10.645	10.71	0.065	45.00
9	1995031501	E-O	0.0040	0.010	F	0.0040	8.41	0.0004	1.74E-06	12.405	33.985	21.58	0	0	0	65.58
9	1995031501	E-O	0.0040	0.010	L	0.0055	9.01	0.0006	3.47E-06	9.82	38.985	29.165	0	0	0	65.58
9	1995031501	E-O	0.0040	0.010	C	0.0066	6.81	0.0011	1.31E-05	9.65	45.35	35.7	0	0	0	65.58
9	1995031501	N-S	0.0044	0.012	F	0.0044	7.85	0.0004	2.02E-06	12.595	38.535	25.94	0	0	0	65.58
9	1995031501	N-S	0.0044	0.012	L	0.0044	9.48	0.0006	3.68E-06	10.102	37.56	27.54	0	0	0	65.58
9	1995031501	N-S	0.0044	0.012	C	0.0106	8.75	0.0015	2.46E-05	8.13	42.515	34.385	14.66	14.665	0.005	65.58
9	1995031501	V	0.0031	0.004	F	0.0031	9.09	0.0004	1.60E-06	8.98	35.735	26.755	0	0	0	65.58
9	1995031501	V	0.0031	0.004	L	0.0068	12.47	0.0007	4.53E-06	8.26	30.955	22.695	12.75	13.285	0.535	65.58
9	1995031501	V	0.0031	0.004	C	0.0088	13.68	0.0009	8.82E-06	8.01	28.86	20.85	12.555	16.265	3.71	65.58
10	1995040501	E-O	0.0026	0.011	F	0.0026	9.04	0.0004	1.63E-06	15.3	41.775	26.475	0	0	0	78.08
10	1995040501	E-O	0.0026	0.011	L	0.0042	9.17	0.0006	4.70E-06	14.835	49.685	34.85	0	0	0	78.08
10	1995040501	E-O	0.0026	0.011	C	0.0075	7.37	0.0012	1.70E-05	13.895	54.925	41.03	0	0	0	78.08
10	1995040501	N-S	0.0028	0.014	F	0.0028	8.04	0.0004	2.03E-06	14.805	53.18	38.375	0	0	0	78.08
10	1995040501	N-S	0.0028	0.014	L	0.0063	9.89	0.0007	5.59E-06	14.71	46.485	31.775	0	0	0	78.08
10	1995040501	N-S	0.0028	0.014	C	0.0100	8.79	0.0017	3.62E-05	13.65	55.64	41.99	0	0	0	78.08
10	1995040501	V	0.0024	0.006	F	0.0024	9.04	0.0004	1.95E-06	12.25	49.58	37.33	0	0	0	78.08
10	1995040501	V	0.0024	0.006	L	0.0048	12.70	0.0007	5.97E-06	13.32	41.275	27.955	0	0	0	78.08
10	1995040501	V	0.0024	0.006	C	0.0084	13.77	0.0011	1.44E-05	13.275	39.085	25.81	14.015	23.71	9.695	78.08
11	1995043001	E-O	0.0018	0.004	F	0.0018	14.30	0.0003	4.65E-07	9.685	29.035	19.35	0	0	0	41.00
11	1995043001	E-O	0.0018	0.004	L	0.0032	12.53	0.0004	1.23E-06	9.33	27.965	18.635	0	0	0	41.00
11	1995043001	E-O	0.0018	0.004	C	0.0052	9.02	0.0008	4.37E-06	9.82	27.635	17.815	0	0	0	41.00
11	1995043001	N-S	0.0019	0.004	F	0.0019	14.63	0.0002	2.99E-07	9.605	25.5	15.895	0	0	0	41.00
11	1995043001	N-S	0.0019	0.004	L	0.0034	13.02	0.0005	1.61E-06	9.685	25.62	15.935	0	0	0	41.00
11	1995043001	N-S	0.0019	0.004	C	0.0098	11.78	0.0013	1.18E-05	9.4	27.995	18.595	0	0	0	41.00
11	1995043001	V	0.0014	0.003	F	0.0014	13.82	0.0001	1.40E-07	9.31	19.815	10.505	0	0	0	41.00
11	1995043001	V	0.0014	0.003	L	0.0042	14.83	0.0005	1.79E-06	9.11	23.035	13.925	0	0	0	41.00
11	1995043001	V	0.0014	0.003	C	0.0061	15.27	0.0008	3.92E-06	8.94	22.975	14.035	10.925	11.38	0.455	41.00
12	1995060201	E-O	0.0040	0.023	F	0.0040	7.71	0.0005	2.81E-06	15.195	52.155	36.96	0	0	0	78.08
12	1995060201	E-O	0.0040	0.023	L	0.0041	9.05	0.0006	4.97E-06	14.435	50.855	36.42	0	0	0	78.08
12	1995060201	E-O	0.0040	0.023	C	0.0073	6.97	0.0013	2.23E-05	11.735	53.585	41.85	0	0	0	78.08
12	1995060201	N-S	0.0026	0.020	F	0.0026	7.67	0.0004	2.15E-06	15.375	55.025	39.65	0	0	0	78.08
12	1995060201	N-S	0.0026	0.020	L	0.0051	9.53	0.0007	6.25E-06	14.04	50.425	36.385	0	0	0	78.08
12	1995060201	N-S	0.0026	0.020	C	0.0096	8.98	0.0018	4.06E-05	13.18	54.585	41.405	0	0	0	78.08
12	1995060201	V	0.0027	0.006	F	0.0027	8.40	0.0004	1.57E-06	10.505	42.28	31.775	0	0	0	78.08
12	1995060201	V	0.0027	0.006	L	0.0053	12.46	0.0006	5.06E-06	10.315	42.39	32.075	16.005	16.005	0	78.08
12	1995060201	V	0.0027	0.006	C	0.0066	13.86	0.0009	1.11E-05	10.145	41.96	31.815	15.675	23.655	7.98	78.08
13	1995061201	E-O	0.0034	0.020	F	0.0034	11.31	0.0004	1.88E-06	5.565	40.41	34.845	0	0	0	67.88
13	1995061201	E-O	0.0034	0.020	L	0.0052	11.87	0.0005	3.26E-06	5.525	43.13	37.605	0	0	0	67.88
13	1995061201	E-O	0.0034	0.020	C	0.0074	8.40	0.0011	1.34E-05	6.015	45.24	39.225	0	0	0	67.88
13	1995061201	N-S	0.0043	0.019	F	0.0043	12.00	0.0003	1.26E-06	5.355	31.335	25.98	0	0	0	67.88
13	1995061201	N-S	0.0043	0.019	L	0.0050	11.66	0.0006	4.40E-06	5.69	40.295	34.605	5.725	5.73	0.005	67.88
13	1995061201	N-S	0.0043	0.019	C	0.0109	11.46	0.0017	3.02E-05	5.605	45.555	39.95	0	0	0	67.88
13	1995061201	V	0.0024	0.004	F	0.0024	11.48	0.0003	9.98E-07	5.255	43.28	38.025	0	0	0	67.88
13	1995061201	V	0.0024	0.004	L	0.0056	13.90	0.0007	4.63E-06	5.21	36.81	31.6	5.515	5.555	0.04	67.88
13	1995061201	V	0.0024	0.004	C	0.0092	14.99	0.0010	1.16E-05	5.145	35.945	30.8	5.15	7.915	2.765	67.88
14	1995062801	E-O	0.0009	0.005	F	0.0009	11.92	0.0002	2.35E-07	10.775	53.945	43.17	0	0	0	63.08
14	1995062801	E-O	0.0009	0.005	L	0.0018	12.29	0.0003	6.33E-07	6.86	48.22	41.36	0	0	0	63.08
14	1995062801	E-O	0.0009	0.005	C	0.0036	7.57	0.0005	2.42E-06	16.325	52.555	36.23	0	0	0	63.08
14	1995062801	N-S	0.0008	0.007	F	0.0008	10.38	0.0002	2.81E-07	11.445	53.2	41.755	0	0	0	63.08
14	1995062801	N-S	0.0008	0.007	L	0.0017	12.18	0.0002	4.65E-07	14.095	52.625	38.53	0	0	0	63.08
14	1995062801	N-S	0.0008	0.007	C	0.0047	9.75	0.0009	7.32E-06	7.565	49.585	42.02	0	0	0	63.08
14	1995062801	V	0.0007	0.004	F	0.0007	10.44	0.0002	2.71E-07	11.89	53.275	41.385	0	0	0	63.08
14	1995062801	V	0.0007	0.004	L	0.0010	12.14	0.0002	3.45E-07	14.445	48.86	34.415	0	0	0	63.08
14	1995062801	V	0.0007	0.004	C	0.0016	15.10	0.0003	6.93E-07	10.85	50.26	39.41	0	0	0	63.08
15	1995092201	E-O	0.0024	0.008	F	0.0024	7.52	0.0003	6.90E-07	13.63	27.985	14.355	0	0	0	46.36
15	1995092201	E-O	0.0024	0.008	L	0.0042	8.57	0.0004	1.17E-06	12.57	30.56	17.99	0	0	0	46.36
15	1995092201	E-O	0.0024	0.008	C	0.0045	6.63	0.0008	4.76E-06	13.415	30.565	17.15	0	0	0	46.36
15	1995092201	N-S	0.0021	0.010	F	0.0021	8.01	0.0003	5.71E-07	12.555	33.49	20.935	0	0	0	46.36
15	1995092201	N-S	0.0021	0.010	L	0.0036	8.54	0.0005	1.54E-06	13.59	28.31	14.72	0	0	0	46.36
15	1995092201	N-S	0.0021	0.010	C	0.0090	8.27	0.0012	1.02E-05	11.89	32.805	20.915	0	0	0	46.36

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS																
Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	larias	tiAr	tAr	Duración Arias [seg]	tiBr	tfBr	DurBr	DurReg
16	1995100901	E-O	0.0043	0.019	F	0.0043	9.78	0.0007	3.79E-06	13.17	32.76	19.59	0	0	0	47.36
16	1995100901	E-O	0.0043	0.019	L	0.0071	9.73	0.0010	7.53E-06	12.505	33.58	21.075	0	0	0	47.36
16	1995100901	E-O	0.0043	0.019	C	0.0071	8.74	0.0015	1.73E-05	11.325	36.335	25.01	0	0	0	47.36
16	1995100901	N-S	0.0045	0.019	F	0.0045	9.20	0.0007	3.41E-06	13.37	32.035	18.665	0	0	0	47.36
16	1995100901	N-S	0.0045	0.019	L	0.0051	10.76	0.0010	7.63E-06	10.805	34.825	24.02	0	0	0	47.36
16	1995100901	N-S	0.0045	0.019	C	0.0137	10.79	0.0025	4.26E-05	10.195	36.43	26.235	15.33	21.7	6.37	47.36
16	1995100901	V	0.0040	0.004	F	0.0040	9.41	0.0005	2.56E-06	9.55	33.575	24.025	0	0	0	47.36
16	1995100901	V	0.0040	0.004	L	0.0078	13.40	0.0011	9.07E-06	8.645	31.52	22.875	15.84	18.785	2.945	47.36
16	1995100901	V	0.0040	0.004	C	0.0111	14.40	0.0017	2.07E-05	8.31	30.53	22.22	13.885	21.83	7.945	47.36
17	1995102201	E-O	0.0016	0.005	F	0.0016	11.07	0.0003	4.47E-07	12.585	24.81	12.225	0	0	0	35.68
17	1995102201	E-O	0.0016	0.005	L	0.0031	11.11	0.0005	1.26E-06	10.215	26.59	16.375	0	0	0	35.68
17	1995102201	N-S	0.0018	0.004	F	0.0018	10.89	0.0003	4.19E-07	10.535	26.2	15.665	0	0	0	35.68
17	1995102201	N-S	0.0018	0.004	L	0.0026	12.57	0.0005	1.23E-06	9.66	26.63	16.97	0	0	0	35.68
17	1995102201	V	0.0018	0.003	F	0.0018	10.73	0.0002	2.14E-07	7.245	19.43	12.185	0	0	0	35.68
17	1995102201	V	0.0018	0.003	L	0.0027	13.41	0.0005	1.32E-06	8.55	24.53	15.98	0	0	0	35.68
18	1995112701	E-O	0.0052	0.009	F	0.0052	7.82	0.0005	9.19E-07	9.69	13.175	3.485	0	0	0	19.95
18	1995112701	E-O	0.0052	0.009	L	0.0050	9.57	0.0006	1.16E-06	8.54	14.07	5.53	0	0	0	19.95
18	1995112701	E-O	0.0052	0.009	C	0.0098	7.28	0.0014	5.86E-06	7.36	14.155	6.795	0	0	0	19.95
18	1995112701	N-S	0.0032	0.012	F	0.0032	8.72	0.0004	5.63E-07	9.59	13.82	4.23	0	0	0	19.95
18	1995112701	N-S	0.0032	0.012	L	0.0074	8.79	0.0008	1.91E-06	9.17	13.71	4.54	0	0	0	19.95
18	1995112701	N-S	0.0032	0.012	C	0.0113	10.25	0.0017	9.12E-06	6.89	14.525	7.635	10.845	10.855	0.01	19.95
18	1995112701	V	0.0027	0.004	F	0.0027	9.12	0.0004	5.60E-07	6.89	14.315	7.425	0	0	0	19.95
18	1995112701	V	0.0027	0.004	L	0.0050	11.94	0.0007	1.51E-06	6.365	13.855	7.49	0	0	0	19.95
18	1995112701	V	0.0027	0.004	C	0.0073	13.58	0.0010	3.23E-06	6.05	14.015	7.965	10.78	11.09	0.31	19.95
19	1996010301	E-O	0.0056	0.011	F	0.0056	8.29	0.0006	1.45E-06	11.89	17.475	5.585	0	0	0	27.02
19	1996010301	E-O	0.0056	0.011	L	0.0032	10.53	0.0006	1.32E-06	8.095	20.785	12.69	0	0	0	27.02
19	1996010301	E-O	0.0056	0.011	C	0.0056	7.87	0.0011	5.61E-06	7.4	20.92	13.52	0	0	0	27.02
19	1996010301	N-S	0.0047	0.015	F	0.0047	8.50	0.0005	1.24E-06	11.85	17.585	5.735	0	0	0	27.02
19	1996010301	N-S	0.0047	0.015	L	0.0041	10.52	0.0007	1.93E-06	5.495	20.335	14.84	0	0	0	27.02
19	1996010301	N-S	0.0044	0.006	F	0.0109	9.32	0.0017	1.26E-05	8.075	21.19	13.115	12.38	12.39	0.01	27.02
19	1996010301	V	0.0044	0.006	F	0.0044	9.11	0.0006	1.46E-06	7.415	19.53	12.115	0	0	0	27.02
19	1996010301	V	0.0044	0.006	L	0.0079	12.51	0.0010	3.99E-06	6.4	17.54	11.14	12.47	13.625	1.155	27.02
19	1996010301	V	0.0044	0.006	C	0.0101	13.55	0.0014	8.90E-06	6.095	17.435	11.34	12.335	15.745	3.41	27.02
20	1996022201	E-O	0.0506	0.324	F	0.0506	7.48	0.0056	2.23E-04	12.345	23.93	11.585	11.845	22.63	11.845	45.16
20	1996022201	E-O	0.0506	0.324	L	0.0386	8.11	0.0050	1.78E-04	7.29	26.79	19.5	6.965	23.77	16.805	45.16
20	1996022201	E-O	0.0506	0.324	C	0.0452	7.51	0.0061	2.67E-04	7.55	27.69	19.935	6.95	24.905	17.955	45.16
20	1996022201	N-S	0.0618	0.339	F	0.0618	6.24	0.0061	2.66E-04	12.52	22.795	10.275	11.955	21.75	9.795	45.16
20	1996022201	N-S	0.0618	0.339	L	0.0367	6.51	0.0048	1.66E-04	8.805	27.94	19.135	7.68	24.86	17.18	45.16
20	1996022201	N-S	0.0618	0.339	C	0.0576	7.38	0.0069	3.47E-04	8.345	29.545	21.2	6.1	31.095	24.995	45.16
20	1996022201	V	0.0424	0.012	F	0.0424	8.44	0.0045	1.45E-04	6.915	24.1	17.185	4.285	30.025	25.74	45.16
20	1996022201	V	0.0424	0.012	L	0.0712	12.28	0.0080	4.64E-04	5.87	23.15	17.28	2.045	36.075	34.03	45.16
20	1996022201	V	0.0424	0.012	C	0.0953	13.29	0.0121	1.06E-03	5.735	23.14	17.405	1.83	36.8	34.97	45.16
21	1996030201	E-O	0.0077	0.009	F	0.0077	9.98	0.0007	2.94E-06	8.96	16.375	7.415	0	0	0	41.76
21	1996030201	E-O	0.0077	0.009	L	0.0056	11.36	0.0007	3.48E-06	9.145	25.79	16.645	0	0	0	41.76
21	1996030201	E-O	0.0077	0.009	C	0.0093	8.47	0.0013	1.17E-05	8.98	28.525	13.745	0	0	0	41.76
21	1996030201	N-S	0.0055	0.012	F	0.0055	12.38	0.0006	2.35E-06	8.915	22.66	13.745	0	0	0	41.76
21	1996030201	N-S	0.0055	0.012	L	0.0064	10.58	0.0008	4.38E-06	8.815	24.79	15.975	0	0	0	41.76
21	1996030201	N-S	0.0055	0.012	C	0.0146	11.00	0.0018	2.27E-05	9.04	28.11	19.07	9.26	11.295	2.035	41.76
21	1996030201	V	0.0053	0.005	F	0.0053	10.02	0.0006	2.04E-06	8.72	19.635	10.915	9.32	9.325	0.005	41.76
21	1996030201	V	0.0053	0.005	L	0.0093	13.32	0.0011	7.56E-06	8.735	20.13	11.395	8.28	11.815	3.085	41.76
21	1996030201	V	0.0053	0.005	C	0.0156	14.26	0.0017	1.95E-05	8.77	19.155	10.385	8.73	13.18	4.9	41.76
22	1996072301	E-O	0.0084	0.010	F	0.0084	11.29	0.0006	2.61E-06	10.265	21.995	11.73	0	0	0	42.36
22	1996072301	E-O	0.0084	0.010	L	0.0063	11.14	0.0008	4.46E-06	10.275	25.48	15.205	0	0	0	42.36
22	1996072301	E-O	0.0084	0.010	C	0.0110	9.37	0.0012	1.03E-05	10.3	28.805	18.505	10.62	10.63	0.01	42.36
22	1996072301	N-S	0.0063	0.013	F	0.0063	11.48	0.0006	2.24E-06	10.25	23.695	13.445	0	0	0	42.36
22	1996072301	N-S	0.0063	0.013	L	0.0074	11.57	0.0009	5.08E-06	10.27	26.09	15.82	0	0	0	42.36
22	1996072301	N-S	0.0063	0.013	C	0.0156	10.56	0.0019	2.36E-05	10.195	28.675	18.48	10.445	11.41	0.965	42.36
22	1996072301	V	0.0058	0.003	F	0.0058	11.00	0.0005	1.60E-06	10.08	22.6	12.52	10.335	10.97	0.635	42.36
22	1996072301	V	0.0058	0.003	L	0.0092	13.51	0.0010	6.35E-06	10.08	22.525	12.445	10.335	12.91	2.175	42.36
22	1996072301	V	0.0058	0.003	C	0.0129	14.46	0.0015	1.45E-05	9.88	23.035	13.155	10.135	15.77	5.635	42.36
23	1996090801	E-O	0.0049	0.047	F	0.0049	7.54	0.0010	7.12E-06	14.475	36.025	21.55	0	0	0	47.36
23	1996090801	E-O	0.0049	0.047	L	0.0064	8.48	0.0012	1.09E-05	10.83	37.45	26.62	0	0	0	47.36
23	1996090801	E-O	0.0049	0.047	C	0.0093	7.08	0.0018	2.57E-05	10.45	37.38	26.93	0	0	0	47.36
23	1996090801	N-S	0.0044	0.047	F	0.0044	7.70	0.0009	5.76E-06	14.395	36.285	21.89	0	0	0	47.36
23	1996090801	N-S	0.0044	0.047	L	0.0070	8.34	0.0013	1.32E-05	11.265	36.4	25.135	0	0	0	47.36
23	1996090801	N-S	0.0044	0.047	C	0.0117	9.18	0.0025	4.85E-05	9.45	37.755	28.305	20.29	26.655	6.365	47.36

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS

Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	larias	tiAr	tAr	Duración Arias [seg]	tiBr	tfBr	DurBr	DurReg
23	1996090801	V	0.0054	0.004	F	0.0054	7.71	0.0008	4.93E-06	8.375	36.365	27.99	18.38	18.395	0.015	47.36
23	1996090801	V	0.0054	0.004	L	0.0080	11.99	0.0013	1.32E-05	8.52	36.195	27.675	16.595	23.185	6.59	47.36
23	1996090801	V	0.0054	0.004	F	0.0117	13.39	0.0019	2.78E-05	8.42	36.075	27.655	11.005	32.82	21.815	47.36
24	1996101801	E-O	0.0079	0.039	C	0.0079	5.34	0.0007	3.80E-06	15.335	29.1	13.765	0	0	0	47.36
24	1996101801	E-O	0.0079	0.039	L	0.0051	7.82	0.0007	4.01E-06	15.26	34.035	18.775	0	0	0	47.36
24	1996101801	E-O	0.0079	0.039	C	0.0122	6.16	0.0014	1.46E-05	15.18	35.41	20.23	15.455	16.025	0.57	47.36
24	1996101801	N-S	0.0037	0.062	L	0.0037	6.43	0.0005	1.62E-06	15.195	32.095	16.9	0	0	0	47.36
24	1996101801	N-S	0.0037	0.062	L	0.0009	7.16	0.0009	6.74E-06	15.36	32.045	16.685	0	0	0	47.36
24	1996101801	N-S	0.0037	0.062	C	0.0104	8.54	0.0018	2.45E-05	13.46	37.795	24.335	19.43	19.435	0.005	47.36
24	1996101801	V	0.0025	0.006	F	0.0025	7.44	0.0004	1.13E-06	12.025	34.075	22.05	0	0	0	47.36
24	1996101801	V	0.0025	0.006	L	0.0045	12.15	0.0007	3.28E-06	9.365	34.865	25.5	0	0	0	47.36
24	1996101801	V	0.0025	0.006	C	0.0061	13.66	0.0009	6.70E-06	9.195	34.905	25.71	17.37	17.99	0.62	47.36
25	1997020501	E-O	0.0083	0.054	F	0.0083	7.13	0.0008	3.58E-06	17.02	24.07	7.05	0	0	0	36.20
25	1997020501	N-S	0.0057	0.027	C	0.0088	7.68	0.0013	1.01E-05	11.845	27.015	15.17	0	0	0	36.20
25	1997020501	N-S	0.0057	0.027	F	0.0057	7.09	0.0006	2.37E-06	17.08	24.21	7.13	0	0	0	36.20
25	1997020501	V	0.0050	0.010	F	0.0114	9.67	0.0017	1.72E-05	9.495	28.395	18.9	17.735	17.755	0.02	36.20
25	1997020501	V	0.0050	0.010	F	0.0050	7.84	0.0006	1.95E-06	11.975	24.905	12.93	17.635	17.635	0	36.20
25	1997020501	V	0.0050	0.010	C	0.0098	13.44	0.0015	1.31E-05	7.355	25.875	18.52	17.05	20.995	3.945	36.20
26	1997032401	E-O	0.0595	0.150	F	0.0595	10.77	0.0045	1.96E-04	9.5	23.57	14.07	9.01	18.68	9.67	59.23
26	1997032401	E-O	0.0595	0.150	C	0.0364	9.57	0.0044	1.81E-04	6.735	36.705	29.97	5.46	21.25	15.79	59.23
26	1997032401	N-S	0.0515	0.165	F	0.0515	10.98	0.0047	2.12E-04	9.46	22.935	13.475	9	18.325	9.325	59.23
26	1997032401	N-S	0.0515	0.165	C	0.0570	9.61	0.0063	3.77E-04	8.68	34.86	26.18	4.92	31.035	26.115	59.23
26	1997032401	V	0.0300	0.013	F	0.0300	10.47	0.0034	1.12E-04	9.06	24	14.94	6.11	32.33	26.22	59.23
26	1997032401	V	0.0300	0.013	F	0.0300	10.47	0.0034	1.12E-04	9.06	24	14.94	6.11	32.33	26.22	59.23
26	1997032401	V	0.0300	0.013	C	0.0977	14.08	0.0116	1.27E-03	5.87	23.37	17.5	1.17	43.9	42.73	59.23
27	1997060801	E-O	0.0019	0.012	F	0.0019	8.81	0.0002	3.13E-07	14.33	24.15	9.82	0	0	0	47.36
27	1997060801	E-O	0.0019	0.012	C	0.0044	7.42	0.0002	2.72E-06	13.035	33.1	20.065	0	0	0	47.36
27	1997060801	N-S	0.0024	0.006	F	0.0024	9.69	0.0002	3.12E-07	14.535	31.3	16.765	0	0	0	47.36
27	1997060801	N-S	0.0024	0.006	C	0.0057	9.42	0.0008	5.43E-06	12.02	34.165	22.145	0	0	0	47.36
27	1997060801	V	0.0011	0.005	F	0.0011	10.12	0.0001	1.28E-07	11.69	25.85	25.32	0	0	0	47.36
27	1997060801	V	0.0011	0.005	F	0.0029	14.13	0.0005	1.54E-06	8.165	33.485	14.175	0	0	0	47.36
28	1997061901	E-O	0.0149	0.157	F	0.0149	5.48	0.0020	2.86E-05	12.595	20.76	8.165	12.6	15.315	2.715	44.36
28	1997061901	E-O	0.0149	0.157	C	0.0242	5.04	0.0026	4.78E-05	12.48	26.87	14.39	12.53	16.83	4.3	44.36
28	1997061901	N-S	0.0174	0.117	F	0.0174	5.33	0.0019	2.51E-05	12.46	20.71	8.29	12.565	15.155	2.59	44.36
28	1997061901	N-S	0.0174	0.117	C	0.0297	6.62	0.0033	7.87E-05	12.315	27.665	15.35	12.445	19.03	6.585	44.36
28	1997061901	V	0.0108	0.007	F	0.0108	7.15	0.0013	1.17E-05	12.53	21.995	9.465	12.67	16.36	3.69	44.36
28	1997061901	V	0.0108	0.007	C	0.0308	13.51	0.0030	6.51E-05	9.66	23.645	13.985	7.51	22.14	14.63	44.36
29	1997101401	E-O	0.0197	0.491	F	0.0197	4.50	0.0030	1.53E-04	27.8	81.765	53.965	36.235	64.04	27.805	106.00
29	1997101401	E-O	0.0197	0.491	L	0.0514	2.98	0.0091	1.43E-03	28.175	76.76	48.585	18.845	95.175	76.33	106.00
29	1997101401	E-O	0.0197	0.491	C	0.0379	2.82	0.0055	5.21E-04	26.79	75.73	48.94	25.265	69.5	44.235	106.00
29	1997101401	N-S	0.0176	0.306	F	0.0176	4.58	0.0029	1.43E-04	26.73	83.345	56.615	38.885	57.605	18.72	106.00
29	1997101401	N-S	0.0176	0.306	L	0.0324	2.29	0.0047	3.73E-04	29.465	74.475	45.01	25.43	68.81	43.38	106.00
29	1997101401	N-S	0.0176	0.306	C	0.0327	4.20	0.0057	5.57E-04	23.44	82.19	58.75	16.83	85.995	69.165	106.00
29	1997101401	V	0.0149	0.084	F	0.0149	5.34	0.0024	9.60E-05	17.835	75.81	57.975	15.22	72.855	57.635	106.00
29	1997101401	V	0.0149	0.084	L	0.0190	9.60	0.0032	1.71E-04	15.23	73.69	58.46	7.815	85.925	78.11	106.00
29	1997101401	V	0.0149	0.084	C	0.0255	12.04	0.0043	3.15E-04	13.87	72.195	58.325	6.825	89.86	83.035	106.00
30	1998011201	E-O	0.0062	0.188	F	0.0062	2.82	0.0011	9.94E-06	14.16	37.84	23.68	0	0	0	47.36
30	1998011201	E-O	0.0062	0.188	L	0.0083	2.71	0.0016	1.83E-05	14.93	36.915	21.985	0	0	0	47.36
30	1998011201	E-O	0.0062	0.188	C	0.0096	3.50	0.0019	2.68E-05	13.665	37.595	23.93	0	0	0	47.36
30	1998011201	N-S	0.0069	0.193	F	0.0069	2.39	0.0012	1.08E-05	15.14	35.365	20.225	0	0	0	47.36
30	1998011201	N-S	0.0069	0.193	L	0.0079	2.77	0.0016	1.88E-05	14.175	37.54	23.365	0	0	0	47.36
30	1998011201	N-S	0.0069	0.193	C	0.0107	4.81	0.0022	3.67E-05	12	37.165	25.165	23.06	23.175	0.115	47.36
30	1998011201	V	0.0040	0.017	F	0.0040	4.27	0.0007	4.00E-06	11.9	38.12	26.22	0	0	0	47.36
30	1998011201	V	0.0040	0.017	L	0.0053	7.18	0.0009	5.62E-06	11.665	36.86	25.195	16.985	16.99	0.005	47.36
30	1998011201	V	0.0040	0.017	C	0.0066	9.45	0.0010	8.09E-06	11.025	36.445	25.42	14.01	16.995	2.985	47.36
31	1998041701	E-O	0.0047	0.017	F	0.0047	7.99	0.0007	3.79E-06	13.39	33.905	20.515	0	0	0	45.86
31	1998041701	E-O	0.0047	0.017	L	0.0062	8.22	0.0009	5.55E-06	12.33	33.72	21.39	0	0	0	45.86
31	1998041701	E-O	0.0047	0.017	C	0.0066	6.87	0.0014	1.54E-05	10.24	35.93	25.69	0	0	0	45.86
31	1998041701	N-S	0.0041	0.022	F	0.0041	7.75	0.0007	3.38E-06	13.6	33.555	19.955	0	0	0	45.86
31	1998041701	N-S	0.0041	0.022	L	0.0047	8.15	0.0009	6.31E-06	10.53	35.58	25.05	0	0	0	45.86
31	1998041701	N-S	0.0041	0.022	C	0.0020	8.68	0.0020	3.05E-05	10.79	35.655	24.865	0	0	0	45.86
31	1998041701	V	0.0037	0.004	F	0.0037	8.21	0.0006	2.80E-06	9.235	32.45	23.215	0	0	0	45.86
31	1998041701	V	0.0037	0.004	L	0.0061	11.55	0.0010	7.45E-06	8.83	32.645	23.815	17.34	19.01	1.67	45.86
31	1998041701	V	0.0037	0.004	C	0.0086	13.01	0.0015	1.57E-05	8.765	32.69	23.925	13.585	25.425	11.84	45.86
32	1998050301	E-O	0.0072	0.041	F	0.0072	9.05	0.0009	6.09E-06	11.07	23.415	12.345	0	0	0	43.36
32	1998050301	E-O	0.0072	0.041	L	0.0066	10.70	0.0009	5.79E-06	9.11	30.205	21.095	0	0	0	43.36
32	1998050301	E-O	0.0072	0.041	C	0.0153	8.29	0.0017	2.02E-05	8.84	29.81	20.97	11.62	13.125	1.505	43.36

Ind.	Evento	Orient.	PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS													DurReg
			PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	larias	tiAr	tAr	Duracion Arias [seg]	tiBr	tfBr	DurBr	
32	1998050301	N-S	0.0089	0.053	F	0.0089	9.32	0.0009	6.19E-06	11.315	23.89	12.575	0	0	43.36	
32	1998050301	N-S	0.0089	0.053	L	0.0106	9.36	0.0012	9.59E-06	8.42	27.74	19.32	11.93	11.935	43.36	
32	1998050301	N-S	0.0089	0.053	F	0.0136	9.92	0.0021	3.07E-05	8.93	32.18	23.25	12.14	13.94	43.36	
32	1998050301	V	0.0080	0.004	C	0.0080	9.19	0.0009	5.82E-06	8.705	21.725	13.02	11.525	13.915	43.36	
32	1998050301	V	0.0080	0.004	L	0.0117	12.00	0.0015	1.62E-05	7.33	23.115	15.785	10.48	15.575	43.36	
32	1998050301	V	0.0080	0.004	C	0.0179	12.96	0.0023	3.55E-05	6.665	23.645	16.98	5.795	18.85	43.36	
33	1998072901	E-O	0.0202	0.118	F	0.0202	8.15	0.0026	7.93E-05	17.59	48.205	30.615	17.475	30.05	76.04	
33	1998072901	E-O	0.0202	0.118	L	0.0183	7.08	0.0033	1.31E-04	17.215	47.435	37.53	17.55	45.335	76.04	
33	1998072901	E-O	0.0202	0.118	C	0.0234	5.94	0.0038	1.80E-04	15.42	52.445	37.025	17.55	45.335	76.04	
33	1998072901	N-S	0.0150	0.126	F	0.0150	7.86	0.0025	7.43E-05	17.4	47.665	30.265	17.47	32.12	76.04	
33	1998072901	N-S	0.0150	0.126	L	0.0193	5.35	0.0030	1.09E-04	16.72	50.29	33.57	18.03	34.02	76.04	
33	1998072901	N-S	0.0150	0.126	C	0.0290	7.54	0.0044	2.36E-04	14.66	54.935	40.275	15.375	46.05	76.04	
33	1998072901	V	0.0134	0.005	F	0.0134	8.40	0.0021	5.54E-05	11.705	46.045	34.34	9.249	40.27	76.04	
33	1998072901	V	0.0134	0.005	L	0.0208	12.17	0.0035	1.53E-04	9.705	44.73	35.025	5.245	47.205	76.04	
33	1998072901	V	0.0134	0.005	C	0.0315	13.61	0.0053	3.44E-04	9.385	44.23	34.845	4.675	55.885	76.04	
34	1998080101	E-O	0.0030	0.011	F	0.0030	7.89	0.0004	1.24E-06	14.665	32.395	17.73	0	0	47.36	
34	1998080101	E-O	0.0030	0.011	L	0.0040	8.32	0.0005	2.07E-06	12.615	34.125	21.51	0	0	47.36	
34	1998080101	E-O	0.0030	0.011	C	0.0050	6.31	0.0010	7.48E-06	14.56	33.735	19.175	0	0	47.36	
34	1998080101	N-S	0.0033	0.015	F	0.0033	7.80	0.0004	1.11E-06	15	31.645	16.645	0	0	47.36	
34	1998080101	N-S	0.0033	0.015	L	0.0044	8.17	0.0006	2.36E-06	11.41	35.495	24.085	0	0	47.36	
34	1998080101	N-S	0.0033	0.015	C	0.0083	8.14	0.0014	1.58E-05	13.18	34.9	21.72	0	0	47.36	
34	1998080101	V	0.0022	0.007	F	0.0022	8.07	0.0003	7.26E-07	10.845	31.865	21.02	0	0	47.36	
34	1998080101	V	0.0022	0.007	L	0.0031	11.46	0.0005	1.78E-06	9.175	30.895	21.72	0	0	47.36	
34	1998080101	V	0.0022	0.007	C	0.0039	13.23	0.0007	3.26E-06	11.235	31.36	24.025	0	0	47.36	
35	1998101001	E-O	0.0054	0.083	F	0.0054	3.29	0.0010	5.61E-06	13.255	29.77	16.515	0	0	38.42	
35	1998101001	E-O	0.0054	0.083	L	0.0134	2.44	0.0021	2.68E-05	17.32	27.665	10.345	25.62	26.115	0.495	
35	1998101001	E-O	0.0054	0.083	C	0.0127	3.79	0.0012	2.68E-05	11.18	28.61	17.43	24.59	24.905	0.315	
35	1998101001	N-S	0.0045	0.074	F	0.0045	2.90	0.0009	5.44E-06	13.39	28.945	15.555	0	0	38.42	
35	1998101001	N-S	0.0045	0.074	L	0.0122	3.38	0.0016	1.67E-05	13.605	28.585	14.98	24.63	24.87	38.42	
35	1998101001	N-S	0.0045	0.074	C	0.0156	4.83	0.0024	3.62E-05	10.84	29.09	18.25	21.295	27.405	6.11	
35	1998101001	V	0.0025	0.005	F	0.0025	5.38	0.0006	1.94E-06	5.425	29.475	24.05	0	0	38.42	
35	1998101001	V	0.0025	0.005	L	0.0033	8.02	0.0007	3.00E-06	4.435	28.75	24.315	0	0	38.42	
35	1998101001	V	0.0025	0.005	C	0.0036	9.80	0.0008	4.27E-06	4.04	28.625	24.585	0	0	38.42	
36	1998102901	E-O	0.0111	0.079	F	0.0111	7.53	0.0014	1.65E-05	10.36	30.38	18.02	13.56	15.265	1.705	
36	1998102901	E-O	0.0111	0.079	L	0.0099	7.69	0.0012	1.23E-05	12.09	37.535	25.445	0	0	54.60	
36	1998102901	E-O	0.0111	0.079	C	0.0103	6.54	0.0019	3.24E-05	11.54	42.835	31.295	14.195	15.265	1.07	
36	1998102901	N-S	0.0098	0.070	F	0.0098	7.47	0.0012	1.21E-05	12.47	29.455	16.985	0	0	54.60	
36	1998102901	N-S	0.0098	0.070	L	0.0080	7.21	0.0013	1.47E-05	12.065	38.615	26.55	0	0	54.60	
36	1998102901	N-S	0.0098	0.070	C	0.0149	8.84	0.0025	5.38E-05	9.61	40.61	31	12.555	17.015	4.46	
36	1998102901	V	0.0078	0.005	F	0.0078	7.02	0.0010	9.54E-06	12.31	29.075	16.765	12.725	17.09	4.365	
36	1998102901	V	0.0078	0.005	L	0.0125	10.78	0.0016	2.18E-05	10.565	31.54	20.975	12.3	21.985	9.685	
36	1998102901	V	0.0078	0.005	C	0.0161	12.68	0.0023	4.51E-05	9.3	32.335	23.035	7.91	26.865	18.955	
37	1998102902	E-O	0.0037	0.006	F	0.0037	12.62	0.0005	1.67E-06	12.755	28.745	15.99	0	0	45.86	
37	1998102902	E-O	0.0037	0.006	L	0.0043	12.39	0.0006	2.41E-06	10.645	31.485	20.84	0	0	45.86	
37	1998102902	E-O	0.0037	0.006	C	0.0060	9.47	0.0009	6.60E-06	9.99	32.56	22.57	0	0	45.86	
37	1998102902	N-S	0.0034	0.006	F	0.0034	12.95	0.0003	8.10E-07	12.65	31.32	18.67	0	0	45.86	
37	1998102902	N-S	0.0034	0.006	L	0.0049	11.74	0.0007	3.29E-06	9.06	32.555	23.495	0	0	45.86	
37	1998102902	N-S	0.0034	0.006	C	0.0113	12.73	0.0016	1.92E-05	10.125	33.135	23.01	15.37	15.38	0.01	
37	1998102902	V	0.0024	0.003	F	0.0024	11.44	0.0003	7.85E-07	8.915	32.735	23.82	0	0	45.86	
37	1998102902	V	0.0024	0.003	L	0.0055	13.64	0.0008	4.15E-06	8.335	28.04	19.705	13.51	13.645	0.135	
37	1998102902	V	0.0024	0.003	C	0.0108	14.37	0.0013	1.19E-05	8.375	27.95	19.575	12.59	17.405	4.815	
38	1998112701	E-O	0.0044	0.016	F	0.0044	8.08	0.0006	2.54E-06	15.125	30.515	15.39	0	0	47.36	
38	1998112701	E-O	0.0044	0.016	L	0.0041	8.04	0.0005	1.98E-06	14.565	34.46	19.895	0	0	47.36	
38	1998112701	E-O	0.0044	0.016	C	0.0099	6.83	0.0010	8.19E-06	13.435	37.105	23.67	0	0	47.36	
38	1998112701	N-S	0.0051	0.021	F	0.0051	6.52	0.0005	1.73E-06	15.14	29.64	14.5	0	0	47.36	
38	1998112701	N-S	0.0051	0.021	L	0.0065	7.88	0.0007	3.77E-06	14.4	34.37	19.97	0	0	47.36	
38	1998112701	N-S	0.0051	0.021	C	0.0087	8.68	0.0013	1.36E-05	13.81	30.71	24.595	0	0	47.36	
38	1998112701	V	0.0020	0.005	F	0.0020	7.98	0.0003	5.99E-07	12.11	37.105	17.6	0	0	47.36	
38	1998112701	V	0.0020	0.005	L	0.0037	12.20	0.0006	2.51E-06	10.31	33.365	23.055	0	0	47.36	
38	1998112701	V	0.0020	0.005	C	0.0088	13.62	0.0008	5.26E-06	10.21	33.865	23.655	17.575	21.365	3.79	
39	1998122001	E-O	0.0093	0.018	F	0.0093	8.85	0.0011	7.22E-06	8.56	23	14.44	0	0	40.56	
39	1998122001	E-O	0.0093	0.018	L	0.0079	10.61	0.0009	5.24E-06	8.645	28.285	19.64	0	0	40.56	
39	1998122001	E-O	0.0093	0.018	C	0.0130	8.18	0.0015	1.51E-05	8.62	28.27	19.65	9.405	9.43	0.025	
39	1998122001	N-S	0.0066	0.020	F	0.0066	9.41	0.0009	4.72E-06	8.58	20.05	11.47	0	0	40.56	
39	1998122001	N-S	0.0066	0.020	L	0.0084	8.84	0.0011	7.43E-06	8.61	27.375	18.765	0	0	40.56	
39	1998122001	N-S	0.0066	0.020	C	0.0103	9.73	0.0018	2.06E-05	8.615	30.24	21.625	8.94	13.52	4.88	

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS																
Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	larias	tiAr	tAr	Duracion Arias [seg]	tiBr	tBr	DurBr	DurReg
39	1998122001	V	0.0074	0.005	F	0.0074	9.11	0.0007	3.35E-06	8.49	21.995	13.505	9.125	11.105	1.98	40.56
39	1998122001	V	0.0074	0.005	L	0.0124	12.60	0.0014	1.27E-05	8.48	25.11	16.63	8.48	13.59	5.11	40.56
39	1998122001	V	0.0074	0.005	F	0.0156	13.66	0.0021	2.88E-05	8.395	25.41	17.015	8.395	21.99	13.595	40.56
40	1999040401	E-O	0.0121	0.017	C	0.0121	8.02	0.0011	8.20E-06	9.365	19.93	10.565	9.685	9.92	0.135	41.36
40	1999040401	E-O	0.0121	0.017	L	0.0063	10.06	0.0008	4.63E-06	9.21	28.785	19.575	0	0	0	41.36
40	1999040401	E-O	0.0121	0.017	C	0.0107	7.80	0.0005	1.57E-05	9.125	31.4	22.275	10.02	10.025	0.005	41.36
40	1999040401	N-S	0.0082	0.018	F	0.0082	8.87	0.0008	4.23E-06	9.415	23.905	14.49	0	0	0	41.36
40	1999040401	N-S	0.0082	0.018	L	0.0102	9.42	0.0010	6.33E-06	9.01	29.52	20.51	9.98	9.985	0.005	41.36
40	1999040401	N-S	0.0082	0.018	C	0.0123	9.15	0.0019	2.36E-05	9.35	30.59	21.24	9.72	11.68	1.96	41.36
40	1999040401	V	0.0087	0.005	F	0.0087	8.34	0.0008	4.51E-06	9.215	20.64	11.425	9.335	10.51	1.175	41.36
40	1999040401	V	0.0087	0.005	L	0.0120	11.69	0.0014	1.27E-05	8.94	23.125	14.185	9.085	12.97	3.885	41.36
40	1999040401	V	0.0087	0.005	C	0.0189	13.01	0.0020	2.67E-06	8.165	24.04	15.875	9.08	18.79	9.71	41.36
41	1999040601	E-O	0.0111	0.080	F	0.0111	5.53	0.0009	6.28E-06	14.965	27.87	12.905	15.635	15.655	0.02	47.36
41	1999040601	E-O	0.0111	0.080	L	0.0160	3.26	0.0018	2.56E-05	15.315	24.49	9.175	15.745	16.98	1.235	47.36
41	1999040601	E-O	0.0111	0.080	C	0.0155	5.36	0.0016	1.83E-05	10.205	34.73	24.525	15.695	15.745	0.05	47.36
41	1999040601	N-S	0.0118	0.081	F	0.0118	4.60	0.0012	1.03E-05	15.05	24.33	9.28	15.635	15.995	0.36	47.36
41	1999040601	N-S	0.0118	0.081	L	0.0106	5.09	0.0012	1.03E-05	11.66	31.32	19.66	15.74	15.755	0.015	47.36
41	1999040601	N-S	0.0118	0.081	C	0.0249	5.37	0.0026	5.08E-05	14.66	30.19	15.53	15.33	17.01	1.68	47.36
41	1999040601	V	0.0062	0.006	F	0.0062	6.94	0.0006	3.19E-06	8.76	27.265	18.505	15.77	15.865	0.095	47.36
41	1999040601	V	0.0062	0.006	L	0.0074	10.38	0.0010	7.12E-06	7.3	28.5	21.2	15.165	17.96	2.795	47.36
41	1999040601	V	0.0062	0.006	C	0.0093	11.89	0.0013	1.32E-05	7.065	28.315	21.25	15.16	18.96	3.8	47.36
42	1999062501	E-O	0.0046	0.014	F	0.0046	8.70	0.0005	2.07E-06	11.09	21.015	9.925	0	0	0	43.16
42	1999062501	E-O	0.0046	0.014	L	0.0062	8.90	0.0006	2.62E-06	10.815	25.705	14.89	0	0	0	43.16
42	1999062501	E-O	0.0046	0.014	C	0.0075	6.60	0.0011	8.94E-06	10.91	26.905	15.995	0	0	0	43.16
42	1999062501	N-S	0.0051	0.011	F	0.0051	8.60	0.0005	1.85E-06	11.115	18.605	7.49	0	0	0	43.16
42	1999062501	N-S	0.0051	0.011	L	0.0058	7.80	0.0007	3.65E-06	10.945	26.045	15.1	0	0	0	43.16
42	1999062501	N-S	0.0051	0.011	C	0.0118	8.69	0.0014	1.38E-05	9.67	28.64	18.97	12.195	13.04	0.845	43.16
42	1999062501	V	0.0030	0.005	F	0.0030	9.32	0.0004	9.47E-07	8.55	20.63	12.08	0	0	0	43.16
42	1999062501	V	0.0030	0.005	L	0.0061	12.28	0.0006	2.77E-06	7.675	24.655	16.98	12.28	12.295	0.015	43.16
42	1999062501	V	0.0030	0.005	C	0.0079	13.80	0.0009	5.83E-06	7.355	21.595	17.24	11.095	14.605	3.51	43.16
43	1999080101	E-O	0.0366	0.154	F	0.0366	7.60	0.0366	7.45E-05	12.315	20.35	8.035	12.135	18.225	6.09	37.48
43	1999080101	E-O	0.0366	0.154	L	0.0280	5.66	0.0040	9.77E-05	12.125	20.615	8.49	12.095	20.185	8.09	37.48
43	1999080101	E-O	0.0366	0.154	C	0.0287	6.58	0.0038	8.82E-05	11.59	25.04	13.45	12.37	18.3	5.93	37.48
43	1999080101	N-S	0.0350	0.215	F	0.0350	6.86	0.0040	9.75E-05	12.125	19.075	6.95	12.08	17.18	5.1	37.48
43	1999080101	N-S	0.0350	0.215	L	0.0188	6.14	0.0028	4.81E-05	12.01	24.925	12.915	12.37	17.77	5.4	37.48
43	1999080101	N-S	0.0350	0.215	C	0.0567	5.86	0.0061	2.23E-04	12.085	23.1	11.015	11.89	23.45	11.56	37.48
43	1999080101	V	0.0220	0.008	F	0.0220	7.52	0.0026	4.12E-05	11.935	20.215	8.28	8.665	18.235	9.57	37.48
43	1999080101	V	0.0220	0.008	L	0.0282	10.62	0.0038	8.69E-05	8.67	23.08	14.41	6.245	26.06	19.815	37.48
43	1999080101	V	0.0220	0.008	C	0.0349	12.48	0.0054	1.77E-04	8.04	23.995	15.955	5.005	28.925	23.92	37.48
44	1999080301	E-O	0.0071	0.032	F	0.0071	12.21	0.0008	4.94E-06	11.615	27.575	15.96	0	0	0	44.36
44	1999080301	E-O	0.0071	0.032	L	0.0057	11.42	0.0009	5.45E-06	10.125	31.07	20.945	0	0	0	44.36
44	1999080301	E-O	0.0071	0.032	C	0.0100	7.97	0.0015	1.65E-05	10.905	33.48	22.575	13.825	13.825	0	44.36
44	1999080301	N-S	0.0051	0.033	F	0.0051	12.03	0.0007	3.87E-06	11.9	29.17	17.27	0	0	0	44.36
44	1999080301	N-S	0.0051	0.033	L	0.0061	9.07	0.0010	7.45E-06	11.25	31.65	20.4	0	0	0	44.36
44	1999080301	N-S	0.0051	0.033	C	0.0108	10.35	0.0019	2.61E-05	9.27	33.2	23.93	12.25	13.71	1.46	44.36
44	1999080301	V	0.0046	0.004	F	0.0046	10.91	0.0006	2.17E-06	9.395	30.82	21.425	0	0	0	44.36
44	1999080301	V	0.0046	0.004	L	0.0079	13.51	0.0011	9.13E-06	8.765	29.06	20.295	12.14	13.675	1.535	44.36
44	1999080301	V	0.0046	0.004	C	0.0132	14.64	0.0019	2.45E-05	8.705	28.19	19.485	11.83	23.51	1.168	44.36
45	1999090101	E-O	0.0032	0.017	F	0.0032	10.53	0.0004	9.60E-07	12.73	22.89	10.16	0	0	0	33.96
45	1999090101	E-O	0.0032	0.017	L	0.0039	10.08	0.0006	1.84E-06	9.05	23.825	14.775	0	0	0	33.96
45	1999090101	E-O	0.0032	0.017	C	0.0059	7.81	0.0010	5.86E-06	8.765	25.045	16.28	0	0	0	33.96
45	1999090101	N-S	0.0031	0.019	F	0.0031	10.31	0.0005	1.27E-06	10.985	23.165	12.18	0	0	0	33.96
45	1999090101	N-S	0.0031	0.019	L	0.0038	9.83	0.0006	2.22E-06	8.755	24.905	16.15	0	0	0	33.96
45	1999090101	N-S	0.0031	0.019	C	0.0078	9.60	0.0014	1.14E-05	8.65	24.62	15.97	0	0	0	33.96
45	1999090101	V	0.0026	0.003	F	0.0026	9.95	0.0004	7.19E-07	8.06	23.815	15.755	0	0	0	33.96
45	1999090101	V	0.0026	0.003	L	0.0050	13.28	0.0007	2.72E-06	7.9	23.8	15.9	14.245	14.245	0	33.96
45	1999090101	V	0.0026	0.003	C	0.0068	14.25	0.0011	6.32E-06	7.865	23.765	15.9	14.21	17.34	3.13	33.96
46	2000061601	E-O	0.0329	0.792	F	0.0329	8.81	0.0045	1.73E-04	14.32	34.005	19.685	14.665	26.845	12.18	53.84
46	2000061601	E-O	0.0329	0.792	L	0.0438	5.47	0.0060	3.13E-04	12.84	29.76	16.92	8.775	26.985	18.21	53.84
46	2000061601	E-O	0.0329	0.792	C	0.0357	7.37	0.0043	2.48E-04	9.375	37.365	27.79	7.15	30.93	23.78	53.84
46	2000061601	N-S	0.0335	0.704	F	0.0335	7.97	0.0044	1.60E-04	14.88	33.355	18.475	14.16	26.29	12.13	53.84
46	2000061601	N-S	0.0335	0.704	L	0.0251	6.54	0.0042	1.53E-04	10.36	37.325	26.965	9.765	27.175	17.41	53.84
46	2000061601	N-S	0.0335	0.704	C	0.0566	6.98	0.0079	5.36E-04	11.715	34.16	22.445	6.715	41.725	35.01	53.84
46	2000061601	V	0.0332	0.010	F	0.0332	8.84	0.0038	1.24E-04	8.885	33.1	24.215	4.29	40.225	35.935	53.84
46	2000061601	V	0.0332	0.010	L	0.0480	12.08	0.0063	3.42E-04	7.04	32.56	25.52	2.7	46.18	43.48	53.84
46	2000061601	V	0.0332	0.010	C	0.0597	13.38	0.0093	7.43E-04	6.535	32.575	26.04	2.245	48	45.755	53.84

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS

Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	Iarias	tiAr	tAr	Duración Arias [seg]	tiBr	tfBr	DurBr	DurReg
47	2001040501	E-O	0.0159	0.122	F	0.0159	6.14	0.0016	1.83E-05	15.35	23.415	8.065	15.425	16.9	1.475	47.36
47	2001040501	E-O	0.0159	0.122	L	0.0085	5.80	0.0012	1.06E-05	14.18	30.965	16.785	0	0	0	47.36
47	2001040501	E-O	0.0159	0.122	F	0.0244	4.47	0.0027	5.48E-05	15.26	26.57	11.31	17.12	17.12	1.67	47.36
47	2001040501	N-S	0.0105	0.145	C	0.0105	6.50	0.0011	9.49E-06	15.39	24.95	9.56	16.305	16.305	0.245	47.36
47	2001040501	N-S	0.0105	0.145	L	0.0198	4.00	0.0022	3.57E-05	15.3	24.12	8.82	15.435	17.09	1.655	47.36
47	2001040501	N-S	0.0105	0.145	C	0.0133	8.01	0.0021	3.36E-05	9.59	33.765	24.175	15.475	16.625	1.15	47.36
47	2001040501	V	0.0101	0.007	F	0.0101	7.40	0.0011	8.44E-06	11.14	27.66	16.52	15.325	17.975	2.65	47.36
47	2001040501	V	0.0101	0.007	L	0.0167	10.72	0.0015	1.79E-05	9.45	26.49	17.045	9.54	20.895	11.355	47.36
47	2001040501	V	0.0101	0.007	C	0.0205	12.11	0.0021	3.19E-05	9.11	27.52	18.41	9.37	21.145	11.775	47.36
48	2001040901	E-O	0.0068	0.098	F	0.0068	6.88	0.0012	1.07E-05	13.77	32.875	19.105	0	0	0	47.36
48	2001040901	E-O	0.0068	0.098	C	0.0099	7.02	0.0018	2.48E-05	10.085	35.08	24.995	0	0	0	47.36
48	2001040901	N-S	0.0075	0.036	F	0.0075	5.89	0.0011	9.35E-06	14.055	31.475	17.42	0	0	0	47.36
48	2001040901	N-S	0.0075	0.036	C	0.0130	7.81	0.0025	4.56E-05	10.415	36.82	26.405	15.045	19.755	4.71	47.36
48	2001040901	V	0.0056	0.009	F	0.0056	7.68	0.0010	7.04E-06	8.785	34.375	25.59	16.27	19.345	3.075	47.36
48	2001040901	V	0.0056	0.009	C	0.0122	13.12	0.0022	3.52E-05	7.485	34.08	27.195	10.34	34.685	24.345	47.36
49	2001072401	E-O	0.0012	0.100	F	0.0012	6.58	0.0001	1.54E-07	14.73	30.19	15.46	0	0	0	46.70
49	2001072401	E-O	0.0012	0.100	C	0.0191	5.39	0.0025	4.72E-05	11.125	32.42	21.295	15.135	17.735	2.6	46.70
49	2001072401	N-S	0.0008	0.128	F	0.0008	6.58	0.0001	1.11E-07	14.415	32.61	18.195	0	0	0	46.70
49	2001072401	N-S	0.0008	0.128	C	0.0211	7.30	0.0027	5.31E-05	9.78	34.24	24.46	15.295	20.605	5.31	46.70
49	2001072401	V	0.0008	0.028	F	0.0008	7.36	0.0001	9.52E-08	8.93	32.07	23.14	0	0	0	46.70
49	2001072401	V	0.0008	0.028	C	0.0147	13.27	0.0026	5.00E-05	8.075	29.35	21.275	5.97	28.395	22.425	46.70
50	2002071901	E-O	0.0012	0.042	F	0.0012	8.36	0.0001	9.42E-08	8.94	20.06	11.12	0	0	0	40.90
50	2002071901	E-O	0.0012	0.042	L	0.0104	7.77	0.0012	9.55E-06	8.995	24.685	15.69	9.255	9.26	0.005	40.90
50	2002071901	E-O	0.0012	0.042	C	0.0227	4.65	0.0024	3.74E-05	9.07	23.61	14.54	9.06	9.975	0.915	40.90
50	2002071901	N-S	0.0009	0.106	F	0.0009	10.07	0.0001	5.23E-08	8.915	21.165	12.25	0	0	0	40.90
50	2002071901	N-S	0.0009	0.106	L	0.0180	4.47	0.0021	2.28E-05	9.055	19.525	10.47	9.045	9.8	0.755	40.90
50	2002071901	N-S	0.0009	0.106	C	0.0188	8.57	0.0019	3.01E-05	8.965	28.42	19.455	9.05	12.75	3.7	40.90
50	2002071901	V	0.0006	0.016	F	0.0006	9.78	0.0001	3.15E-08	8.895	26.655	17.76	0	0	0	40.90
50	2002071901	V	0.0006	0.016	L	0.0100	12.98	0.0013	1.08E-05	8.965	23.48	14.515	8.99	13.29	4.3	40.90
50	2002071901	V	0.0006	0.016	C	0.0154	14.12	0.0020	2.57E-05	8.965	23.095	14.13	8.955	19.42	10.465	40.90
51	2002080601	E-O	0.0050	0.015	F	0.0050	8.63	0.0005	2.03E-06	14.235	27.97	13.735	0	0	0	47.36
51	2002080601	E-O	0.0050	0.015	L	0.0046	7.69	0.0007	3.66E-06	13.04	30.23	17.19	0	0	0	47.36
51	2002080601	E-O	0.0050	0.015	C	0.0080	6.73	0.0012	1.03E-05	10.615	31.555	20.94	0	0	0	47.36
51	2002080601	N-S	0.0042	0.023	F	0.0042	8.20	0.0005	1.63E-06	14.3	26.465	12.165	0	0	0	47.36
51	2002080601	N-S	0.0042	0.023	L	0.0061	8.23	0.0007	4.12E-06	12.46	29.835	17.375	0	0	0	47.36
51	2002080601	N-S	0.0042	0.023	C	0.0098	7.87	0.0015	1.74E-05	10.61	33.33	22.72	0	0	0	47.36
51	2002080601	V	0.0034	0.005	F	0.0034	9.14	0.0003	7.69E-07	10.125	23.42	13.295	0	0	0	47.36
51	2002080601	V	0.0034	0.005	L	0.0059	12.38	0.0006	3.16E-06	8.86	27.92	19.06	14.54	14.835	0.295	47.36
51	2002080601	V	0.0034	0.005	C	0.0077	13.45	0.0009	6.41E-06	8.3	27.925	19.625	14.54	15.74	1.2	47.36
52	2003010601	E-O	0.0162	0.113	F	0.0162	5.63	0.0028	4.38E-05	12.525	24.48	11.955	12.605	20.59	7.985	35.92
52	2003010601	E-O	0.0162	0.113	L	0.0154	5.61	0.0026	3.77E-05	12.53	27.215	14.685	13.765	18.25	4.485	35.92
52	2003010601	E-O	0.0162	0.113	C	0.0203	4.92	0.0036	7.64E-05	11.045	25.345	14.3	12.83	24.635	11.805	35.92
52	2003010601	N-S	0.0144	0.148	F	0.0144	6.49	0.0023	2.97E-05	12.75	24.63	11.88	13.365	17.405	4.04	35.92
52	2003010601	N-S	0.0144	0.148	L	0.0165	4.49	0.0029	4.75E-05	11.99	25.215	13.225	12.815	19.065	6.25	35.92
52	2003010601	N-S	0.0144	0.148	C	0.0195	6.17	0.0035	7.21E-05	10.22	27.54	17.32	12.72	24.3	11.58	35.92
52	2003010601	V	0.0089	0.009	F	0.0089	7.58	0.0019	2.05E-05	8.025	25.765	17.74	9.505	20.38	11.075	35.92
52	2003010601	V	0.0089	0.009	L	0.0185	11.55	0.0030	5.32E-05	7.125	25.505	18.38	6.88	27.205	20.325	35.92
52	2003010601	V	0.0089	0.009	C	0.0300	12.89	0.0045	1.18E-04	7.02	25.5	18.48	2.665	27.8	25.135	35.92
53	2003030801	E-O	0.0024	0.004	F	0.0024	11.97	0.0003	4.83E-07	10.26	21.68	11.42	0	0	0	32.16
53	2003030801	E-O	0.0024	0.004	L	0.0026	11.80	0.0005	1.14E-06	8.88	22.925	14.045	0	0	0	32.16
53	2003030801	E-O	0.0024	0.004	C	0.0046	9.18	0.0008	3.65E-06	7.91	22.275	14.365	0	0	0	32.16
53	2003030801	N-S	0.0017	0.004	F	0.0017	13.09	0.0003	4.01E-07	9.925	22.28	12.355	0	0	0	32.16
53	2003030801	N-S	0.0017	0.004	L	0.0042	11.46	0.0006	1.85E-06	7.09	21.79	14.7	0	0	0	32.16
53	2003030801	N-S	0.0017	0.004	C	0.0068	11.61	0.0012	6.82E-06	8.725	22.915	14.19	0	0	0	32.16
53	2003030801	V	0.0022	0.005	F	0.0022	12.27	0.0003	4.79E-07	7.48	24.29	16.81	0	0	0	32.16
53	2003030801	V	0.0022	0.005	L	0.0041	13.99	0.0007	2.46E-06	6.95	19.96	13.01	0	0	0	32.16
53	2003030801	V	0.0022	0.005	C	0.0071	14.41	0.0011	5.73E-06	6.79	20	13.21	12.93	13.935	1.005	32.16
54	2003061601	E-O	0.0010	0.003	F	0.0010	10.71	0.0001	4.60E-08	11.35	21.355	10.005	0	0	0	43.36
54	2003061601	E-O	0.0010	0.003	C	0.0008	8.98	0.0001	9.44E-08	11.165	28.65	17.485	0	0	0	43.36
54	2003061601	N-S	0.0010	0.003	F	0.0001	10.00	0.0001	5.31E-08	11.345	19.24	7.895	0	0	0	43.36
54	2003061601	N-S	0.0010	0.003	C	0.0017	9.45	0.0002	2.67E-07	11.26	26.78	15.52	0	0	0	43.36
54	2003061601	V	0.0006	0.001	F	0.0006	10.13	0.0001	2.34E-08	11.03	24.325	13.295	0	0	0	43.36
54	2003061601	V	0.0006	0.001	C	0.0020	14.32	0.0002	2.16E-07	10.245	23.08	12.835	0	0	0	43.36
55	2004043001	E-O	0.0111	0.042	F	0.0111	10.25	0.0012	9.21E-06	10.87	23.615	12.745	12.995	13.005	0.01	42.76
55	2004043001	E-O	0.0111	0.042	L	0.0098	10.17	0.0012	1.06E-05	10.245	26.515	16.27	0	0	0	42.76

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS																
Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	larias	tiAr	tfAr	Duracion Arias [seg]	tiBr	tfBr	DurBr	DurReg
55	2004043001	N-S	0.0090	0.042	F	0.0090	10.77	0.0011	8.05E-06	10.845	23.1	12.255	0	0	0	42.76
55	2004043001	N-S	0.0090	0.042	L	0.0079	9.98	0.0012	9.35E-06	9.96	28.295	18.335	0	0	0	42.76
55	2004043001	V	0.0080	0.004	F	0.0080	9.33	0.0010	7.32E-06	8.935	24.39	15.455	12.33	13.53	1.2	42.76
55	2004043001	V	0.0080	0.004	L	0.0126	11.98	0.0016	1.82E-05	7.595	23.525	15.93	11.72	17.305	5.585	42.76
56	2004082801	E-O	0.0119	0.097	F	0.0119	4.53	0.0017	2.32E-05	15.185	34.805	19.62	17.1	17.36	0.26	47.36
56	2004082801	E-O	0.0119	0.097	L	0.0135	5.23	0.0020	3.15E-05	14.41	35.84	21.43	22.655	23.305	0.65	47.36
56	2004082801	E-O	0.0119	0.097	C	0.0240	3.77	0.0034	9.02E-05	14.775	34.525	19.75	15.39	25.46	10.07	47.36
56	2004082801	N-S	0.0083	0.154	F	0.0083	5.22	0.0014	1.56E-05	15.58	35.806	20.225	0	0	0	47.36
56	2004082801	N-S	0.0083	0.154	C	0.0220	5.89	0.0033	8.30E-05	11.025	37.625	26.6	15.84	30.585	14.745	47.36
56	2004082801	V	0.0053	0.011	F	0.0053	6.31	0.0012	1.01E-05	10.325	35.645	25.32	17.545	20.875	3.33	47.36
56	2004082801	V	0.0053	0.011	L	0.0075	9.94	0.0015	1.78E-05	9.905	35.335	25.43	14.885	30.275	15.39	47.36
56	2004082801	V	0.0053	0.011	C	0.0109	11.84	0.0021	3.41E-05	9.745	35.085	25.34	10.77	32.14	21.37	47.36
57	2004102601	E-O	0.0029	0.004	F	0.0029	11.29	0.0003	5.64E-07	12.885	28.5	17.375	0	0	0	45.36
57	2004102601	E-O	0.0029	0.004	L	0.0048	11.34	0.0004	1.34E-06	9.915	27.29	17.375	0	0	0	45.36
57	2004102601	E-O	0.0029	0.004	C	0.0066	7.85	0.0008	4.21E-06	12.93	28.26	15.33	0	0	0	45.36
57	2004102601	N-S	0.0031	0.005	F	0.0031	10.22	0.0003	4.57E-07	12.975	21.925	8.95	0	0	0	45.36
57	2004102601	N-S	0.0031	0.005	L	0.0041	10.72	0.0005	1.55E-06	10.22	27.455	17.235	0	0	0	45.36
57	2004102601	N-S	0.0031	0.005	C	0.0098	9.63	0.0011	8.70E-06	11.41	28.09	16.68	0	0	0	45.36
57	2004102601	V	0.0021	0.003	F	0.0021	10.23	0.0002	3.86E-07	12.195	22.445	10.25	0	0	0	45.36
57	2004102601	V	0.0021	0.003	L	0.0047	12.52	0.0004	1.22E-06	7.67	28.615	20.945	0	0	0	45.36
57	2004102601	V	0.0021	0.003	C	0.0068	13.69	0.0006	3.02E-06	7.185	25.285	18.1	13.085	14.38	1.295	45.36
58	2004121101	E-O	0.0083	0.014	F	0.0083	11.38	0.0007	3.10E-06	11.155	23.655	12.5	0	0	0	43.36
58	2004121101	E-O	0.0083	0.014	L	0.0050	11.35	0.0007	3.46E-06	11.09	29.565	18.475	0	0	0	43.36
58	2004121101	E-O	0.0083	0.014	C	0.0122	10.06	0.0013	1.20E-05	11.21	27.34	16.13	11.34	12.025	0.685	43.36
58	2004121101	N-S	0.0038	0.018	F	0.0038	12.20	0.0005	1.48E-06	11.165	16.35	16.35	0	0	0	43.36
58	2004121101	N-S	0.0038	0.018	L	0.0097	11.38	0.0010	7.01E-06	11.145	26.065	14.92	0	0	0	43.36
58	2004121101	N-S	0.0038	0.018	C	0.0131	10.91	0.0016	1.80E-05	11.08	29.985	18.905	12.095	12.475	0.38	43.36
58	2004121101	V	0.0047	0.005	F	0.0047	10.57	0.0005	1.62E-06	11.135	24.455	13.32	0	0	0	43.36
58	2004121101	V	0.0047	0.005	L	0.0099	12.61	0.0009	6.08E-06	10.59	25.865	15.275	11.295	12.66	1.365	43.36
58	2004121101	V	0.0047	0.005	C	0.0127	13.67	0.0014	1.30E-05	9.73	26.29	16.56	11.3	17.07	5.77	43.36
59	2006061701	E-O	0.0085	0.023	F	0.0085	7.11	0.0005	2.02E-06	15.3	20.095	4.795	0	0	0	47.36
59	2006061701	E-O	0.0085	0.023	L	0.0084	6.41	0.0007	3.90E-06	15.34	23.255	7.915	0	0	0	47.36
59	2006061701	E-O	0.0085	0.023	C	0.0117	6.83	0.0010	7.32E-06	15.365	25.885	10.52	15.495	15.515	0.02	47.36
59	2006061701	N-S	0.0059	0.019	F	0.0059	7.34	0.0004	1.43E-06	15.205	28.24	13.035	0	0	0	47.36
59	2006061701	N-S	0.0059	0.019	L	0.0079	8.83	0.0006	3.07E-06	14.205	25.585	11.35	0	0	0	47.36
59	2006061701	N-S	0.0059	0.019	C	0.0088	6.51	0.0012	1.03E-05	15.425	26.775	11.38	0	0	0	47.36
59	2006061701	V	0.0051	0.007	F	0.0051	8.21	0.0004	1.21E-06	11.465	23.725	12.26	15.225	15.23	0.005	47.36
59	2006061701	V	0.0051	0.007	L	0.0071	11.61	0.0006	2.75E-06	10.055	22.645	12.58	15.22	16.09	0.87	47.36
59	2006061701	V	0.0051	0.007	C	0.0089	12.75	0.0007	4.15E-06	14.515	22.945	8.43	15.22	16.705	1.485	47.36
60	2006090901	E-O	0.0040	0.011	F	0.0040	10.73	0.0005	2.10E-06	13.73	30.025	16.295	0	0	0	47.36
60	2006090901	E-O	0.0040	0.011	L	0.0040	10.25	0.0007	3.58E-06	11.015	34.865	23.85	0	0	0	47.36
60	2006090901	E-O	0.0040	0.011	C	0.0071	7.41	0.0013	1.28E-05	13.88	31.98	18.1	0	0	0	47.36
60	2006090901	N-S	0.0035	0.015	F	0.0035	10.88	0.0005	1.98E-06	10.865	35.57	24.705	0	0	0	47.36
60	2006090901	N-S	0.0035	0.015	L	0.0068	9.78	0.0009	5.52E-06	10.515	35.29	24.775	0	0	0	47.36
60	2006090901	N-S	0.0035	0.015	C	0.0096	8.79	0.0015	1.76E-05	14.285	30.995	16.71	0	0	0	47.36
60	2006090901	V	0.0031	0.005	F	0.0031	9.67	0.0005	1.85E-06	9.035	37.01	27.975	0	0	0	47.36
60	2006090901	V	0.0031	0.005	L	0.0049	12.07	0.0007	4.11E-06	8.985	34.33	25.345	0	0	0	47.36
60	2006090901	V	0.0031	0.005	C	0.0070	13.54	0.0010	7.70E-06	13.955	30.67	16.715	14.95	18.89	3.94	47.36
61	2007042201	E-O	0.0046	0.025	F	0.0046	7.76	0.0006	2.58E-06	15.26	32.59	17.33	0	0	0	47.36
61	2007042201	E-O	0.0046	0.025	L	0.0073	6.97	0.0011	8.99E-06	15.03	33.69	18.66	0	0	0	47.36
61	2007042201	E-O	0.0046	0.025	C	0.0085	6.29	0.0015	1.79E-05	15	34.195	19.195	0	0	0	47.36
61	2007042201	N-S	0.0044	0.019	F	0.0044	7.76	0.0006	2.71E-06	15.325	32.14	16.815	0	0	0	47.36
61	2007042201	N-S	0.0044	0.019	L	0.0066	7.27	0.0010	8.32E-06	15.22	33.725	18.505	0	0	0	47.36
61	2007042201	N-S	0.0044	0.019	C	0.0125	6.49	0.0021	3.35E-05	14.575	33.85	19.275	16.07	18.97	2.9	47.36
61	2007042201	V	0.0051	0.004	F	0.0051	7.42	0.0006	2.34E-06	13.565	30.725	17.16	16.27	16.27	0	47.36
61	2007042201	V	0.0051	0.004	L	0.0090	10.87	0.0009	5.76E-06	13.23	30.84	17.61	16.025	18.565	2.54	47.36
61	2007042201	V	0.0051	0.004	C	0.0109	12.72	0.0012	1.12E-05	13.015	30.675	17.66	15.07	20.505	5.435	47.36
62	2007121501	E-O	0.0066	0.085	F	0.0066	4.29	0.0010	7.94E-06	14.665	32.02	17.37	0	0	0	47.36
62	2007121501	E-O	0.0066	0.085	L	0.0119	8.65	0.0015	1.73E-05	13.09	31.74	18.65	17.56	17.58	0.01	47.36
62	2007121501	E-O	0.0066	0.085	C	0.0131	3.91	0.0023	3.92E-05	14.12	32.485	18.365	18.467	21.495	3.03	47.36
62	2007121501	N-S	0.0067	0.075	F	0.0067	4.14	0.0010	7.81E-06	14.93	31.26	16.33	0	0	0	47.36
62	2007121501	N-S	0.0067	0.075	L	0.0105	9.14	0.0016	2.00E-05	13.445	32.11	18.665	17.53	17.535	0.005	47.36
62	2007121501	N-S	0.0067	0.075	C	0.0164	5.37	0.0028	5.81E-05	14.63	33.1	18.47	15.18	25.075	9.895	47.36
62	2007121501	V	0.0043	0.005	F	0.0043	5.70	0.0008	4.38E-06	12.47	34.655	22.185	0	0	0	47.36
62	2007121501	V	0.0043	0.005	L	0.0062	10.08	0.0010	8.07E-06	11.225	34.14	16.565	16.565	20.54	3.975	47.36
62	2007121501	V	0.0043	0.005	C	0.0077	10.42	0.0013	1.26E-05	9.25	33.445	24.195	15.52	24.32	8.8	47.36

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS

Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	Iarias	tiAr	tfAr	tiBr	tBr	Duración Arias [seg]	tfBr	DurBr	DurReg
63	2007121701	E-O	0.0049	0.011	F	0.0049	9.54	0.0006	2.43E-06	11.42	30.03	18.61	0	18.61	0	0	46.56
63	2007121701	E-O	0.0049	0.011	L	0.0097	13.04	0.0013	1.25E-05	11.495	30.205	18.71	0	18.71	0	0	46.56
63	2007121701	E-O	0.0049	0.011	F	0.0068	6.00	0.0012	1.03E-05	11.595	33.005	21.41	0	21.41	0	0	46.56
63	2007121701	N-S	0.0036	0.010	C	0.0036	8.82	0.0005	2.12E-06	11.355	30.625	19.27	0	19.27	0	0	46.56
63	2007121701	N-S	0.0036	0.010	L	0.0128	14.56	0.0015	1.68E-05	11.545	29.845	18.3	13.85	14.285	0.435	0.435	46.56
63	2007121701	N-S	0.0036	0.010	C	0.0087	6.97	0.0019	2.69E-05	11.45	32.83	21.38	0	21.38	0	0	46.56
63	2007121701	V	0.0029	0.005	F	0.0029	8.63	0.0004	1.48E-06	11.395	31.37	19.975	0	19.975	0	0	46.56
63	2007121701	V	0.0029	0.005	L	0.0081	16.40	0.0011	8.40E-06	11.39	29.64	18.25	11.62	19.265	7.645	7.645	46.56
63	2007121701	V	0.0029	0.005	C	0.0073	13.60	0.0011	9.15E-06	11.905	30.45	19.545	12.305	16.015	3.71	3.71	46.56
64	2008121801	E-O	0.0044	0.167	F	0.0044	2.88	0.0008	4.89E-06	11.79	32.48	20.69	0	20.69	0	0	47.36
64	2008121801	E-O	0.0044	0.167	C	0.0090	2.90	0.0016	1.88E-05	12.22	31.085	19.065	0	19.065	0	0	47.36
64	2008121801	N-S	0.0043	0.033	C	0.0043	3.11	0.0007	3.97E-06	12.24	33.395	21.155	0	21.155	0	0	47.36
64	2008121801	N-S	0.0043	0.033	C	0.0109	4.66	0.0018	2.53E-05	12.305	33.28	20.975	15.16	15.345	0.185	0.185	47.36
64	2008121801	V	0.0034	0.007	F	0.0034	3.83	0.0006	3.31E-06	11.885	32.36	20.475	0	20.475	0	0	47.36
64	2008121801	V	0.0034	0.007	C	0.0047	6.53	0.0007	3.63E-06	11.195	32.385	21.19	0	21.19	0	0	47.36
65	2009042601	E-O	0.0145	0.094	F	0.0145	3.90	0.0011	9.09E-06	15.375	24.035	15.465	15.465	15.815	0.35	0.35	47.36
65	2009042601	E-O	0.0145	0.094	C	0.0209	2.98	0.0023	3.86E-05	15.56	24.275	8.715	15.545	17.735	2.19	2.19	47.36
65	2009042601	N-S	0.0078	0.040	F	0.0078	4.98	0.0008	4.81E-06	15.405	26.245	10.84	0	10.84	0	0	47.36
65	2009042601	N-S	0.0078	0.040	C	0.0112	5.42	0.0019	2.84E-05	15.39	29.96	14.57	15.905	18.3	2.395	2.395	47.36
65	2009042601	V	0.0044	0.008	F	0.0044	5.87	0.0005	2.21E-06	15.28	27.035	11.755	0	11.755	0	0	47.36
65	2009042601	V	0.0044	0.008	C	0.0069	10.09	0.0009	6.77E-06	13.38	30.8	17.42	16.115	19.07	2.955	2.955	47.36
66	2009063001	E-O	0.0034	0.009	F	0.0034	13.29	0.0004	1.33E-06	9.775	23.37	13.595	0	13.595	0	0	41.86
66	2009063001	E-O	0.0034	0.009	C	0.0055	8.69	0.0010	6.64E-06	9.92	26.22	16.3	0	16.3	0	0	41.86
66	2009063001	N-S	0.0038	0.007	F	0.0038	13.54	0.0004	1.16E-06	9.78	23.87	14.09	0	14.09	0	0	41.86
66	2009063001	N-S	0.0038	0.007	C	0.0064	9.53	0.0012	9.82E-06	10.04	29.77	19.73	0	19.73	0	0	41.86
66	2009063001	V	0.0032	0.003	F	0.0032	12.27	0.0004	9.03E-07	9.685	27.07	17.385	0	17.385	0	0	41.86
66	2009063001	V	0.0032	0.003	C	0.0096	14.43	0.0012	9.32E-06	9.625	24.17	14.545	9.695	14.92	5.225	5.225	41.86
67	2010022101	E-O	0.0080	0.240	F	0.0080	4.88	0.0007	4.18E-06	15	30.18	15.18	0	15.18	0	0	47.36
67	2010022101	E-O	0.0080	0.240	C	0.0132	3.39	0.0015	1.76E-05	15.41	30.31	17.13	15.46	15.765	0.305	0.305	47.36
67	2010022101	N-S	0.0037	0.027	F	0.0037	6.25	0.0006	2.64E-06	14.88	32.01	14.9	0	14.9	0	0	47.36
67	2010022101	N-S	0.0037	0.027	C	0.0086	5.81	0.0015	1.74E-05	15.16	34.505	19.345	0	19.345	0	0	47.36
67	2010022101	V	0.0023	0.004	F	0.0023	7.57	0.0004	1.24E-06	12.89	34.175	21.285	0	21.285	0	0	47.36
67	2010022101	V	0.0023	0.004	C	0.0052	13.19	0.0010	7.84E-06	10.45	34.81	24.36	19.915	19.915	0	0	47.36
68	2010022701	E-O	0.2281	6.514	F	0.2281	4.20	0.0263	2.26E-02	59.745	94.6	34.855	27.885	197.1	169.215	169.215	205.00
68	2010022701	E-O	0.2281	6.514	C	0.1901	3.24	0.0205	1.37E-02	48.835	100.015	51.18	20.565	167.945	147.38	147.38	205.00
68	2010022701	N-S	0.3113	10.631	F	0.3113	3.67	0.0297	2.90E-02	60.465	94.31	33.845	30.68	137.725	107.045	107.045	205.00
68	2010022701	N-S	0.3113	10.631	C	0.2170	4.13	0.0233	1.78E-02	52.785	96.61	43.825	20.535	146.925	126.39	126.39	205.00
68	2010022701	V	0.1777	4.146	F	0.1777	6.02	0.0209	1.44E-02	46.255	93.485	47.68	10.755	199.3	188.545	188.545	205.00
68	2010022701	V	0.1777	4.146	C	0.2911	9.61	0.0359	4.24E-02	46.255	93.485	47.68	7.375	158.31	150.935	150.935	205.00
69	2010022705	E-O	0.0062	0.257	F	0.0062	9.31	0.0006	3.17E-06	14.995	27.46	12.465	0	12.465	0	0	47.36
69	2010022705	E-O	0.0062	0.257	C	0.0082	1.63	0.0017	2.16E-05	14.765	35.48	20.715	0	20.715	0	0	47.36
69	2010022705	N-S	0.0042	0.255	F	0.0042	11.26	0.0006	2.51E-06	14.9	30.23	15.28	0	15.28	0	0	47.36
69	2010022705	N-S	0.0042	0.255	C	0.0112	2.35	0.0018	2.41E-05	13.8	30.005	15.745	15.745	22.205	0.035	0.035	47.36
69	2010022705	V	0.0042	0.101	F	0.0042	9.68	0.0006	2.44E-06	9.695	28.07	18.375	0	18.375	0	0	47.36
69	2010022705	V	0.0042	0.101	C	0.0039	7.33	0.0008	5.09E-06	13.84	35.965	22.125	17.415	17.425	0.01	0.01	47.36
70	2010030306	E-O	0.0073	0.154	F	0.0073	2.98	0.0010	7.76E-06	14.775	30.65	15.875	0	15.875	0	0	47.36
70	2010030306	E-O	0.0073	0.154	C	0.0149	2.37	0.0022	3.54E-05	16.03	29.995	13.965	20.365	22.435	2.07	2.07	47.36
70	2010030306	N-S	0.0089	0.086	F	0.0089	2.79	0.0012	1.14E-05	14.79	29.64	14.85	0	14.85	0	0	47.36
70	2010030306	N-S	0.0089	0.086	C	0.0160	2.71	0.0027	5.36E-05	15.055	28.825	13.77	15.33	19.695	4.365	4.365	47.36
70	2010030306	V	0.0043	0.008	F	0.0043	4.06	0.0007	3.22E-06	11.795	31.91	20.115	19.14	19.155	0.015	0.015	47.36
71	2010030501	E-O	0.0041	0.061	F	0.0056	7.50	0.0008	4.83E-06	10.365	31.135	20.77	19.14	19.155	0.015	0.015	47.36
71	2010030501	E-O	0.0041	0.061	C	0.0049	5.94	0.0006	2.56E-06	9.645	28.865	19.22	0	19.22	0	0	47.36
71	2010030501	N-S	0.0043	0.024	F	0.0043	4.81	0.0010	7.24E-06	10.13	31.995	21.865	0	21.865	0	0	47.36
71	2010030501	N-S	0.0043	0.024	C	0.0043	5.49	0.0006	2.84E-06	9.585	28.435	18.85	0	18.85	0	0	47.36
71	2010030501	V	0.0043	0.024	F	0.0075	6.14	0.0012	1.13E-05	9.685	32.345	22.66	0	22.66	0	0	47.36
71	2010030501	V	0.0025	0.003	C	0.0025	6.81	0.0004	1.35E-06	9.54	29.73	20.19	0	20.19	0	0	47.36
72	2010030904	E-O	0.0086	0.012	F	0.0086	7.49	0.0006	2.58E-06	11.265	22.09	10.825	0	10.825	0	0	43.36
72	2010030904	E-O	0.0086	0.012	C	0.0066	7.52	0.0009	5.10E-06	11.285	29.125	17.84	0	17.84	0	0	43.36
72	2010030904	N-S	0.0074	0.025	F	0.0074	7.41	0.0006	2.55E-06	11.305	21.035	9.73	0	9.73	0	0	43.36
72	2010030904	N-S	0.0074	0.025	C	0.0077	8.46	0.0011	8.87E-06	11.17	28.45	17.28	0	17.28	0	0	43.36
72	2010030904	V	0.0045	0.004	F	0.0045	8.21	0.0005	1.91E-06	10.825	22.11	11.285	0	11.285	0	0	43.36
72	2010030904	V	0.0045	0.004	C	0.0111	12.01	0.0011	8.36E-06	9.005	23.24	14.235	11.335	15.735	4.4	4.4	43.36
73	2010031105	E-O	0.0344	0.877	F	0.0344	4.10	0.0046	2.26E-04	23.465	47.385	23.92	23.465	42.07	18.62	18.62	65.52
73	2010031105	E-O	0.0344	0.877	C	0.0367	2.94	0.0056	3.29E-04	19.295	48.905	29.61	23.52	50.18	26.66	26.66	65.52
73	2010031105	N-S	0.0341	0.392	F	0.0341	3.75	0.0046	2.18E-04	23.725	46.06	22.335	24.75	42.44	17.69	17.69	65.52
73	2010031105	N-S	0.0341	0.392	C	0.0392	3.12	0.0063	4.10E-04	20.21	48.045	22.405	22.405	51.63	29.225	29.225	65.52

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS																
Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcent [Hz]	RMS	larias	tiAr	tAr	Duración Arias [seg]	tiBr	tfBr	DurBr	DurReg
73	2010031105	V	0.0206	0.009	F	0.0206	5.71	0.0035	1.27E-04	10.33	45.545	35.215	7.87	48.7	40.83	65.52
73	2010031105	V	0.0206	0.009	C	0.0308	10.45	0.0058	3.55E-04	9.835	44.795	34.96	5.32	54.845	49.525	65.52
74	2010031106	E-O	0.0300	0.611	F	0.0300	4.28	0.0039	1.42E-04	18.705	42.96	24.255	22.49	40.205	17.715	59.12
74	2010031106	E-O	0.0300	0.611	C	0.0254	2.72	0.0052	2.59E-04	16.28	45.22	28.94	22.175	45.4	23.225	59.12
74	2010031106	N-S	0.0302	0.312	F	0.0302	3.62	0.0047	2.05E-04	22.21	41.535	19.325	21.325	37.17	15.845	59.12
74	2010031106	N-S	0.0302	0.312	C	0.0335	3.02	0.0064	3.83E-04	20.445	44.555	24.11	10.835	45.93	35.095	59.12
74	2010031106	V	0.0148	0.011	F	0.0148	5.92	0.0032	9.85E-05	7.49	41.5	34.01	5.555	46.22	40.665	59.12
74	2010031106	V	0.0148	0.011	C	0.0273	10.69	0.0055	2.91E-04	7.58	40.03	32.45	4.88	51.135	46.255	59.12
75	2010031115	E-O	0.0067	0.038	F	0.0067	5.06	0.0009	6.43E-06	15.3	29.915	14.615	0	0	0	47.36
75	2010031115	E-O	0.0067	0.038	C	0.0070	5.17	0.0012	1.15E-05	13.815	32.61	18.795	0	0	0	47.36
75	2010031115	N-S	0.0079	0.027	F	0.0079	4.78	0.0010	7.65E-06	15.2	27.005	11.805	0	0	0	47.36
75	2010031115	N-S	0.0079	0.027	C	0.0080	6.12	0.0017	2.16E-05	14.11	32.5	18.39	0	0	0	47.36
75	2010031115	V	0.0038	0.005	F	0.0038	6.38	0.0006	3.15E-06	10.61	30.43	0	0	0	0	47.36
75	2010031115	V	0.0038	0.005	C	0.0057	10.11	0.0010	8.00E-06	10.31	29.995	19.685	17.255	20.605	3.35	47.36
76	2010031116	E-O	0.0049	0.112	F	0.0049	2.93	0.0008	4.73E-06	11.825	30.165	18.34	0	0	0	47.36
76	2010031116	E-O	0.0049	0.112	C	0.0078	2.72	0.0014	1.44E-05	12.045	30.9	18.855	0	0	0	47.36
76	2010031116	N-S	0.0058	0.065	F	0.0058	2.95	0.0009	6.61E-06	11.92	29.115	17.195	0	0	0	47.36
76	2010031116	N-S	0.0058	0.065	C	0.0117	4.12	0.0018	2.35E-05	11.85	32.91	21.06	15.97	16.09	0.12	47.36
76	2010031116	V	0.0033	0.005	F	0.0033	3.58	0.0006	2.30E-06	11.625	33.76	22.135	0	0	0	47.36
76	2010031116	V	0.0033	0.005	C	0.0035	7.30	0.0007	3.28E-06	11.075	33.325	22.25	0	0	0	47.36
77	2010031203	E-O	0.0027	0.022	F	0.0027	5.02	0.0003	9.15E-07	12.235	26.55	14.315	0	0	0	47.36
77	2010031203	E-O	0.0027	0.022	C	0.0036	5.74	0.0007	3.64E-06	11.6	35.495	23.895	0	0	0	47.36
77	2010031203	N-S	0.0039	0.022	F	0.0039	4.06	0.0005	1.76E-06	12.745	27.93	15.185	0	0	0	47.36
77	2010031203	N-S	0.0039	0.022	C	0.0086	5.79	0.0010	8.12E-06	11.63	31.79	20.16	0	0	0	47.36
77	2010031203	V	0.0020	0.004	F	0.0020	6.02	0.0003	5.61E-07	7.98	23.42	15.44	0	0	0	47.36
77	2010031203	V	0.0020	0.004	C	0.0035	9.75	0.0004	1.17E-06	7.49	27.58	20.09	0	0	0	47.36
78	2010031204	E-O	0.0024	0.039	F	0.0024	5.73	0.0004	1.15E-06	12.215	28.54	16.325	0	0	0	47.36
78	2010031204	E-O	0.0024	0.039	C	0.0038	5.77	0.0008	4.37E-06	9.85	34.2	24.35	0	0	0	47.36
78	2010031204	N-S	0.0042	0.021	F	0.0042	4.97	0.0014	1.41E-06	12.335	31.51	19.175	0	0	0	47.36
78	2010031204	N-S	0.0042	0.021	C	0.0074	6.10	0.0010	8.34E-06	11.24	31.875	20.635	0	0	0	47.36
78	2010031204	V	0.0016	0.004	F	0.0016	7.04	0.0003	6.81E-07	8.7	27.775	19.075	0	0	0	47.36
78	2010031204	V	0.0016	0.004	C	0.0032	11.33	0.0005	2.15E-06	6.655	29.43	22.775	0	0	0	47.36
79	2010032901	E-O	0.0052	0.065	F	0.0052	4.58	0.0007	3.99E-06	12.42	30.425	18.005	0	0	0	47.36
79	2010032901	E-O	0.0052	0.065	C	0.0075	3.78	0.0012	1.18E-05	12.155	20.265	0	0	0	0	47.36
79	2010032901	N-S	0.0056	0.036	F	0.0056	4.73	0.0007	3.29E-06	12.545	28.55	16.005	0	0	0	47.36
79	2010032901	N-S	0.0056	0.036	C	0.0107	5.16	0.0013	1.29E-05	11.195	35.315	24.12	15.43	15.445	0.015	47.36
79	2010032901	V	0.0036	0.005	F	0.0036	6.08	0.0005	1.81E-06	10.26	33.27	23.01	0	0	0	47.36
79	2010032901	V	0.0036	0.005	C	0.0051	10.60	0.0008	4.87E-06	9.03	31.31	22.28	13.11	13.115	0.005	47.36
80	2010040406	E-O	0.0171	0.066	F	0.0171	10.61	0.0014	1.26E-05	8.98	19.615	10.635	9.035	10.175	1.14	40.86
80	2010040406	E-O	0.0171	0.066	C	0.0110	8.49	0.0014	1.26E-05	8.64	26.665	18.025	9.28	9.475	0.195	40.86
80	2010040406	N-S	0.0132	0.027	F	0.0132	12.29	0.0012	9.63E-06	8.87	19.28	10.41	8.935	10.42	1.485	40.86
80	2010040406	N-S	0.0132	0.027	C	0.0130	11.90	0.0019	2.38E-05	8.815	26.73	17.915	9.005	11.645	2.64	40.86
80	2010040406	V	0.0113	0.005	F	0.0113	8.69	0.0012	9.63E-06	8.78	17.815	9.035	8.64	12.21	3.57	40.86
80	2010040406	V	0.0113	0.005	C	0.0267	12.73	0.0018	5.04E-05	8.065	19.69	11.625	7.92	19.49	11.57	40.86
81	2010050202	E-O	0.0062	0.073	F	0.0062	5.05	0.0010	7.85E-06	13.705	33.135	19.43	0	0	0	47.36
81	2010050202	E-O	0.0062	0.073	C	0.0091	4.66	0.0016	1.92E-05	10.85	36.965	26.115	0	0	0	47.36
81	2010050202	N-S	0.0132	0.058	F	0.0132	4.05	0.0013	1.37E-05	14.155	30.645	16.49	16.935	16.985	0.035	47.36
81	2010050202	N-S	0.0132	0.058	C	0.0156	5.34	0.0024	4.29E-05	12.535	34.065	21.53	15.415	18.35	2.935	47.36
81	2010050202	V	0.0037	0.005	F	0.0037	5.71	0.0008	4.53E-06	8.715	33.8	25.085	0	0	0	47.36
81	2010050202	V	0.0037	0.005	C	0.0061	10.44	0.0013	1.21E-05	7.385	32.77	23.385	12.24	21.485	9.245	47.36
82	2011060502	E-O	0.0026	0.037	F	0.0026	4.95	0.0005	1.81E-06	11.87	35.1	23.23	0	0	0	47.36
82	2011060502	E-O	0.0026	0.037	C	0.0080	4.62	0.0011	8.79E-06	11.065	35.13	24.065	0	0	0	47.36
82	2011060502	N-S	0.0035	0.014	F	0.0035	4.80	0.0004	1.49E-06	12.05	35.305	23.255	0	0	0	47.36
82	2011060502	N-S	0.0035	0.014	C	0.0073	6.03	0.0013	1.35E-05	10.5	34.71	24.21	0	0	0	47.36
82	2011060502	V	0.0017	0.004	F	0.0017	6.39	0.0003	7.88E-07	8.94	33.765	24.825	0	0	0	47.36
82	2011060502	V	0.0017	0.004	C	0.0031	10.95	0.0005	2.04E-06	8.855	32.28	23.425	0	0	0	47.36
83	2011071505	E-O	0.0037	0.069	F	0.0037	3.58	0.0008	4.85E-06	12.47	36.465	23.995	0	0	0	47.36
83	2011071505	E-O	0.0037	0.069	C	0.0090	3.22	0.0016	2.01E-05	11.23	34.72	23.49	0	0	0	47.36
83	2011071505	N-S	0.0048	0.032	F	0.0048	3.32	0.0009	6.04E-06	13.115	35.965	22.85	0	0	0	47.36
83	2011071505	N-S	0.0048	0.032	C	0.0135	4.48	0.0022	3.75E-05	10.815	36.24	25.425	15.565	22.255	6.69	47.36
83	2011071505	V	0.0031	0.006	F	0.0031	4.42	0.0005	2.20E-06	8.275	36.11	27.835	0	0	0	47.36
83	2011071505	V	0.0031	0.006	C	0.0044	7.90	0.0007	3.37E-06	7.69	33.865	26.175	16.36	39.46	23.1	47.36
84	2012041701	E-O	0.0317	0.559	F	0.0317	5.96	0.0046	2.04E-04	17.24	43.595	26.355	10.36	39.46	23.1	61.00
84	2012041701	E-O	0.0317	0.559	C	0.0388	3.60	0.0067	4.34E-04	16.785	42.815	26.03	12.65	50.655	38.005	61.00
84	2012041701	N-S	0.0269	0.328	F	0.0269	6.05	0.0045	1.97E-04	18.015	43.61	25.595	18.805	43.635	24.83	61.00
84	2012041701	N-S	0.0269	0.328	C	0.0508	4.80	0.0066	4.19E-04	17.005	43.26	26.255	15.67	44.485	28.815	61.00

PARAMETROS PROCESADOS DE REGISTROS SISMICOS

Ind.	Evento	Orient.	PGA [g]	dmax aisl. [cm]	Ubic.	amax [g]	fcentr [Hz]	RMS	Iarias	tiAr	tfAr	Duración Arias [seg]	tiBr	tfBr	DurBr	DurReg
84	2012041701	V	0.0277	0.132	F	0.0277	7.13	0.0039	1.45E-04	11.345	42.215	30.87	6.19	49.55	43.36	61.00
84	2012041701	V	0.0277	0.132	C	0.0413	11.82	0.0076	5.58E-04	10.96	42.165	31.205	4.74	53.735	48.995	61.00
85	2012101101	E-O	0.0234	0.514	F	0.0234	7.54	0.0034	6.62E-05	11.555	24.16	12.605	11.55	20.32	8.77	35.00
85	2012101101	E-O	0.0234	0.514	C	0.0322	4.34	0.0049	1.32E-04	11.34	24.63	13.29	11.245	24.63	13.385	35.00
85	2012101101	N-S	0.0168	0.078	F	0.0168	8.85	0.0028	4.50E-05	11.725	25.315	13.59	11.745	15.275	3.53	35.00
85	2012101101	N-S	0.0168	0.078	C	0.0214	7.89	0.0040	8.93E-05	9.59	27.835	18.245	11.345	22.56	11.215	35.00
85	2012101101	V	0.0161	0.053	F	0.0161	8.20	0.0026	3.65E-05	9.27	24.38	15.11	10.875	23.86	12.985	35.00
85	2012101101	V	0.0161	0.053	C	0.0389	12.72	0.0058	1.89E-04	6.18	24.88	18.7	2.79	30.795	28.005	35.00
86	2013061904	E-O	0.0093	0.115	F	0.0093	5.93	0.0006	2.77E-06	14.39	29.61	15.22	0	0	0	46.00
86	2013061904	E-O	0.0093	0.115	C	0.0116	4.43	0.0011	9.37E-06	14.155	30.305	16.15	14.56	14.775	0.215	46.00
86	2013061904	N-S	0.0040	0.041	F	0.0040	7.98	0.0005	1.51E-06	14.545	31.735	17.19	0	0	0	46.00
86	2013061904	N-S	0.0040	0.041	C	0.0065	6.44	0.0010	7.31E-06	13.855	34.275	20.42	0	0	0	46.00
86	2013061904	V	0.0026	0.024	F	0.0026	8.16	0.0003	8.78E-07	13.725	28.875	15.15	0	0	0	46.00
86	2013061904	V	0.0026	0.024	C	0.0064	13.23	0.0008	5.03E-06	8.535	31.86	23.325	14.915	15.1	0.185	46.00
87	2013083001	E-O	0.0094	0.018	F	0.0094	7.60	0.0007	4.18E-06	14.66	24.08	9.42	0	0	0	47.00
87	2013083001	E-O	0.0094	0.018	C	0.0067	6.68	0.0009	6.58E-06	15.02	29.44	14.42	0	0	0	47.00
87	2013083001	N-S	0.0068	0.019	F	0.0068	7.60	0.0007	3.33E-06	14.52	24.06	9.54	0	0	0	47.00
87	2013083001	N-S	0.0068	0.019	C	0.0085	7.64	0.0011	9.32E-06	14.865	29.855	14.99	0	0	0	47.00
87	2013083001	V	0.0061	0.011	F	0.0061	7.65	0.0006	2.94E-06	14	22.38	8.38	15.455	15.995	0.54	47.00
87	2013083001	V	0.0061	0.011	C	0.0107	11.97	0.0011	9.05E-06	14.255	25.815	11.56	14.91	18.515	3.605	47.00
88	2014030601	E-O	0.0020	0.012	F	0.0020	8.67	0.0003	4.53E-07	10.515	20.595	10.08	0	0	0	32.00
88	2014030601	E-O	0.0020	0.012	C	0.0022	6.41	0.0004	6.45E-07	10.505	20.74	10.235	0	0	0	32.00
88	2014030601	N-S	0.0024	0.010	F	0.0024	8.10	0.0003	4.65E-07	10.68	20.475	9.795	0	0	0	32.00
88	2014030601	N-S	0.0024	0.010	C	0.0032	8.79	0.0004	7.29E-07	10.315	20.35	10.035	0	0	0	32.00
88	2014030601	V	0.0018	0.004	F	0.0018	9.72	0.0002	2.63E-07	7.175	20.2	13.025	0	0	0	32.00
88	2014030601	V	0.0018	0.004	C	0.0057	13.47	0.0006	1.83E-06	9.63	18.875	9.245	11.18	11.22	0.04	32.00
89	2014082302	E-O	0.0031	0.086	F	0.0031	5.24	0.0005	1.96E-06	15.51	36.885	21.375	0	0	0	57.00
89	2014082302	E-O	0.0031	0.086	C	0.0047	3.05	0.0008	5.33E-06	15.095	37.505	22.41	0	0	0	57.00
89	2014082302	N-S	0.0029	0.023	F	0.0029	5.34	0.0004	1.80E-06	15.47	36.28	20.81	0	0	0	57.00
89	2014082302	N-S	0.0029	0.023	C	0.0052	3.37	0.0007	4.70E-06	15.22	34.915	19.695	0	0	0	57.00
89	2014082302	V	0.0022	0.008	F	0.0022	6.52	0.0003	1.09E-06	9.93	37.445	27.515	0	0	0	57.00
89	2014082302	V	0.0022	0.008	C	0.0037	11.55	0.0006	3.58E-06	8.4	36.895	28.495	0	0	0	57.00

ANEXO C

**CÓDIGOS DE PROCEDIMIENTOS
DE IDENTIFICACIÓN**

a) Transformada de Fourier FFT

[OUT] = FFT(IN)

Parámetros de entrada

IN : Estructura de entrada

IN.Y : Matriz de Observaciones [N_{canal} x N_{datos}]

N_{canal} : Número de canales/registros de observación

N_{datos} : Número de datos

IN.Fs : Frecuencia de Muestreo Instrumento [Hz]

IN.fig : [def=1]

[0] No Plotea figura

[1] Plotea figura

IN.fmax : Frecuencia maxima a mostrar en la figura [def=20]

IN.fmin : Frecuencia minima a mostrar en la figura [def=0]

Parámetros de salida

OUT(i) : Estructura de salida del i-esimo canal

OUT(i).f : Vector de frecuencias del espectro de Fourier

OUT(i).ffa: Amplitudes del espectro de Fourier

Archivo necesario: FFT.m

b) Densidad de Espectro de Potencia PSD

[OUT] = PSD(IN)

Parámetros de entrada

IN : Estructura de entrada

IN.Y : Matriz de Observaciones [N_{canal} x N_{datos}]

N_{canal} : Número de canales/registros de observación

N_{datos} : Número de datos

IN.Fs : Frecuencia de Muestreo Instrumento [Hz]

IN.fig : [def=1]

[0] No Plotea figura

[1] Plotea figura

IN.fmax : Frecuencia máxima a mostrar en la figura [def=20]

IN.fmin : Frecuencia mínima a mostrar en la figura [def=0]

Parámetros de salida

OUT(i) : Estructura de salida del i-esimo canal

OUT(i).f : Vector de frecuencias del espectro PSD

OUT(i).Gf: Amplitudes del espectro PSD

Archivo necesario: PSD.m

c) Función de Respuesta en Frecuencia FRF

$$[\text{OUT}] = \text{FRF}(\text{IN})$$

Parámetros de entrada

IN : Estructura de entrada

IN.Y : Matriz de Observaciones [$N_{\text{canal}} \times N_{\text{datos}}$]

N_{canal} : Número de canales/registros de observación

N_{datos} : Número de datos

IN.U : Vector de Excitación [$1 \times N_{\text{datos}}$]

N_{datos} : Número de datos

IN.Fs : Frecuencia de Muestreo Instrumento [Hz]

IN.fig : [def=1]

[0] No Plotea figura

[1] Plotea figura

IN.fmax : Frecuencia máxima a mostrar en la figura [def=20]

IN.fmin : Frecuencia mínima a mostrar en la figura [def=0]

Parámetros de salida

OUT(i) : Estructura de salida del i-esimo canal

OUT(i).f : Vector de frecuencias de FRF

OUT(i).Gf: Amplitudes de FRF

Archivo necesario: FRF.m

d) Método de error de salida en espacio estado multivariable con ventana móvil

[BUFF] = MOESPMV(IN)

Parámetros de entrada

IN: Estructura de Entrada con los campos

IN.Y = Matriz de observaciones del sistema de n_{ch} x n_{dat}

n_{ch} : Número de canales utilizados

n_{dat} : Número de datos registrados

IN.U = Matriz de excitación n_{ch} x n_{dat}

n_{ch} : Número de canales de excitación

n_{dat} : Número de datos registrados

IN.Fs = Frecuencia de Muestreo [Hz]

IN.size_ventana = Tamaño de Ventana de identificación [seg] (con traslapo del 90% de su duración por default)

IN.Nt = Órdenes del modelo para diagramas de estabilización [n_{-1} : Δ n: n_{-f}]

IN.MPC = Valor de Modal Phase Colinearity [%/100]

IN.cBIN = Número de polos estables en un bin [def = 5]

IN.wBIN = Ancho del bin considerado en diagramas de estabilización [def = 0.2]

IN.fg = Graficar figuras de identificación en cada ventana (diagramas de estabilización y polos escogidos, conlleva alto costo computacional si el número de ventanas es alto)

[0]:No - [1]:Si

IN.hist = Graficar resultados con histogramas de datos identificados

[0]:No - [1]:Si

IN.fmax = Frecuencia máxima a filtrar y graficar [Hz]

IN.vector_fbFM = Vector de diferencias porcentuales entre frecuencias, amortiguamientos y MAC. Valores recomendados

Caso Lineal:[0.01 0.05 0.02] - Caso No lineal: [0.05 0.08 0.25]

Parámetros de salida

BUFF(i) : Estructura de salida de la i-esima ventana de tiempo

BUFF(i).f : Vector de frecuencias identificadas

BUFF(i).fpm: Valor de frecuencia identificada en punto medio

BUFF(i).b : Vector de amortiguamientos identificados

BUFF(i).bpm: Valor de amortiguamiento identificado en punto medio

BUFF(i).FM : Matriz de amplitudes de formas modales identificadas

BUFF(i).t: Vector de tiempos de intervalo de ventana de identificación

BUFF(i).tpm: Valor de tiempo en el punto medio de ventana de identificación

Archivo necesario: MOESPMV.m, MOESP_RBA.p, TripleAcierto_RBA.p

e) **Método Recursivo de Error de Predicción con Factor de Olvido λ**

CANAL = RPEMsc(IN)

Parámetros de entrada

IN: Estructura de Entrada con los campos

IN.Y = Matriz de observaciones del sistema de 1 x ndat

ndat: Numero de datos registrados

IN.U = Matriz de excitación 1 x ndat

ndat: Numero de datos registrados

IN.Fs = Frecuencia de Muestreo [Hz]

IN.fmax = Frecuencia máxima a considerar en la identificación en [Hz]

IN.lambda = Factor de Olvido λ entre]0-1]

IN.crit = Criterio de selección de modelo polinomial, pueden ser,

IN.crit = Criterio de selección de modelo polinomial, pueden ser,

'AIC' = Criterio de informacion de Akaike

'BIC' = Criterio de informacion Bayesiano

'FPE' = Criterio de error final de predicción

IN.na = Vector fila de órdenes candidatos para polinomio autoregresivo A(q)

[na_1 : Δ na : na_f]

IN.nb = Vector fila de órdenes candidatos para polinomio de entrada exógena B(q)

[nb_1 : Δ nb : nb_f]

IN.nc = Vector fila de órdenes candidatos para polinomio de media móvil C(q)

[nc_1 : Δ nc : nc_f]

IN.nk = Numero de puntos de desfase entre input y output [def=1];

IN.toff = Vector de tiempos de intervalo de registro utilizado para realizar

estimación offline de condiciones iniciales [t_i t_f];

IN.cov0 = Covarianza inicial de coeficientes polinomiales [def = 10E4]

IN.restr = Restricciones a órdenes polinomiales a considerar en la identificación

[0]: sin restricciones (na \neq nb \neq nc)

[1]: nb = na (Para aceleraciones segun Fassois y Lee)

[2]: nb = na:na-1]

IN.FM = Calcular amplitudes de formas modales 1

[0]: No

[1]: Si

IN.beta = Amortiguamiento máximo considerado en la identificación [%]

Parámetros de salida

CANAL : Estructura de salida del canal utilizado para la identificación

CANAL.MODELO(j) : Estructura del j-ésimo modelo candidato, el cual contiene los campos siguientes

- ordenes: Ordenes polinomiales del modelo
- yhat: Respuesta predicha por el modelo
- aic: Valor AIC del modelo
- bic: Valor BIC del modelo
- fpe: Valor FPE del modelo
- coefs: Coeficientes polinomiales del modelo
- coefsA: Coeficientes de polinomio autorregresivo A(q)
- coefsB: Coeficientes de polinomio de entrada exógena B(q)
- coefsC: Coeficientes de polinomio de media móvil C(q)
- freq: Frecuencias f(t) del modelo
- beta: Amortiguamientos $\beta(t)$ del modelo
- fm: Amplitudes de formas modales $\phi(t)$ del modelo

CANAL.Nombre_Canal: Nombre del canal utilizado

CANAL.indminbic : Indice del modelo candidato con el menor valor de BIC

CANAL.indminaic : Indice del modelo candidato con el menor valor de AIC

CANAL.indminfpe : Indice del modelo candidato con el menor valor de FPE

Archivo necesario: RPEMsc.m

f) Filtro de Partículas con Evolución Artificial de Parámetros

OUT = PF_EAP(IN)

Parámetros de entrada

IN: Estructura de Entrada con los campos

IN.Y = Matriz de observaciones del sistema de $nch \times ndat$

nch : Numero de canales utilizados

ndat: Numero de datos registrados

IN.U = Matriz de excitación $nch \times ndat$

nch : Numero de canales de excitación

ndat: Numero de datos registrados

IN.Fs = Frecuencia de Muestreo [Hz]

IN.nparam = Número de parámetros a estimar

IN.npart = Número de partículas a utilizar

IN.nit = Número de iteraciones de la identificación

IN.res_per = Porcentaje de remuestreo

IN.intentos = Número de intentos iniciales para encontrar solución si es que

error_acum = NaN (i.e peso nulo de todas las partículas)

IN.nomb_param = Nombre de los parámetros (solo para los gráficos)

IN.eap_case = Caso de EAP (Evolución Artificial de Parámetros)

'aleat': ruido de búsqueda asignado aleatoriamente

'peso': ruido de búsqueda asignado por peso de partícula

IN.var_eap_noise = Vector fila de varianzas iniciales de ruido EAP para los
parámetros a identificar

IN.red_var_eap_noise = Vector fila de porcentajes de reducción de varianzas en
remuestreos para ruido de EAP (expresadas en 1-red
i.e 0.9 \rightarrow reduce valor en 10%)

IN.obs_noise_case = Incluye ruido de observación

'yes':si (función verosimilitud gamma)

'no':no (función verosimilitud sigmoidal)

IN.sigm_params = SOLO SI IN.obs_noise_case = 'no' (sin ruido de observación)
parámetros de función sigmoidal [pendiente, x_central de curva]

IN.var_obs_noise = Vector columna de varianzas de ruido de observación

IN.model_case = Cálculo de respuestas,
'in': todas las partículas dentro del modelo
'out': cada partícula fuera del modelo

IN.param_lim_case = Caso de límites admisibles para partículas generadas
'yes': definir límites admisibles para parámetros
'no': no definir límites admisibles para parámetros

IN.param_lim = Matriz de [nparam x 2] que contiene los límites admisibles para parámetros

IN.param_titf = Vector fila de tiempos de inicio y final a considerar en la respuesta para la identificación [ti tf]

IN.dist_type = Tipo de distribución inicial asumida para los parámetros
'g': Gaussiana con parámetros [media var]
'u': Uniforme con parámetros [lim_inf lim_sup]

IN.dist_param = Matriz [nparam x 2] de parámetros correspondientes a la distribución inicial de parámetros donde,
→ si IN.dist_type == 'g' (Gaussiana) IN.dist_param = [med_param, var_param]
Matriz de valores de media y varianzas
→ si IN.dist_type == 'u' (Uniforme) IN.dist_param = [lim_inf, lim_sup]
Matriz de límites inferiores y superiores

IN.res_met = Método de remuestreo, pueden ser
'multinomial_resampling' (Muestreo Multinomial)
'systematic_resampling' (Muestreo Sistemático)

IN.modelo = Función de caja negra del modelo en forma de función
OUTM = modelo(INM) donde,
INM: parámetros de entrada al modelo
OUTM: Matriz de respuestas del modelo de dimensiones nch x ndat

nch : Numero de canales utilizados
ndat: Numero de datos registrados
IN.savefig = Salvar figura de cada iteración
[1]: Si / [0]: No
IN.savefig_path = Path de carpeta donde salvar figuras

Parámetros de salida

OUT(j): Estructura de salida de la j-ésima iteración con los campos,

OUT(j).pk = Matriz de partículas [nparm x npart]

OUT(j).wk = Matriz de pesos de partículas [nparm x npart]

OUT(j).eacum = Valor de estimador de tamaño efectivo de muestras

OUT(j).umbral = Valor de umbral definido para realizar remuestreo de partículas

Archivo necesario: PF_EAP.m

ANEXO D

RESULTADOS DE

IDENTIFICACIÓN EN ESTUDIO

ANALÍTICO

ANEXO E

RESULTADOS DE

IDENTIFICACIÓN DE EDIFICIO

AISLADO EXISTENTE

RESULTADOS Y DATOS EN ANEXOS D Y E

Los resultados y datos presentes en los Anexos D y E se encuentran en la Unidad de almacenamiento externo adjunto al presente archivo.