



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

EFECTO DEL SISMO VERTICAL EN LA EFICIENCIA DE
DISIPADOR DE MASA SINTONIZADA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

EDUARDO JOSÉ LAGOS RODRÍGUEZ

PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF
RAFAEL RUIZ GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL
POR: EDUARDO JOSÉ LAGOS RODRÍGUEZ
FECHA: MARZO 2020
PROF. GUÍA: FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

EFEECTO DEL SISMO VERTICAL EN LA EFICIENCIA DE DISIPADOR DE MASA SINTONIZADA

Los Disipadores de Masa Sintonizada (DMS) corresponden a un sistema que permite mitigar las vibraciones de una estructura, a partir de un movimiento sincronizado que genera fuerzas restitutivas, reduciendo la respuesta de la estructura a la cual se incorpora. En este contexto, los DMS han sido ampliamente utilizados para reducir las vibraciones producidas tanto por efectos de viento o sismos, en especial para estructuras altas. En general, los DMS son diseñados considerando el efecto de las acciones sísmicas horizontales, sin sopesar el efecto de una acción vertical simultánea y por tanto ser proclives a perder su sincronización y/o efectividad de mitigación de respuesta.

La presente investigación estudia la eficiencia de un DMS tipo péndulo, frente a la amenaza que supone la componente vertical de un sismo subductivo tipo thrust y/o a uno del tipo intraplaca, casos donde el movimiento vertical puede ser comparable al movimiento superficial horizontal. Para esto, se construye un DMS tipo péndulo que se implementa en una estructura de seis niveles, sujeta a la acción de registros sísmicos con y sin componente vertical, de los cuales se obtienen doce configuraciones de ensayo. Estos registros son aplicados en la base de la estructura mediante la mesa de vibrar del Laboratorio de Sólidos de la Universidad de Chile.

Con el fin de poder estudiar de manera teórica el comportamiento de la estructura, se programa un modelo que replica su respuesta frente a cada configuración de ensayo. En conjunto se modela la respuesta del DMS instalado en la estructura, determinando su comportamiento y por consiguiente la fuerza que ejerce sobre ella. Para distintas configuraciones de periodo y tasa de amortiguamiento del DMS, es posible construir una gráfica 3D que define la zona en que el dispositivo trabaja de forma óptima, reduciendo las demandas de la respuesta de la estructura del modelo teórico. En conjunto, se genera el modelo teórico de una estructura de mayor periodo. En base a este modelo es posible construir una gráfica 3D que define la zona en que el sismo vertical amplifica la respuesta de la estructura junto al dispositivo.

El análisis de los resultados experimentales muestra que en cada uno de los ensayos realizados es posible observar que la componente vertical del sismo afecta la eficiencia del DMS, aumentando la aceleración máxima de la estructura. Sin embargo, esta aceleración no supera la medida en los ensayos en los cuales no se empleó un DMS. De esta manera, en términos de aceleración, para cada uno de los casos analizados experimentalmente en este trabajo, la implementación del DMS es siempre favorable independiente del aumento de la componente vertical del registro ensayado.

Agradecimientos

A Dios por cumplir su promesa,

A mi familia por su apoyo incondicional,

A los amigos que gané y los que han perdurado,

A cada familia que me dio un hogar,

A cada profesor me enseñó con paciencia.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción	13
1.1 Motivación.....	13
1.2 Objetivos	18
1.3 Metodología.....	19
Capítulo 2 : Disipador de Masa Sintonizada	24
2.1 Introducción.....	24
2.2 Antecedentes y desarrollo de los DMS	26
2.3 Aplicación de DMS en estructuras reales.....	31
Capítulo 3 : Diseño de Disipador de Masa Sintonizada	39
3.1 Introducción.....	39
3.2 Formulación matemática.....	42
3.3 Parámetros óptimos de diseño.....	43
3.4 Ecuaciones de equilibrio dinámico del péndulo	60
Capítulo 4 : Metodología y Montaje en Laboratorio	72
4.1 Introducción.....	72
4.2 Descripción de la estructura a controlar.....	73
4.3 Descripción del DMS tipo péndulo.....	77
4.4 Montaje en laboratorio.....	81
4.5 Registros utilizados para la comparación	88
4.6 Determinación de parámetros modales de la estructura.....	101
4.7 Desarrollo modelo teórico de la estructura.....	116
Capítulo 5 : Resultados	132
5.1 Introducción.....	132
5.2 Output e input, ensayo experimental.....	134
5.3 Cuadro de respuesta, método DSI.....	138
5.4 Espectrograma.....	142
5.5 Fuerza horizontal ejercida por DMS	144
5.6 Desplazamiento entre niveles.....	146
5.7 Corte entre niveles.....	150
5.8 Resumen respuesta experimental estructura	154
Capítulo 6 : Modelo Estructura de 20 Niveles	160
6.1 Introducción.....	160
6.2 Propiedades dinámicas del sistema.....	161
6.3 Ensayo del modelo.....	163
Capítulo 7 : Análisis de Resultados y Conclusiones	170
7.1 Conclusiones	171
Bibliografía	175
Anexos	180

A.1	Modelo Estructura de 20 Niveles.....	181
A.2	Razón de reducción por configuración de parámetros del DMS.....	185
A.3	Output e Input, Ensayo Experimental.....	189
A.4	Cuadro de respuesta, método DSI.....	201
A.5	Espectrogramas	213
A.6	Fuerza Horizontal ejercida por DMS.....	218
A.7	Desplazamiento entre niveles.....	222
A.8	Corte entre niveles.....	229

Índice de Tablas

Tabla 4-1: Propiedades Mecánicas Del Acero Estructural.	73
Tabla 4-2: Peso De Cada Nivel De La Estructura	76
Tabla 4-3: Características Técnicas Acelerómetros Kistler.	82
Tabla 4-4: Ubicación De Sensores En La Estructura	83
Tabla 4-5: Valores Límites De Movimiento De La Mesa Vibradora.	89
Tabla 4-6: Fuente De Registros Utilizados Para Ensayar La Estructura	90
Tabla 4-7: Escala De Registros Utilizados Para Ensayar La Estructura	91
Tabla 4-8: Aceleración Máxima E Intensidad De Housner De Cada Registro Teórico.	93
Tabla 4-9: Aceleración Máxima E Intensidad De Housner De Cada Registro En Laboratorio.....	97
Tabla 4-10: Tabla Resultado Dsi Para Respuesta “Llol_050000_0.Txt”.....	103
Tabla 4-11: Valor Óptimo Para La Razón De Frecuencias, Razón De Amortiguamiento, Frecuencia Y Periodo Del Dms.....	108
Tabla 6-1: Propiedades Dinámicas Del Modelo Estructura De 20 Niveles.....	161
Tabla 6-2: Propiedades Dinámicas Dms, Estructura De 20 Niveles.....	162

Índice de Figuras

Figura 1-1: Distribución De Pérdidas Económicas En Edificios De Oficinal, Hoteles Y Hospitales, Durante Los Últimos Eventos Sísmicos (E. Miranda).....	14
Figura 1-2: Registro De Aceleraciones Sismo De Kobe (1995), Estación Port Island.....	16
Figura 1-3: Espectro De Potencia, Sismo De Kobe (1995), Estación Port Island.....	17
Figura 2-1: Dms En Burj Al Arab, Dubai (Brewer Smith Brewer Group, 2017).....	25
Figura 2-2: Torre Titanium La Portada Y Disipador Sísmico Del Tipo Histerético Implementado (Emb Construcción, 2012).....	26
Figura 2-3: Patente De Dispositivo Para Amortiguamiento De Vibraciones, Perteneciente A H. Frahm (Frahm, 1909).....	28
Figura 2-4: Edificio Parque Araucano Santiago (Chapple, 2008).....	32
Figura 2-5: Masa Del Dms, Con Su Sistema De Anclaje En Detalle (Chapple, 2008).....	32
Figura 2-6: Torre Taipei 101 (Encyclopedia Britannica, 2017).....	33
Figura 2-7: Disipador De Masa Sintonizada De Tipo Péndulo, Torre Taipei 101 (Encyclopedia Britannica, 2017).....	33
Figura 2-8: Torres Petronas, Kuala Lumpur (Wikiarquitectura, S. F.).....	34
Figura 2-9: Skybridge, Torres Petronas (Wikiarquitectura, S. F.).....	34
Figura 2-10: Torre Shinjuku Park, Tokio (Emporis, S. F.).....	35
Figura 2-11: Shinjuku Mitsui Building, Tokio (The International Appraiser, 2012).....	36
Figura 2-12: Diagrama De Dms En Shinjuku Mitsuri Building (Mitsui Fudosan, 2013).....	36
Figura 2-13: Puente Akashi-Kaikyo, Osaka Japón (Japan Guide, S. F.).....	37
Figura 3-1: Diagrama De Fuerzas, Esquema Dms Simplificado.....	40
Figura 3-2: Sistema De Dms Tipo Péndulo, En Taipei 101 (Civil Engineering Forum, S. F.).....	41
Figura 3-3: Modelo Simplificado Estructura Principal No Amortiguada, Dms No Amortiguado.....	43
Figura 3-4: Modelo Simplificado Estructura Principal No Amortiguada, Dms Amortiguado.....	47
Figura 3-5: Puntos P Y Q (Rozas, 2009).....	49
Figura 3-6: Modelo Simplificado Estructura Principal Amortiguada, Dms Amortiguado.....	51
Figura 3-7: Diagrama De Flujo Para Diseño De Dms.....	59
Figura 3-8: Diagrama De Péndulo Simple.....	60
Figura 3-9: Diagrama De Péndulo Compuesto.....	64
Figura 3-10: Diagrama Del Péndulo Frente A Acciones Externas.....	67
Figura 4-1: Sección Transversal Perfil De Acero Estructura.....	73
Figura 4-2: Estructura Principal De Seis Niveles.....	74
Figura 4-3: Vista En Planta Y Elevación De La Estructura. Señala Dimensiones En Milímetros Y Grados De Libertad De Ésta. Esquema Modificado Del Realizado Por Rozas (Rozas, 2009).....	75
Figura 4-4: Dms Tipo Péndulo Desde Vista Frontal.....	77
Figura 4-5: Diagrama Dms Con Dimensiones En Milímetros.....	79
Figura 4-6: Bloque De Madera (1) Y Abrazadera (2).....	80
Figura 4-7: Acelerómetro Kistler 8310a K-Beam (Kistler Instruments Corporation, S. F.).....	81
Figura 4-8: Montaje Experimental Sensores A9, A10 Y A11.....	83
Figura 4-9: Disposición De Sensores En La Estructura.....	84
Figura 4-10: Esquema Del Funcionamiento De Un Sistema Daq (National Instruments, 2020).....	85

Figura 4-11: Dispositivo De Adquisición De Datos	86
Figura 4-12: Computador Sistema Que Posee La Tarjeta De Adquisición De Datos.	86
Figura 4-13: Cámara De Video Panasonic Ag-Ac30.....	87
Figura 4-14: Ejes Cartesianos Mesa Vibradora.	88
Figura 4-15: Registros Teóricos Aplicados A La Mesa Moog Asociados Al Terremoto De Kobe 1995.....	94
Figura 4-16: Registros Teóricos Aplicados A La Mesa Moog Asociados Al Terremoto De Llolleo 2010.	95
Figura 4-17: Registros Teóricos Aplicados A La Mesa Moog Asociados Al Terremoto De Pica 2005.....	96
Figura 4-18: Registros Teóricos Aplicados A La Mesa Moog Asociados Al Terremoto De Llolleo 2010, Modificado.	96
Figura 4-19: Registros Experimentales Obtenidos A Partir De La Mesa Moog Asociados Al Terremoto De Kobe 1995.	98
Figura 4-20: Registros Experimentales Obtenidos A Partir De La Mesa Moog Asociados Al Terremoto De Llolleo 2010.....	99
Figura 4-21: Registros Experimentales Obtenidos A Partir De La Mesa Moog Asociados Al Terremoto De Pica 2005.....	99
Figura 4-22: Registros Experimentales Obtenidos A Partir De La Mesa Moog Asociados Al Terremoto De Llolleo 2010, Modificado.	100
Figura 4-23: Resultados Dsi Para Respuesta “Llol_050000_0.Txt”.....	103
Figura 4-24: Formas De Vibrar, Frecuencias Y Amortiguamiento De La Estructura.	105
Figura 4-25: Razón De Reducción De Aceleración, Registro ‘Llol07050000’.....	109
Figura 4-26: Razón De Reducción De Drift, Registro ‘Llol07050000’.....	110
Figura 4-27: Razón De Reducción De Corte Basal, Registro ‘Llol07050000’.....	111
Figura 4-28: Resultados De Iteración Final Del Ensayo De Ajuste Del Dms.	113
Figura 4-29: Resultados Dsi Para Registro “Llol_050000_1.Txt”.....	114
Figura 4-30: Función Transferencia De Dms, Registro “Llol_050050_1.Txt”, Input Horizontal.....	115
Figura 4-31: Función Transferencia De Dms, Registro “Llol_050050_1.Txt”, Input Vertical.....	115
Figura 4-32: Input Y Outputs Para Dms En “Llol_050050_1”.....	117
Figura 4-33: Diagrama De Aceleraciones Del Péndulo.....	118
Figura 4-34: Esquema De Aceleración Angular Constante, Método De Newmark.	120
Figura 4-35: Esquema De Velocidad Angular Constante, Método De Newmark.....	121
Figura 4-36: Esquema De Ángulo De Giro Exponencial, Método De Newmark.	122
Figura 4-37: Comparación Respuesta Péndulo, Mediante Factor Nrmse.....	123
Figura 4-38: Razón De Amortiguamiento Y Frecuencia, Modelo Dms ‘Llol_050050_1’.....	124
Figura 4-39: Fuerza Horizontal, Modelo Dms ‘Llol_050050_1’.....	125
Figura 4-40: Comparación Respuesta Teórica Y Experimental, Mediante Coeficiente Nrmse, Registro “Llol_050000_1.Txt”.	127
Figura 4-41: : Comparación Frecuencia Teórica Y Experimental, Mediante Coeficiente Nrmse, Registro “Llol_050000_1.Txt”.	128
Figura 4-42: Ajuste De Amortiguamiento Para Los Tres Primeros Modos, Registro “Llol_050000_1.Txt”.	128
Figura 4-43: Desplazamiento Entre Pisos Modelo Teórico, Registro “Llol_050000_1.Txt”.....	129
Figura 4-44: Corte Entre Pisos Modelo Teórico, Registro “Llol_050000_1.Txt”.....	130
Figura 5-1: Output E Input, Registro ‘Llol_050000_0’.....	134
Figura 5-2: Output E Input, Registro ‘Llol_050000_1’.....	135
Figura 5-3: Output Dms, Registro ‘Llol_050000_1’.....	135
Figura 5-4: Output E Input, Registro ‘Llol_050050_1’.....	136

Figura 5-5: Output Dms, Registro ‘Llol_050050_1’.....	136
Figura 5-6: Output E Input, Registro ‘Llol_050100_1’.....	137
Figura 5-7: Output Dms, Registro ‘Llol_050100_1’.....	137
Figura 5-8: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050000_0” Caso1 (Sin Dms).....	138
Figura 5-9: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050000_1” Caso1 (Con Dms).....	139
Figura 5-10: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050000_1” Caso2 (Con Dms).....	139
Figura 5-11: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050050_1” Caso1 (Con Dms).....	140
Figura 5-12: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050050_1” Caso2 (Con Dms).....	140
Figura 5-13: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050100_1” Caso1 (Con Dms).....	141
Figura 5-14: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050100_1” Caso2 (Con Dms).....	141
Figura 5-15: Espectrogramas Para Registros Llolleo.....	143
Figura 5-16: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Llol_050000_1.Txt”.....	144
Figura 5-17: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Llol_050050_1.Txt”.....	145
Figura 5-18: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Llol_050100_1.Txt”.....	145
Figura 5-19: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Llol_050000_0”.....	147
Figura 5-20: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Llol_050000_1”.....	148
Figura 5-21: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Llol_050050_1”.....	148
Figura 5-22: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Llol_050100_1”.....	149
Figura 5-23: Corte Entre Niveles, Registro “Llol_050000_0”.....	151
Figura 5-24: Corte Entre Niveles, Registro “Llol_050000_1”.....	152
Figura 5-25: Corte Entre Niveles, Registro “Llol_050050_1”.....	152
Figura 5-26: Corte Entre Niveles, Registro “Llol_050100_1”.....	153
Figura 5-27: Gráfico De Aceleraciones Máximas Absolutas, Registros ‘Kobe’.....	155
Figura 5-28: Gráfico De Aceleraciones Máximas Absolutas, Registros ‘Llol’.....	155
Figura 5-29: Gráfico De Aceleraciones Máximas Absolutas, Registros ‘Pica’.....	155
Figura 5-30: Gráfico De Aceleraciones Máximas Absolutas, Registros ‘Lmod’.....	155
Figura 5-31: Gráfico De Desplazamiento Relativo Máximo, Registros ‘Kobe’.....	156
Figura 5-32: Gráfico De Desplazamiento Relativo Máximo, Registros ‘Llol’.....	156
Figura 5-33: Gráfico De Desplazamiento Relativo Máximo, Registros ‘Pica’.....	156
Figura 5-34: Gráfico De Desplazamiento Relativo Máximo, Registros ‘Lmod’.....	156
Figura 5-35: Gráfico De Corte Máximo Por Nivel, Registros ‘Kobe’.....	157
Figura 5-36: Gráfico De Corte Máximo Por Nivel, Registros ‘Llol’.....	157
Figura 5-37: Gráfico De Corte Máximo Por Nivel, Registros ‘Pica’.....	157
Figura 5-38: Gráfico De Corte Máximo Por Nivel, Registros ‘Lmod’.....	157
Figura 5-39: Gráfico De Intensidad De Housner Por Nivel, Registros ‘Kobe’.....	158
Figura 5-40: Gráfico De Intensidad De.....	158
Figura 5-41: Gráfico De Intensidad De.....	158
Figura 5-42: Gráfico De Intensidad De.....	158
Figura 6-1: Output Nivel Superior, Estructura 20 Niveles Kobe_100100_1.....	163
Figura 6-2: Output Nivel Superior, Estructura 20 Niveles Llol_050100_1.....	163
Figura 6-3: Output Nivel Superior, Estructura 20 Niveles Pica_100100_1.....	164
Figura 6-4: Desplazamiento Dms, Estructura 20 Niveles Kobe_100100_1.....	164
Figura 6-5: Desplazamiento Dms, Estructura 20 Niveles Llol_050100_1.....	165
Figura 6-6: Desplazamiento Dms, Estructura 20 Niveles Pica_100100_1.....	165
Figura 6-7: Variación De Aceleración, Añadiendo Componente Vertical,.....	166
Figura 6-8: Variación De Aceleración, Añadiendo Componente Vertical,.....	166

Figura 6-9: Variación De Aceleración, Añadiendo Componente Vertical,.....	167
Figura 0-1: Variación De Drift, Añadiendo Componente Vertical,.....	181
Figura 0-2: Variación De Drift, Añadiendo Componente Vertical,.....	182
Figura 0-3: Variación De Drift, Añadiendo Componente Vertical,.....	182
Figura 0-4: Variación De Corte Basal, Añadiendo Componente Vertical,.....	183
Figura 0-5: Variación De Corte Basal, Añadiendo Componente Vertical,.....	184
Figura 0-6: Variación De Corte Basal, Añadiendo Componente Vertical,.....	184
Figura 0-7: Razón De Reducción De Aceleración, Registro ‘Kobe04100000’.....	185
Figura 0-8: Razón De Reducción De Corte Basal, Registro ‘Kobe04100000’.....	186
Figura 0-9: Razón De Reducción De Desplazamiento, Registro ‘Kobe04100000’.....	186
Figura 0-10: Razón De Reducción De Aceleración, Registro ‘Pica06100000’.....	187
Figura 0-11: Razón De Reducción De Corte Basal, Registro ‘Pica06100000’.....	187
Figura 0-12: Razón De Reducción De Desplazamiento, Registro ‘Pica06100000’.....	188
Figura 0-13: Output E Input, Registro ‘Kobe_100000_0’.....	189
Figura 0-14: Output E Input, Registro ‘Kobe_100000_1’.....	190
Figura 0-15: Output Dms, Registro ‘Kobe_100000_1’.....	190
Figura 0-16: Output E Input, Registro ‘Kobe_100100_1’.....	191
Figura 0-17: Output Dms, Registro ‘Kobe_100100_1’.....	191
Figura 0-18: Output E Input, Registro ‘Llol_050000_0’.....	192
Figura 0-19: Output E Input, Registro ‘Llol_050000_1’.....	193
Figura 0-20: Output Dms, Registro ‘Llol_050000_1’.....	193
Figura 0-21: Output E Input, Registro ‘Llol_050050_1’.....	194
Figura 0-22: Output Dms, Registro ‘Llol_050050_1’.....	194
Figura 0-23: Output E Input, Registro ‘Llol_050100_1’.....	195
Figura 0-24: Output Dms, Registro ‘Llol_050100_1’.....	195
Figura 0-25: Output E Input, Registro ‘Pica_100000_0’.....	196
Figura 0-26: Output E Input, Registro ‘Pica_100000_1’.....	197
Figura 0-27: Output Dms, Registro ‘Pica_100000_1’.....	197
Figura 0-28: Output E Input, Registro ‘Pica_100100_1’.....	198
Figura 0-29: Output Dms, Registro ‘Pica_100100_1’.....	198
Figura 0-30: Output E Input, Registro ‘Lmod_050050_1’.....	199
Figura 0-31: Output Dms, Registro ‘Lmod_050050_1’.....	199
Figura 0-32: Output E Input, Registro ‘Lmod_050100_1’.....	200
Figura 0-33: Output Dms, Registro ‘Lmod_050100_1’.....	200
Figura 0-34: Cuadro Dsi, Registro “Kobe_100000_0” Caso1.....	201
Figura 0-35: Cuadro Dsi, Registro “Kobe_100000_1” Caso1.....	202
Figura 0-36: Cuadro Dsi, Registro “Kobe_100000_1” Caso2.....	202
Figura 0-37: Cuadro Dsi, Registro “Kobe_100100_1” Caso1.....	203
Figura 0-38: Cuadro Dsi, Registro “Kobe_100100_1” Caso2.....	203
Figura 0-39: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050000_0” Caso1.....	204
Figura 0-40: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050000_1” Caso1.....	205
Figura 0-41: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050000_1” Caso2.....	205
Figura 0-42: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050050_1” Caso1.....	206
Figura 0-43: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050050_1” Caso2.....	206
Figura 0-44: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050100_1” Caso1.....	207
Figura 0-45: Cuadro Dsi, Registro “Llol_050100_1” Caso2.....	207

Figura 0-46: Cuadro Dsi, Registro “Pica_100000_0” Caso1.....	208
Figura 0-47: Cuadro Dsi, Registro “Pica_100000_1” Caso1.....	209
Figura 0-48: Cuadro Dsi, Registro “Pica_100000_1” Caso2.....	209
Figura 0-49: Cuadro Dsi, Registro “Pica_100100_1” Caso1.....	210
Figura 0-50: Cuadro Dsi, Registro “Pica_100100_1” Caso2.....	210
Figura 0-51: Cuadro Dsi, Registro “Lmod_050050_1” Caso1.....	211
Figura 0-52: Dsi “Lmod_050050_1” Caso2.....	212
Figura 0-53: Espectrogramas Para Registros ‘Kobe’.....	213
Figura 0-54: Espectrogramas Para Registros ‘Llol’.....	215
Figura 0-55: Espectrogramas Para Registros ‘Pica’.....	216
Figura 0-56: Espectrogramas Para Registros ‘Lmod’.....	217
Figura 0-57: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Kobe_100000_1.Txt”.....	218
Figura 0-58: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Kobe_100100_1.Txt”.....	218
Figura 0-59: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Llol_050000_1.Txt”.....	219
Figura 0-60: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Llol_050050_1.Txt”.....	219
Figura 0-61: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Llol_050100_1.Txt”.....	219
Figura 0-62: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Pica_100000_1.Txt”.....	220
Figura 0-63: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Pica_100100_1.Txt”.....	220
Figura 0-64: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Lmod_050050_1.Txt”.....	221
Figura 0-65: Archivo De Vector De Fuerzas “Fh_Lmod_050100_1.Txt”.....	221
Figura 0-66: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Kobe_100000_0”.....	222
Figura 0-67: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Kobe_100000_1”.....	223
Figura 0-68: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Kobe_100100_1”.....	223
Figura 0-69: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Llol_050000_0”.....	224
Figura 0-70: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Llol_050000_1”.....	224
Figura 0-71: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Llol_050050_1”.....	225
Figura 0-72: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Llol_050100_1”.....	225
Figura 0-73: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Pica_100000_0”.....	226
Figura 0-74: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Pica_100000_1”.....	226
Figura 0-75: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Pica_100100_1”.....	227
Figura 0-76: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Lmod_050050_1”.....	228
Figura 0-77: Desplazamiento Entre Niveles, Registro “Lmod_050100_1”.....	228
Figura 0-78: Corte Entre Niveles, Registro “Kobe_100000_0”.....	229
Figura 0-79: Corte Entre Niveles, Registro “Kobe_100000_1”.....	230
Figura 0-80: Corte Entre Niveles, Registro “Kobe_100100_1”.....	230
Figura 0-81: Corte Entre Niveles, Registro “Llol_050000_0”.....	231
Figura 0-82: Corte Entre Niveles, Registro “Llol_050000_1”.....	231
Figura 0-83: Corte Entre Niveles, Registro “Llol_050050_1”.....	232
Figura 0-84: Corte Entre Niveles, Registro “Llol_050100_1”.....	232
Figura 0-85: Corte Entre Niveles, Registro “Pica_100000_0”.....	233
Figura 0-86: Corte Entre Niveles, Registro “Pica_100000_1”.....	233
Figura 0-87: Corte Entre Niveles, Registro “Pica_100100_1”.....	234
Figura 0-88: Corte Entre Niveles, Registro “Lmod_050050_1”.....	235
Figura 0-89: Corte Entre Niveles, Registro “Lmod_050100_1”.....	235

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

Durante los últimos años, el área de la construcción se ha visto obligada a generar estructuras de cada vez mayor altura, esto en respuesta a la gran densidad poblacional que generan grandes demandas de vivienda en el sector urbano, junto con el costo del terreno en grandes ciudades.

Si bien esta solución ha sido eficiente en términos de cubrir necesidades de espacio, estas estructuras poseen características que las vuelven vulnerables frente a sismos de gran envergadura, debido a su bajo amortiguamiento y gran flexibilidad. Estas características aumentan las probabilidades de que tanto elementos estructurales como no estructurales sean susceptibles a sufrir daños. Son los daños no estructurales en estructuras altas (en Chile), los que han cobrado mayor importancia últimamente, debido a que generan actualmente los mayores gastos económicos mientras que su destrucción o pérdida dificulta

la distribución de ayuda en la zona afectada por un evento sísmico. Análisis estadísticos realizados por E. Miranda (Ordaz et al., 2000) a partir de los registros sísmicos de México durante las últimas tres décadas del siglo XX, ilustran la distribución de pérdidas económicas de daños estructurales, no estructurales y contenido en edificios de oficinas, hoteles y hospitales, donde destacan las pérdidas asociadas a componentes no estructurales y al contenido de la estructura (ver Figura 1-1).

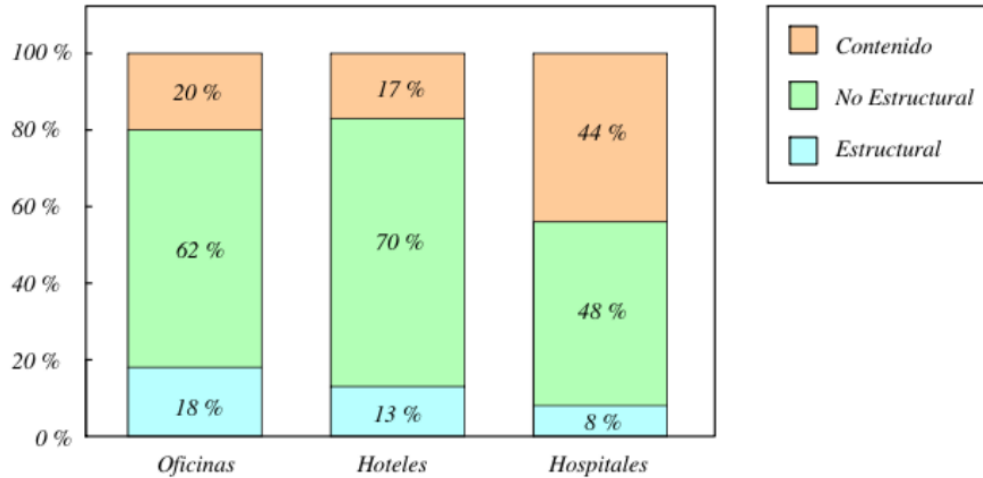


Figura 1-1: Distribución de pérdidas económicas en edificios de oficinal, hoteles y hospitales, durante los últimos eventos sísmicos (E. Miranda).

Para evitar daños y por lo tanto pérdidas tanto económicas como humanas en este tipo de estructuras, la ingeniería propone cómo solución la implementación de sistemas de protección sísmica, ya siendo aisladores basales, sistemas activos, o sistemas pasivos de disipación de energía. Si bien cada uno de los métodos mencionados tienen en común el mismo objetivo, los disipadores pasivos poseen características ventajosas frente a otros sistemas al ser implementados en edificios altos: no significar mayores modificaciones en la estructura, como lo es en el caso de emplear sistemas con aisladores sísmicos basales (que son difíciles de montar en estructuras existentes y poco efectivos para estructuras altas), o no poseer mayores costos de mantenimiento y operación como en los sistemas activos de disipación.

Los disipadores pasivos se clasifican en dos categorías (de acuerdo a trabajos anteriores en DMS) (Rozas, 2009), dependiendo de la manera en que la energía es disipada:

disipadores pasivos directos e indirectos. Los disipadores pasivos directos aumentan el nivel de amortiguamiento equivalente de la estructura por medio de mecanismos de disipación que aprovechan la deformación relativa de esta, tales como amortiguadores viscosos, de fricción o la adición de elementos metálicos diseñados para comportarse en forma plástica. Por otra parte los indirectos, a diferencia de los mencionados anteriormente, disipan energía de forma pasiva sin requerir energía adicional, mediante la incorporación de un sistema secundario que se adhiere a la estructura para modificar su respuesta en frecuencia. Es decir, se diseñan de manera que su respuesta local genera una acción en la estructura principal, dando como resultado la mitigación de su movimiento.

Los Disipadores de Masa Sintonizada (DMS) corresponden a un sistema pasivo indirecto de disipación de energía (o amortiguamiento inercial, considerando el efecto de fuerzas restitutivas). Han sido por años objeto de estudio en el área de la ingeniería estructural, a partir de su patente el año 1909 por parte de F. Frahm (Frahm, 1909), hasta el día de hoy, evolucionado notablemente hasta alcanzar características de control autónomo en el tiempo: DMS inteligentes.

Si bien estudios recientes sobre DMS han demostrado su eficiencia abordando el asunto a nivel general (Rozas, 2009) o más específicamente asociado a registros chilenos (Garrido, 2016), actualmente la normativa que trata sobre diseño sismorresistente, en este caso la norma NCh2745 “Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica” no hace referencias a disipadores de energía implementados en la superestructura, mientras que la norma NCh3411 “Diseño sísmico de edificios con sistemas pasivos de disipación de energía” no aplica a estructuras con disipadores de tipo inercial, como lo son los DMS. A pesar de que los DMS poseen una gran trayectoria y han obtenido numerosos avances en el último tiempo, su implementación en edificios es reciente, por consiguiente, cada día surgen interrogantes sobre los factores que podría afectar la eficiencia de estos sistemas de disipación.

Al ser la frecuencia del DMS una característica fundamental para su correcto funcionamiento, genera interés el lograr identificar los factores que afectarían este parámetro. Esto debido a que, como consecuencia de un defectuoso comportamiento del dispositivo, se ocasione una desintonización de éste, generando una amplificación de la respuesta de la estructura a controlar. De igual forma es reconocido que las estructuras al incursionar en un rango inelástico pueden sufrir variaciones de sus propiedades dinámicas en el tiempo, causando en el DMS una pérdida de eficiencia al generarse una desintonización de su respuesta.

Dentro de los posibles factores de riesgo capaces de afectar la eficiencia del dispositivo, se encuentra la prominente aceleración vertical producto de un sismo. Este fenómeno es especialmente relevante en los lugares más cercanos al epicentro, donde la amplitud de su aceleración vertical alcanza niveles cercanos a las amplitudes de las componentes horizontales. Es por esto que llaman la atención casos como los registros adquiridos para el terremoto de Kobe (1995, $M_w=6.9$), sismo de falla superficial cuyo PGA (Peak Ground Acceleration) vertical supera considerablemente el valor de la horizontal (COSMOS, s. f.), o para el caso del terremoto tipo intraplaca que aconteció en Tarapacá (2005, $M_w=7.8$) donde las componentes verticales en la estación PICA son altas y comparables con las registradas en la dirección horizontal (Boroschek et al., 2006).

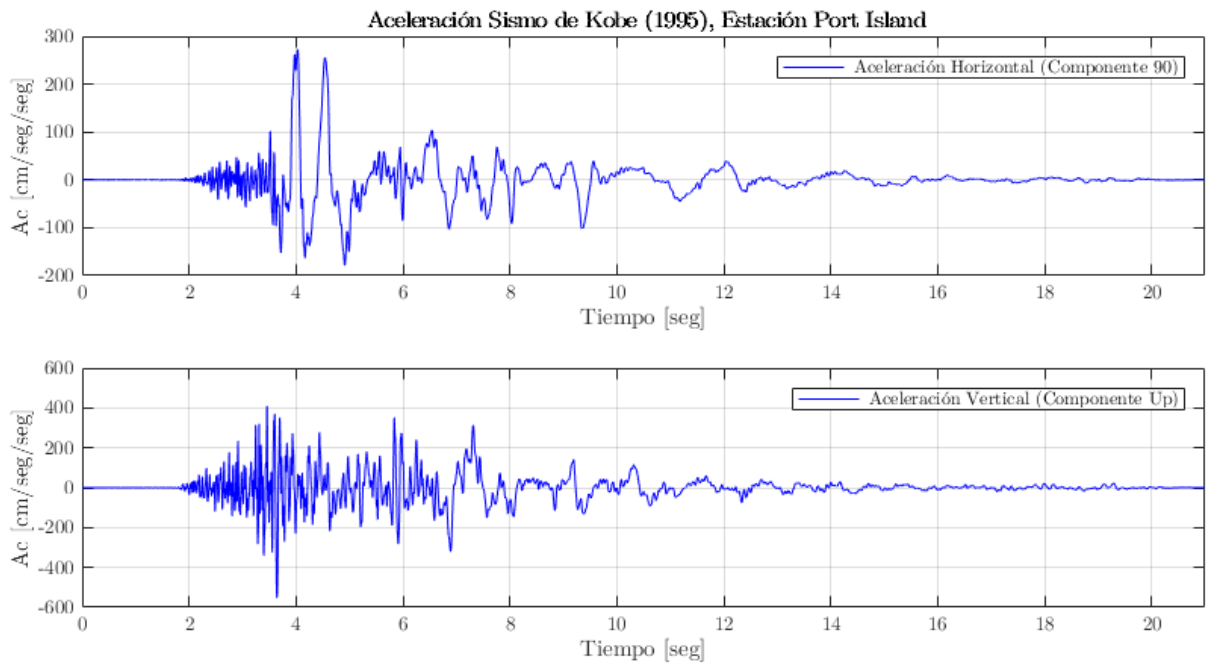


Figura 1-2: Registro de aceleraciones Sismo de Kobe (1995), estación Port Island.

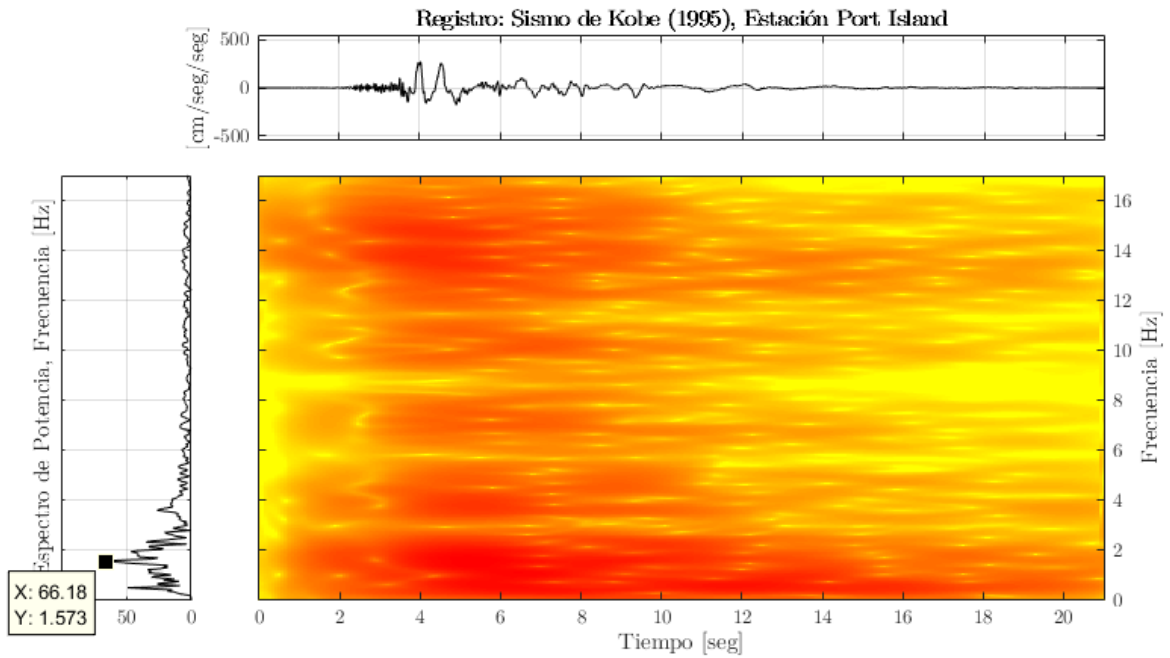


Figura 1-3: Espectro de potencia, Sismo de Kobe (1995), estación Port Island.

En base a lo descrito anteriormente, los puntos ya mencionados han motivado el interés por investigar la repercusión y por lo tanto el nivel de pérdida de eficiencia que supone la componente vertical del sismo en el correcto funcionamiento de un DMS. Sistema que ha resultado ser el más efectivo para controlar respuestas estructurales frente a excitaciones armónicas y por viento.

En este caso de estudio corresponde a un DMS del tipo péndulo, dado que dentro de las diferentes tipologías de DMS es uno de los más tradicionalmente empleados y posee una evidente susceptibilidad al movimiento vertical.

1.2 Objetivos

La siguiente sección presenta y detalla cada uno de los objetivos de este trabajo:

1.2.1 Objetivo General

El objetivo de esta memoria es estudiar la reducción de la eficiencia de un disipador de masa sintonizada, frente a la desincronización que padece este, producto del efecto de la componente vertical de un sismo.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta memoria son los siguientes:

- Determinación teórica de los parámetros modales de la estructura a controlar.
- Confeccionar un DMS de tipo péndulo, a partir de la respuesta de la estructura.
- A partir de registros sísmicos reales, generar registros especiales para analizar la reducción de eficiencia del DMS sujeto a sismo vertical.
- Programar un modelo teórico de la estructura junto al DMS, replicando la respuesta del sistema frente a cada configuración de ensayo.
- Realizar ensayos en mesa vibradora de la estructura con el DMS diseñado. Los ensayos se realizarán con y sin sismo vertical, considerando diversos tipos de registros sísmicos.
- Medir y comparar la variación de respuesta de la estructura al incorporar el efecto de la componente sísmica vertical.

1.3 Metodología

La siguiente sección presenta y detalla cada uno de los puntos de la metodología de este trabajo:

1.3.1 Revisión bibliográfica

Se investiga la bibliografía pertinente, recopilando antecedentes sobre:

- Métodos tradicionales de análisis del comportamiento dinámico de estructuras.
- Estudios sobre amortiguadores de masa sintonizada implementados edificios sometidos a registros sísmicos en Chile.
- Reducción de respuesta estructural por medio del uso de disipadores de masa sintonizada.
- Investigaciones sobre métodos de análisis tiempo-frecuencia como espectrograma, función de transferencia por pequeñas ventanas y DSI.

1.3.2 Montaje Experimental de Estructura

Se adapta una estructura de 6 niveles tipo edificio de corte (usada por Luis Rozas en 2009), para implementar en ella un DMS tipo péndulo. Este dispositivo debe ser capaz de oscilar libremente, junto con poder modificar y calibrar su frecuencia a un valor cercano al óptimo, reduciendo la respuesta de la estructura principal. La estructura es anclada en la mesa vibradora utilizando una placa base de madera, otra de acero y pernos de acero.

1.3.3 Confección de DMS tipo péndulo

Se confecciona un DMS tipo péndulo que será ubicado en el nivel superior de la estructura, de manera que su efecto se vea reflejado en las aceleraciones del modo fundamental de ésta. Este dispositivo contará con: un sistema capaz de unirse correctamente a la estructura, la masa principal, un sistema que aumente el amortiguamiento del sistema, y una varilla de acero capaz de modificar el largo del brazo de la masa principal. Al modificar la posición de la masa principal del sistema se busca ajustar su período, a fin de que entre en sintonía con la estructura a controlar.

1.3.4 Ensayo en Laboratorio

Una vez que la estructura es montada en la mesa vibradora, es instrumentada con acelerómetros en cada nivel de ésta como en su base. Esta mesa reproducirá movimientos sísmicos generados a partir de aceleraciones obtenidas de diversos sismos. Los registros mencionados poseen aceleraciones en el plano horizontal como en el vertical, es decir los ejes X y Z de la mesa vibradora.

El objetivo de estos ensayos es obtener la respuesta de la estructura a través de sus aceleraciones, a partir de los registros que la solicitan. Se considera la comparación del movimiento de la estructura ya sea con DMS o sin DMS. Ambas configuraciones son ensayadas con sismos puramente horizontales y/o combinadas con sismo vertical. En general, se emplean en el estudio registros escalados de sismos con alta componente vertical y la utilización de casos generados especiales.

Se consideran como inputs o datos de entrada las aceleraciones que genera la mesa vibradora al reproducir estos registros, los cuales serán medidos por los acelerómetros ubicados sobre ésta, es decir en la base de la estructura. Por otra parte, los outputs o datos de salida corresponden a las aceleraciones observadas en la estructura instrumentada, utilizando un total de siete acelerómetros adosados a esta. En caso de implementar el DMS en la estructura, se utilizará un acelerómetro extra para medir la respuesta del dispositivo y otro acelerómetro ubicado en vertical en el nivel superior de la estructura (i.e., nivel donde se monta el DMS).

1.3.5 Determinación de parámetros dinámicos

Se determinan los parámetros dinámicos de la estructura a ensayar utilizando métodos de elementos finitos y a partir de ensayos dinámicos controlados. Se monta la estructura en la mesa vibradora, donde se realizan ensayos del tipo pull-back y de sismos en la base (registros sísmicos) con lo que se identifican las propiedades dinámicas de la estructura sin DMS. Para lograr esto se utilizarán métodos de identificación de estructuras como Ibrahim (Ibrahim & R., 1977) y DSI (Van Overschee & Do Moor, 1996).

A partir de la respuesta del sistema, se determinan las características que debe poseer el dispositivo para minimizar la respuesta de la estructura principal, empleando las ecuaciones de diseño clásicas utilizadas para sistemas DMS. Específicamente se busca minimizar la aceleración del primer modo de la estructura, para lo cual se ajustará la frecuencia fundamental del DMS.

1.3.6 Desarrollo modelo teórico de la estructura

Con el fin de poder estudiar de manera teórica el comportamiento de la estructura, se programa un modelo teórico de ésta y del DMS tipo péndulo sujeto a acciones horizontales y verticales. Este proceso de modelamiento se realiza con la ayuda de un programa computacional desarrollado en MATLAB. Para cumplir este objetivo, es necesario modelar la estructura de 6 niveles en conjunto con un modelo que replique el comportamiento del DMS (incluyendo su respuesta debido a la acción vertical), de esta manera ambos modelos interactúan entre sí en función de la aceleración que los solicitan.

1.3.7 Análisis de los resultados

Se analizarán los resultados comparando las respuestas entregadas por la estructura para las diferentes configuraciones de ensayo. En primera instancia, se estudia la respuesta de la estructura considerando dos casos: Estructura sin DMS, y estructura con DMS implementado, ambos casos frente a un mismo sismo. Una vez instalado el DMS se procede a comparar la respuesta de la estructura sujeta a un sismo puramente horizontal (eje X)

con el comportamiento que presenta frente al mismo sismo considerando también la componente vertical (eje X junto al eje Z), en algunos casos escalados a diferentes amplitudes.

Capítulo 2

Disipador de Masa Sintonizada

2.1 Introducción

Siendo el edificio de altura un símbolo de las grandes ciudades debido al aumento de estructuras altas y super altas durante la últimas décadas (CTBUH, s. f.), ha sido necesaria su evolución en ámbitos como la sustentabilidad de la construcción, diseño arquitectónico, condiciones del terreno y tecnología, para garantizar su habitabilidad, seguridad y operación a través del tiempo. Como solución a estas nuevas exigencias de diseño, se han desarrollado diversos sistemas de reducción de vibraciones, entre los que destacan los Disipadores de Masa Sintonizada.

Un Disipador de Masa Sintonizada (DMS), consiste en un sistema secundario tradicionalmente de un grado de libertad, conformado por una masa, un resorte

equivalente y un amortiguador viscoso, que al ser instalado en el sistema principal aminora las vibraciones no deseadas producidas por agentes externos como sismos o viento. Para esto, el DMS debe trabajar en un rango de frecuencias específico, estando en sintonía con la frecuencia de la estructura a controlar. Será efectivo controlando la respuesta frente a un excitación armónica en la base de la estructura, mientras que su efectividad disminuye a medida que aumenta el amortiguamiento de la propia estructura (Murudi & Mane, 2004).

Los DMS se encuentran usualmente en edificios de gran altura, sin embargo, su versatilidad ha permitido su implementación también en puentes, chimeneas, o incluso el sistema de suspensión en autos de carrera. Hoy en día es posible verlos implementados en países como Canadá, Japón, Taiwán y Chile, entre otros.

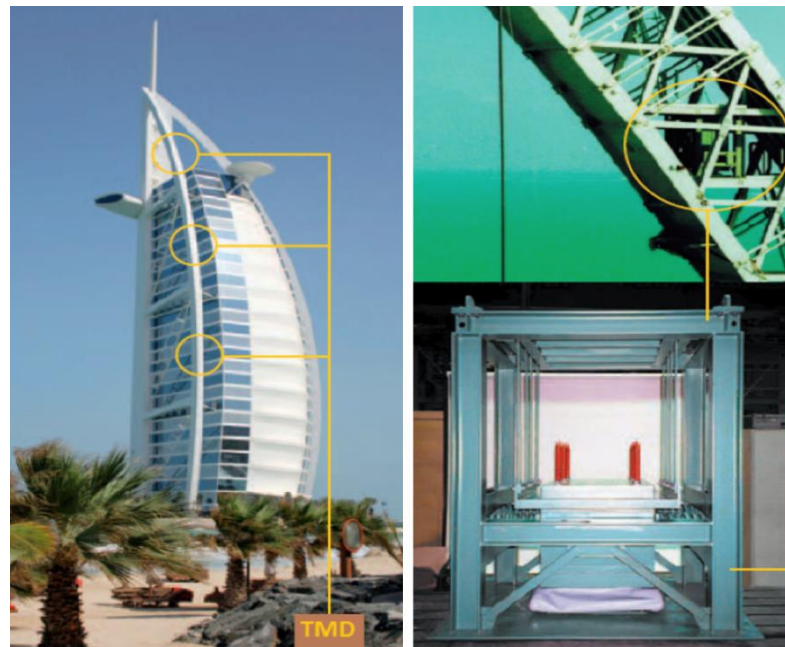


Figura 2-1: DMS en Burj Al Arab, Dubai (Brewer Smith Brewer Group, 2017)

2.2 Antecedentes y desarrollo de los DMS

Con el objetivo de proteger las estructuras de movimiento sísmicos o de fuertes vientos, han surgido diversos sistemas de control a través de los años, los cuales más allá de asegurar la integridad de la edificación, protegen su contenido y componentes no estructurales. De esta manera es posible afirmar que dichos sistemas de control son capaces de prevenir grandes pérdidas económicas, interrupción de servicios, e incluso la pérdida de vidas humanas.

Es posible clasificar los diversos sistemas de control en tres grandes grupos, basado en forma en que logran disipar energía. El primer grupo corresponde a aislación basal, donde se encuentran: Cojinetes elastoméricos, péndulos de fricción, y gomas aislantes con y sin núcleo de plomo. El segundo grupo corresponde a disipadores pasivos de energía: amortiguadores metálicos, de fricción, viscoelásticos sólidos, luidos, disipadores de masa o líquidos sintonizados. Finalmente, el tercer grupo corresponde a sistemas activos y semi-activos: sistemas activos robustos, amortiguadores de masa activos, sistema de rigidez y amortiguamiento variable, y amortiguadores magnetoreológicos (EMB Construcción, 2012).



Figura 2-2: Torre Titanium La Portada y Disipador Sísmico del tipo hysterético implementado (EMB Construcción, 2012).

Dentro de las alternativas mencionadas anteriormente, destacan los disipadores pasivos de energía, los cuales a diferencia de los aisladores sísmicos no evitan que las fuerzas y movimientos sísmicos se transfieran desde el suelo a la estructura. Estos en

relación con otros sistemas estos no requieren energía adicional para operar, lo que supone una ventaja económica en cuanto a su operación y mantención. Los disipadores pasivos de energía se clasifican a su vez en dos grupos, disipadores pasivos directos y disipadores pasivos indirectos.

Tanto los disipadores pasivos directos como indirectos disipan energía de forma pasiva, es decir sin requerir energía adicional provista por algún sistema externo. En este contexto los indirectos lo hacen mediante la incorporación de un sistema secundario en la estructura principal que modifica su respuesta, generando un amortiguamiento adicional que no guarda directa relación con su disipación interna (como lo hacen sistemas directos como un amortiguador dispuesto entre pisos), sino que con el movimiento asincrónico que posee el dispositivo con el movimiento de la estructura (i.e., el sistema genera fuerzas restitutivas que se oponen al movimiento de la estructura basadas en que el dispositivo se mueve en dirección contraria al cual se mueve la estructura).

Dentro de los sistemas pasivos indirectos se encuentra el DMS, que consiste en un mecanismo ubicado ya sea en un único punto de la estructura, o en más de un punto de ella, siendo un sistema múltiple MTMD (Multiple Tuned Mass Damper). El objetivo de un sistema de masa(s) sintonizada es reducir la amplitud de vibración a un nivel aceptable, frente a la acción de una fuerza lateral como lo es un sismo o viento. De esta manera, el movimiento de la estructura principal hace que la masa del DMS oscile en forma asincrónica al movimiento de la estructura (i.e., el DMS se diseña para tener características dinámicas que generan un movimiento asincrónicamente sintonizado), de modo que las fuerzas inerciales del dispositivo son transmitidas a la estructura principal reduciendo su movimiento (i.e., generando la mitigación del movimiento asociado a ciertos modos seleccionados).

Es posible identificar dos tipos de DMS; El horizontal que generalmente se encuentra en estructuras esbeltas y torres de comunicación, y el DMS vertical, el cual es usualmente implementado en estructuras horizontales de sección larga, como puentes y pasarelas. Sin embargo, en ambos casos consiste básicamente en un sistema compuesto por una masa, elementos restitutivos y amortiguadores. El elemento restitutivo típicamente es un resorte, pero en el caso del péndulo corresponde a la fuerza horizontal transmitida por el cable que sustenta a la masa que se mueve debido a la acción sísmica y a la gravedad.

Dentro de las ventajas de los DMS, es posible mencionar una buena respuesta a excitaciones de bajo nivel, un bajo nivel de costo económico respecto a su efectividad,

facilidad para ajustar sus propiedades en terreno, bajo costo de mantenimiento, y la posibilidad de amortiguar hasta dos modos ortogonales de la estructura.

El concepto de DMS fue primeramente introducido por Frahm en 1909 (Frahm, 1909) cuyo fin era reducir el movimiento vaivén de distintas embarcaciones, como también las vibraciones del casco. Al ser en un comienzo un dispositivo bastante simple, resolvía un problema acotado, siendo muy eficaz reduciendo las vibraciones ocasionadas por cargas armónicas de larga duración, pero disminuyendo su eficacia al intentar aplicarlo en un rango variable de frecuencias.

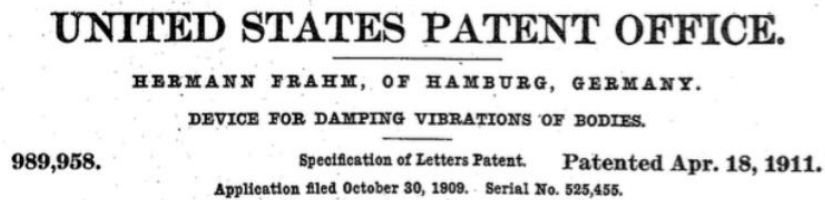


Figura 2-3: Patente de Dispositivo para amortiguamiento de vibraciones, perteneciente a H. Frahm (Frahm, 1909).

La teoría detrás de este diseño fue presentada posteriormente por Ormondroyd y Den Hartog en 1928 (Ormondroyd & Den Hartog, 1928), desarrollando matemáticamente el análisis dinámico del sistema frente a una aceleración basal monofrecuencial. Al dispositivo se le incorporaba un amortiguador viscoso, logrando la capacidad de trabajar frente a un mayor contenido de frecuencias.

Luego en 1946 J. Brock (Brock, 1946) y Den Hartog (Den Hartog, 1956) determinan las expresiones matemáticas para obtener los parámetros óptimos del dispositivo, en función de su masa, amortiguamiento y la relación de frecuencias. Trabajaron con un modelo de un grado de libertad que no posee amortiguamiento, sometido a una excitación armónica.

A lo anterior se suma el trabajo de Crandall y Mark (Crandall, S. H. & Mark, 1973), que analizan la respuesta de la estructura sometida a vibraciones del tipo ruido blanco, abriendo el camino hacia futuras investigaciones que estudian las diferentes acciones que afectarían a la estructura principal.

En base a los trabajos anteriores, en los años 70, William LeMessurier implementa el primer DMS enfocado en controlar vibraciones producidas por viento, en el edificio Citicorp Center en Nueva York (Nishitani, 2019).

Luego, G.B. Warburton desarrolla un sistema de ecuaciones capaz de entregar los parámetros óptimos de un DMS, instalado en una estructura no amortiguada modelada por un sistema de un grado de libertad (Warburton, 1982). Se estudia la acción de cargas armónicas y aceleración en base tipo ruido blanco, simulando la acción del viento y los sismos respectivamente.

A finales de los años 80, surge una nueva línea de Disipadores de Masa sintonizada, donde se busca agregar valor a la carga de uso (viva) que se emplea normalmente en la estructura para generar el dispositivo, y por lo tanto aumentar el beneficio del sistema. De esta manera nacen los Disipadores de masa sintonizada con el uso de Líquidos (DMSL), estanques llenos con agua diseñados de manera que la oscilación de la masa de fluido contenido en el estanque reduzca la respuesta del edificio. Esta agua contenida permite también usos alternativos de esta, como protección frente a incendios y abastecimiento de agua potable. La forma del estanque determinará si corresponde a un disipador de estanque líquido, o un amortiguador de columna líquida sintonizada.

Estudios posteriores determinan mediante análisis numérico los parámetros óptimos de diseño para el caso de estructuras amortiguadas, bajo la acción de señales monofrecuenciales (Guan-Cheng Lin & Hsiang-Chuan, 1993).

Luego, varios han sido los estudios sobre eficiencia de DMS en estructuras amortiguadas. En 1997 Sadek y colaboradores, proponen expresiones para determinar parámetros óptimos de los DMSL (Sadek et al., 1997) donde analizan sistemas de uno y varios grados de libertad sometidos a cargas sísmicas. Posteriormente se observa una reducción significativa de desplazamiento y aceleración de la estructura principal, de manera que recomiendan su implementación como sistema de protección sísmica en edificios de gran altura.

Ya que los DMS están diseñados para operar eficazmente en una banda limitada de frecuencias en torno a la frecuencia natural de la estructura, el amortiguamiento equivalente generado por el DMS se concentra en un solo modo de vibración. Un avance que supera esta limitación fue presentado por Joshi y Jangid (Joshi & Jangid, 1997) que analizaron la respuesta de una estructura con varios amortiguadores de masa sintonizada, sintonizados a distintas frecuencias.

Los ingenieros franceses Zuo y Nayfeh analizan una estructura con varios DMS utilizando una aproximación numérica en base al método “descent-subgradient” (Zuo & Nayfeh, 2004). Este método se compara con el método de “minimax” presentando las ventajas de este. Además, presentan resultados exitosos de un experimento con un DMS de dos grados de libertad, diseñado para amortiguar los dos primeros modos de flexión de una viga libre.

Si bien los hitos mencionados anteriormente han sido un gran aporte el desarrollo de los DMS, estos consideran un comportamiento lineal del sistema. Por otra parte, cuando la estructura incursiona en un campo no lineal, se produce una pérdida de rigidez que genera una des-sintonización entre la frecuencia del DMS y la de la estructura. Es por esto que a su vez existe una rama de los DMS enfocada en el estudio no lineal del sistema, que, de igual manera, actualmente se encuentra en desarrollo.

2.3 Aplicación de DMS en estructuras reales.

Desde sus inicios a principio del siglo pasado en base a la patente de Frahm (Frahm, 1909), los DMS han sido implementados en numerosas estructuras, desde edificios, chimeneas, puentes, e incluso satélites. Sin embargo, durante los últimos años ha sido la Ingeniería civil la que ha obtenido beneficios en el área del control estructural, implementando este sistema de disipación de energía.

Como ejemplo de aplicación de DMS se mencionan los siguientes:

2.3.1 Parque Araucano – Santiago, Chile.

Edificio ubicado en la comuna de Las Condes en Santiago, posee 22 pisos y 6 subterráneos, alcanzando una altura total de 90 metros. Corresponde al primer edificio en Sudamérica que incorpora un sistema de disipación de masa sintonizada, cuyo objetivo en este caso es disipar energía liberada por un sismo, atenuando en gran medida el movimiento que este provocaría (Chapple, 2008).

El sistema de disipación se ubica entre el piso 21 y 22, el cual consiste en dos gigantescos cajones de hormigón llenos de bolas de acero, que se comportan como un péndulo al colgar de 16 tensores cada uno. Al ser dos masas, estas controlan otro fenómeno que es el de torsión, de manera que el sistema permite controlar la respuesta torsional y transversal del edificio al usar dos DMS.



Figura 2-4: Edificio Parque Araucano Santiago (Chapple, 2008).



Figura 2-5: Masa del DMS, con su sistema de anclaje en detalle (Chapple, 2008).

2.3.2 Taipei 101 – Taipei, Taiwan.

El Taipei 101 corresponde a un rascacielos ubicado en la ciudad de Taipei, capital de Taiwán, el cual posee 106 pisos y una altura de 508 metros, lo que lo convierte en el segundo rascacielos más alto del mundo. Fue inaugurado el año 2004, diseñado por el arquitecto chino C. Y. Lee y construido en base a columnas fabricadas de acero y hormigón (Atlas Obscura, s. f.).

Para controlar la vibración a causa del viento, este edificio posee un disipador de masa tipo péndulo ubicado entre los pisos 88 y 92 de la estructura. Es el DMS más grande y pesado a nivel mundial, ya que posee una masa que equivale al 0.26% de la masa total del edificio, significando una inversión de cuatro millones de dólares.

Este disipador actúa como un enorme péndulo, cuyo sistema está compuesto por una bola de acero de 680 toneladas y 5.5 metros de diámetro, sujeta por cuatro grupos de cables de acero y ocho amortiguadores. Es capaz de reducir entre un 30 a un 40% el desplazamiento de la estructura, cuando el rascacielos está sujeto a vientos de una velocidad básica de más de 216 kilómetros por hora en su nivel superior.



Figura 2-6: Torre Taipei 101 (Encyclopedia Britannica, 2017).



Figura 2-7: Disipador de Masa Sintonizada de tipo péndulo, Torre Taipei 101 (Encyclopedia Britannica, 2017).

2.3.3 Torres Petronas – Kuala Lumpur, Malasia.

Las Torres Petronas se ubican en Kuala Lumpur, Malasia, y son actualmente las torres gemelas más altas del mundo. Fueron diseñadas por el arquitecto César Pelli, e inauguradas el año 1998. Cuentan con 88 pisos, de estructura mayoritariamente de hormigón, acero y aluminio, alcanzando una altura de 425 metros (ENGINEERING, s. f.).

Entre los pisos 41 y 42 de las torres, a 170 metros de altura, se encuentra un puente de 58.4 metros de largo llamado Skybridge. En este punto, la estructura posee un centro de distribución de ascensores que conecta y facilita el desplazamiento entre ambas torres. La sección posee cuatro arcos de acero que la sostienen, mientras que en cada uno de estos fueron instalados tres disipadores de masa sintonizada, capaces de contrarrestar las vibraciones debido a fuertes vientos.



Figura 2-8: Torres Petronas, Kuala Lumpur (WikiArquitectura, s. f.).



Figura 2-9: Skybridge, Torres Petronas (WikiArquitectura, s. f.).

2.3.4 Shinjuku Park Tower – Tokio, Japón.

La Torre Shinjuku Park corresponde a un rascacielos cuya construcción finalizó en 1994 y se encuentra ubicado en el barrio de Shinjuku en Tokio, Japón. Está compuesto por tres torres con forma de bloque; la torre S con 235 metros de altura y 52 pisos, la torre C con 209 metros de alto con 47 pisos y la torre N de 182 metros de altura y 41 pisos (SHINJUKU PARK TOWER, s. f.).

Este edificio posee tres disipadores de masa sintonizada tipo péndulo, cada uno ubicado en el piso 39 de los bloques que conforman la estructura. Cada uno de estos péndulos posee una masa de 110 toneladas, ubicada sobre rodamientos que permiten su oscilación. Posee un sistema híbrido, lo significa que las masas oscilan libremente salvo que se presente un movimiento considerable del edificio debido a tormentas o sismos, donde una serie de controladores regulan el movimiento de las masas de manera óptima.

Si bien la ubicación óptima para instalar un sistema de estas características es la cima del edificio, pues se busca controlar de manera más eficiente el modo fundamental de la estructura, restricciones arquitectónicas lo hacían impracticable. Pese a esto, su

actual ubicación ha permitido reducir la respuesta de la estructura frente al viento en hasta un 50%.



Figura 2-10: Torre Shinjuku Park, Tokio (EMPORIS, s. f.).

2.3.5 Shinjuku Mitsui Building - Tokio, Japón.

Siendo uno de los 10 edificios más altos de Tokio, esta estructura de 55 pisos posee una altura 212 metros hasta su piso más alto, y una altura de 225 metros hasta su cima arquitectónica. Proyecto desarrollado por Mitsui Fudosan Co., posee un sistema de amortiguamiento que busca reducir considerablemente las vibraciones originadas por sismos que poseen movimientos de alto periodo (MITSUI FUDOSAN, 2013).

El sistema consiste en seis disipadores tipo péndulo, con un peso de 300 toneladas cada uno, ubicados en la cima del edificio. Cada uno de estos dispositivos posee un sistema de soporte de masa en base a cables, amortiguadores en base a aceites para controlar su deformación, y un marco que sostiene el sistema y refuerza la estructura principal. Corresponde al primer sistema ultra-grande para control de vibraciones, con una masa total de aproximadamente 1.800 toneladas.



Figura 2-11: Shinjuku Mitsui Building, Tokio (The International Appraiser, 2012).

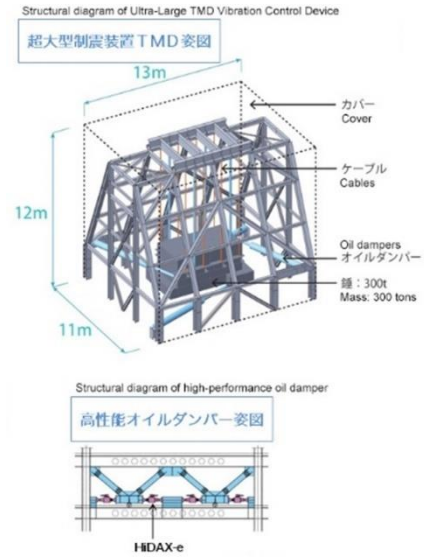


Figura 2-12: Diagrama de DMS en Shinjuku Mitsuri Building (MITSUI FUDOSAN, 2013).

2.3.6 Puente Akashi-Kaikyo – Osaka, Japón.

El puente Akashi-Kaikyo se ubica en la provincia de Osaka, Japón, cuya finalidad es conectar Honshū con la isla de Awaji, atravesando todo el ancho del imponente estrecho de Akashi. Inaugurado en 1998, este puente posee una longitud de 3911 metros y ostenta el título de ser el puente colgante más largo del mundo (Roads & Bridges, s. f.).

La estructura posee una autopista de seis carriles, y dos torres de 280 metros de altura, el equivalente a un edificio de 80 pisos. Siendo Japón un país con gran actividad sísmica, este puente debe soportar el efecto de grandes sismos, junto con fuertes vientos provenientes de los constantes huracanes originados en la zona.

Para contrarrestar esfuerzos externos, las torres están equipadas por arriostres en forma de cruz que poseen disipadores de masa sintonizada en sus niveles 17, 18 y 21. Este sistema reduce el desplazamiento y la torsión frente al viento, como también una excesiva vibración a causa de un terremoto.



Figura 2-13: Puente Akashi-Kaikyo, Osaka Japón (Japan Guide, s. f.)

Capítulo 3

Diseño de Disipador de Masa Sintonizada

3.1 Introducción

Los primeros estudios referentes a diseño de DMS, se realizaron en sistemas mecánicos excitados por señales monofrecuenciales, estructuras caracterizadas por su masa y rigidez, para luego incorporar su amortiguamiento. Luego, al desarrollar estudios de excitaciones aleatorias fue posible expandir su uso para fenómenos como turbulencias y vibraciones ambientales, permitiendo su implementación en otras áreas como ingeniería aeronáutica y estructural.

Actualmente, el desarrollo de esta tecnología permite su correcto desempeño frente a funciones monofrecuenciales como también señales aleatorias, y para estructuras de múltiples grados de libertad a través de su descomposición modal, permitiendo rescatar

los resultados obtenidos en sistemas equivalentes de dos grados de libertad, al considerar las propiedades del modo que se desea controlar como las propiedades globales del sistema. En el caso de edificios, su desempeño se enfoca en el modo fundamental de la estructura, ya que se le atribuye una mayor participación modal, y por consecuencia presenta mayores desplazamientos. Es por esto que la instalación de un DMS se realiza en el último piso donde la forma modal tiene su mayor amplitud, generando de esta manera una mayor excitación (y fuerza restitutiva) del DMS, además de ser la posición donde la fuerza restitutiva reduce de mayor forma el momento basal.

Los DMS instalados en edificios residenciales suelen ser cubos de hormigón, en cuyo interior se suele introducir un material con mayor densidad (en algunos casos bolas de acero) para proporcionar un gran peso en un volumen bajo. Junto a este bloque se suelen utilizar apoyos deslizantes y/o apoyos elastoméricos, con el objetivo de poder deslizarse sobre la estructura con características dinámicas controladas. De esta manera se genera un movimiento asincrónicamente sintonizado del dispositivo, con relación al movimiento del nivel al cual está apoyado.

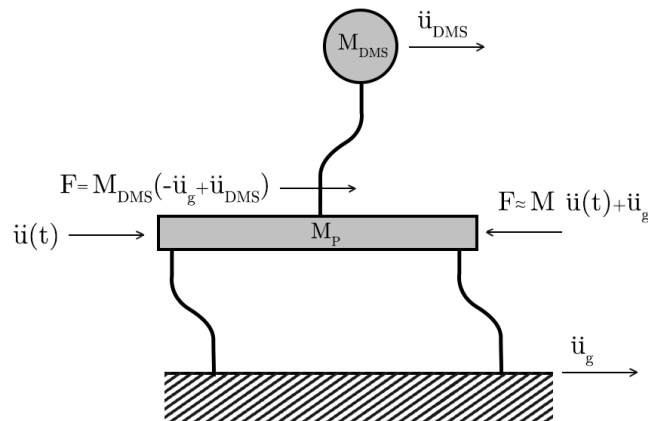


Figura 3-1: Diagrama de fuerzas, esquema DMS simplificado.

Por otra parte, los DMS instalados en edificios más altos, suelen ser mecanismos más complejos, capaces de alterar su funcionamiento ante vibraciones inducidas por acciones externas, pero enfocadas en su modo fundamental. La implementación de un dispositivo de estas características permite la protección de la estructura frente a sismos y vientos.



Figura 3-2: Sistema de DMS tipo péndulo, en Taipei 101 (Civil Engineering Forum, s. f.)

3.2 Formulación matemática

Los parámetros óptimos de diseño para un DMS tales como periodo, rigidez y amortiguamiento, serán determinados en base a los procedimientos y resultados presentados por Luis Rozas, en su tesis “Reducción de la Respuesta Estructural por medio del uso de Disipadores de Masa Sintonizada y Disipadores de Columna Líquida Sintonizada”.

3.3 Parámetros óptimos de diseño

A continuación, se presentan los supuestos más importantes, junto con el procedimiento para determinar los parámetros óptimos del diseño de DMS, obtenido a partir del trabajo de Luis Rozas (Rozas, 2009).

Para realizar el siguiente análisis, se define como input de entrada una aceleración basal monofrecuencial, para luego considerar los siguientes casos de estudio:

3.3.1 Estructura principal no amortiguada, DMS no amortiguado.

Se considera el modelo simplificado de la Figura 3-3, el cual posee una estructura de un grado de libertad, junto con un DMS de masa lineal de un grado de libertad. De esta manera el sistema es afectado por dos perturbaciones externas monofrecuenciales, el desplazamiento armónico de su base $u_s(t)$, y la fuerza que ejerce el DMS sobre la estructura principal $p(t)$. Luego, se considera como sistema de referencia, el definido por el desplazamiento de la estructura con respecto al suelo u_p , y el del DMS respecto a la estructura principal.

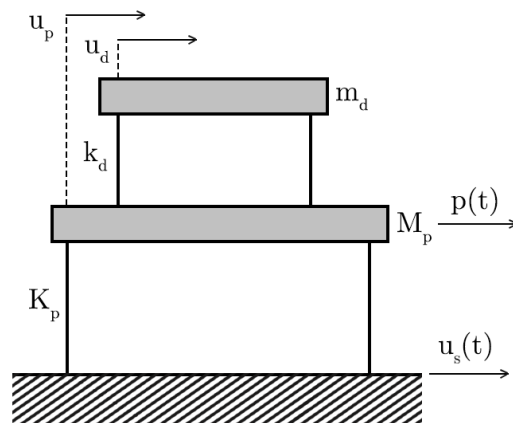


Figura 3-3: Modelo simplificado Estructura principal no amortiguada, DMS no amortiguado.

La ecuación de movimiento que describen el sistema descrito anteriormente se expresa matricialmente en la ecuación (3.1).

$$\begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_p + \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_p + \ddot{u}_s + \ddot{u}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_p + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_p \\ u_p + u_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

Donde las variables M_p y K_p corresponden a la matriz de masa y matriz de rigidez de la estructura principal. Por otra parte m_d y k_d corresponden a la matriz de masa y matriz de rigidez del DMS.

A continuación, se introducen las notaciones a utilizar en el desarrollo del presente capítulo, junto con parámetros adimensionales cuyo objetivo es simplificar futuras expresiones.

La frecuencia angular natural del dispositivo DMS es:

$$\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d} \quad (3.2)$$

Siendo la frecuencia angular natural de la estructura principal:

$$\omega_p^2 = \frac{K_p}{M_p} \quad (3.3)$$

Razón de masas entre el DMS y la estructura principal:

$$\mu = \frac{m_d}{M_p} \quad (3.4)$$

Razón entre la frecuencia natural del DMS y de la estructura principal:

$$f = \frac{\omega_d}{\omega_p} \quad (3.5)$$

Razón entre la frecuencia de la excitación externa y la frecuencia natural de la estructura principal:

$$\rho = \frac{\Omega}{\omega_p} \quad (3.6)$$

Al ser la aceleración basal una excitación monofrecuencial, es posible definirla como un movimiento armónico de la forma:

$$\ddot{u}_s(t) = \bar{\ddot{u}}_s \text{sen}(\Omega t) \quad (3.7)$$

Por lo que la fuerza aplicada será de la misma forma:

$$p(t) = \bar{p} \text{sen}(\Omega t) \quad (3.8)$$

Luego, se trabaja bajo el mismo supuesto propuesto adoptado por Rozas (Rozas, 2009): "Dado que se trata de un sistema sin amortiguamiento, la respuesta permanente de la estructura primaria y el AMS se pueden suponer como armónicas de frecuencia Ω y desfase nulo". De manera que se obtienen las siguientes expresiones:

$$u_p(t) = \bar{u}_p \text{sen}(\Omega t) \Rightarrow \ddot{u}_p(t) = -\Omega^2 \bar{u}_p \text{sen}(\Omega t) \quad (3.9)$$

$$u_d(t) = \bar{u}_d \text{sen}(\Omega t) \Rightarrow \ddot{u}_d(t) = -\Omega^2 \bar{u}_d \text{sen}(\Omega t) \quad (3.10)$$

Reemplazando las expresiones dadas en la ecuación de movimiento, es posible obtener las soluciones de las amplitudes de los desplazamientos de la estructura y del dispositivo, \bar{u}_p y \bar{u}_d , dadas por:

$$\bar{u}_p = \frac{\bar{p}}{K_p} \left(\frac{f^2 - \rho^2}{D_1} \right) - \frac{M_p \bar{\ddot{u}}_s}{K_p} \left(\frac{f^2(1 + \mu) - \rho^2}{D_1} \right) \quad (3.11)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\bar{p}}{k_d} \left(\frac{\mu \rho^2}{D_1} \right) - \frac{m_d \bar{\ddot{u}}_s}{k_d} \left(\frac{\mu}{D_1} \right) \quad (3.12)$$

Donde:

$$D_1 = (1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - \mu \rho^2 f^2 \quad (3.13)$$

Al analizar la ecuación (3.11), es posible observar que si el valor de $f^2(1 + \mu) - \rho^2$ se hace cero, la respuesta de la estructura principal es independiente de la excitación $\bar{\ddot{u}}_s$. De esta manera es posible obtener un valor óptimo de ω_d , tal que absorba por completo el movimiento del suelo.

$$\omega_d|_{OPT} = \frac{\Omega}{\sqrt{1 + \mu}} \quad (3.14)$$

$$f_{OPT} = \frac{\omega_d|_{OPT}}{\omega_p} = \frac{\rho}{\sqrt{1 + \mu}} \quad (3.15)$$

Por lo que la rigidez del DMS debe ser:

$$k_{OPT} = \omega_d|_{OPT}^2 m_d = \frac{\Omega^2 M_p \mu}{1 + \mu} \quad (3.16)$$

Para este caso, el diseño del dispositivo solo requiere determinar su rigidez óptima, estableciendo primeramente el valor de su desplazamiento admisible, $máx \{\bar{u}_d\}$. Una vez obtenido este valor, es posible obtener μ a través de la siguiente expresión:

$$\mu = \frac{\bar{p}\Omega^2 + \bar{\ddot{u}}_s K_p}{K_p \Omega^2 máx \{\bar{u}_d\} - (\bar{p}\Omega^2 + \bar{\ddot{u}}_s K_p)} \quad (3.17)$$

De esta manera, ya conocidos μ y Ω es posible obtener el valor óptimo de la rigidez a través de la ecuación (3.16).

3.3.2 Estructura principal no amortiguada, DMS amortiguado.

Se analiza el caso presentado anteriormente, esta vez con un DMS amortiguado, ya que posee un amortiguador lineal de constante c_d . El modelo simplificado que representa la situación descrita se presenta en la Figura 3-4.

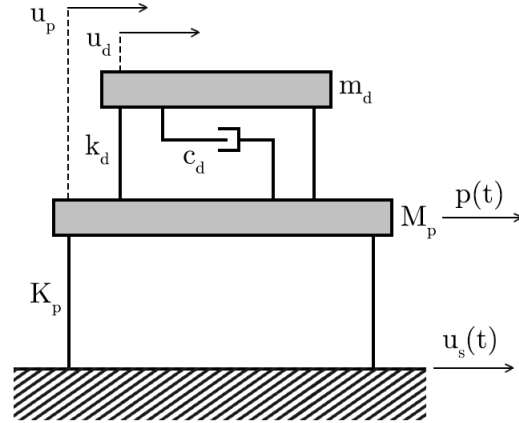


Figura 3-4: Modelo simplificado Estructura principal no amortiguada, DMS amortiguado

La expresión que representa su comportamiento es:

$$\begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_p + \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_p + \ddot{u}_s + \ddot{u}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_p \\ \dot{u}_p + \dot{u}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_p + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_p \\ u_p + u_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

De esta manera debido a que el DMS posee amortiguamiento, el sistema disipa energía. Por otra parte, genera en el sistema un desfase relativo con respecto a las acciones externas.

Al poseer una solución más robusta, es conveniente representar el desfase en forma de cantidades complejas, es decir:

$$\ddot{u}_s(t) = \bar{\ddot{u}}_s e^{i\Omega t}, \quad p(t) = \bar{p} e^{i\Omega t} \quad (3.19)$$

Considerando lo anterior, es posible representar la respuesta para el régimen permanente del sistema de la siguiente manera:

$$u_p(t) = \bar{u}_p e^{i\Omega t} \qquad u_d(t) = \bar{u}_d e^{i\Omega t} \qquad (3.20)$$

De la misma manera, los términos \bar{u}_p y \bar{u}_d son cantidades complejas que incorporan el desfase en la respuesta del sistema. Estos términos se obtienen reemplazando las expresiones anteriores en las ecuaciones de movimiento y realizando las simplificaciones correspondientes. Las expresiones correspondientes se presentan a continuación:

$$\bar{u}_p = \frac{\bar{p}}{K_p} H_1 e^{i\delta_1} - \frac{\bar{u}_s M_p}{K_p} H_2 e^{i\delta_2} \qquad (3.21)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\bar{p}}{k_d} H_3 e^{-i\delta_3} - \frac{\bar{u}_s m_d}{k_d} H_4 e^{-i\delta_3} \qquad (3.22)$$

Ya que para determinar los parámetros óptimos es necesario reducir la respuesta sísmica, se busca trabajar sobre el factor de amplificación H_2 . A su vez, δ_2 corresponde a los ángulos de fase entre la respuesta y la excitación.

$$H_2 = \frac{\sqrt{\left[(1 + \mu) f^2 - \rho^2 \right]^2 + 4\xi_d^2 \rho^2 f^2 (1 + \mu)^2}}{\left| (1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - \mu \rho^2 f^2 + i2\xi_d \rho f [1 - \rho^2(1 + \mu)] \right|} \qquad (3.23)$$

Se define ξ_d como la razón de amortiguamiento crítico del dispositivo.

Estudiando la variación de H_2 con respecto a ρ , y considerando valores fijos de μ y f , es posible construir todas las curvas presentadas en la Figura 3-5. Cada una de ellas se obtiene al utilizar diferentes valores de ξ_d , siendo posible observar la intersección de estas al pasar por los puntos P y Q de la gráfica. De esta manera, la ubicación de los puntos P y Q dependen únicamente de los valores de μ y f .

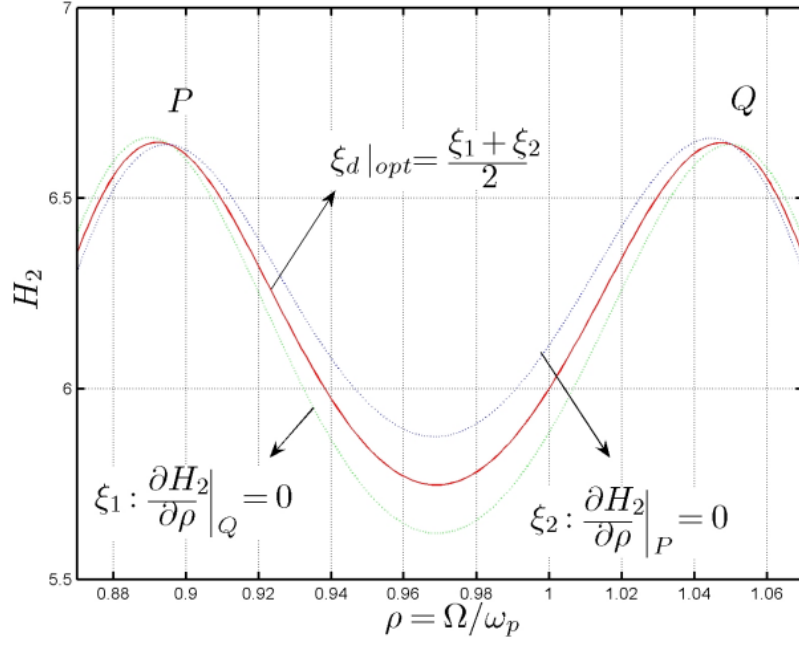


Figura 3-5: Puntos P y Q (Rozas, 2009)

En base al análisis realizado anteriormente, la expresión para H_2 puede ser escrita de la siguiente manera:

$$H_2 = \sqrt{\frac{a_1^2 + \xi_d^2 a_2^2}{a_3^2 + \xi_d^2 a_4^2}} = \left| \frac{a_2}{a_4} \right| \sqrt{\frac{a_1^2/a_2^2 + \xi_d^2}{a_3^2/a_4^2 + \xi_d^2}} \quad (3.24)$$

Para obtener el valor de H_2 en los puntos P y Q, es necesario que la ecuación (3.24) sea independiente de ξ_d . Esta condición se obtiene al cumplirse la siguiente expresión:

$$\frac{a_1^2}{a_2^2} + \xi_d^2 = \frac{a_3^2}{a_4^2} + \xi_d^2 \quad (3.25)$$

De la ecuación anterior se desprende:

$$\left| \frac{a_1}{a_2} \right| = \left| \frac{a_3}{a_4} \right| \Leftrightarrow \left| \frac{(1 + \mu)f^2 - \rho^2}{2\rho f(1 + \mu)} \right| = \left| \frac{(1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - \mu f^2 \rho^2}{2\rho f(1 - \rho^2(1 + \mu))} \right| \quad (3.26)$$

Se impone f de manera tal que los valores de H_2 en los puntos P y Q sean el mismo, estableciendo las condiciones óptimas de diseño del DMS.

$$H_2|_P = H_2|_Q = \left| \frac{a_2}{a_4} \right|_{P,Q} \Rightarrow \frac{1 + \mu}{|1 - \rho_P^2(1 + \mu)|} = \frac{1 + \mu}{|1 - \rho_Q^2(1 + \mu)|} \quad (3.27)$$

Para obtener el valor óptimo de f , es necesario identificar ρ_P y ρ_Q como raíces de la ecuación (3.27) junto con imponer condiciones de igual factor de amplificación.

$$f|_{OPT} = \frac{\sqrt{1 - 0,5\mu}}{1 + \mu} \quad (3.28)$$

Finalmente, el valor de H_2 es el mismo tanto para ρ_P y ρ_Q , independiente del valor ξ_d escogido. Por lo que para obtener el valor óptimo de la razón de amortiguamiento crítico del DMS, es necesario imponer que el punto P o el punto Q sean máximos. Matemáticamente queda expresado de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\partial H_2}{\partial \rho} \right|_P = 0 \quad \vee \quad \left. \frac{\partial H_2}{\partial \rho} \right|_Q = 0 \quad (3.29)$$

En donde ambas derivadas están evaluadas en $f = f|_{OPT}$ y no necesariamente se satisface en ambos casos para el mismo valor de ξ_d . De esta manera, se obtiene al promediar los resultados obtenidos al calcularlo para P y Q por separado.

$$\xi_d|_{OPT} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)(1 - 0,5\mu)}} \quad (3.30)$$

3.3.3 Estructura principal amortiguada, DMS amortiguado.

El último caso por analizar corresponde al presentado anteriormente, con la salvedad de que la estructura principal posee amortiguamiento. Esta consideración es de gran importancia ya que toda estructura real está amortiguada, y aunque si bien la implementación del DMS está pensado para estructuras con bajo amortiguamiento, considerar su efecto es fundamental a la hora de determinar los parámetros óptimos del DMS.

La Figura 3-6 presenta la estructura principal provisto de un amortiguador lineal de constante c_p , junto con un DMS amortiguado cuya constante es c_d . Se considera al sistema excitado por una fuerza externa y el desplazamiento de suelo descrito anteriormente presentado.

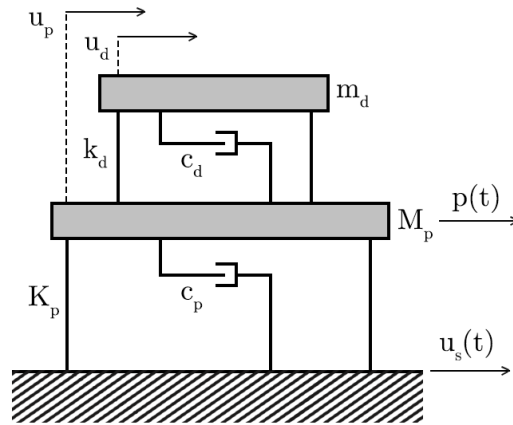


Figura 3-6: Modelo simplificado Estructura principal amortiguada, DMS amortiguado

La ecuación de movimiento del sistema queda expresada de forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_p + \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_p + \ddot{u}_s + \ddot{u}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_p + c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_p \\ \dot{u}_p + \dot{u}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_p + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_p \\ u_p + u_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.31)$$

En base al procedimiento presentado en los casos anteriores, se obtienen las expresiones para \bar{u}_p y \bar{u}_d . De esta manera se determina la respuesta del sistema en su forma polar:

$$\bar{u}_p = \frac{\bar{P}}{K_p} H_5 e^{i\delta_5} - \frac{\bar{u}_s M_p}{K_p} H_6 e^{i\delta_6} \quad (3.32)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\bar{P}}{k_d} H_7 e^{-i\delta_7} - \frac{\bar{u}_s m_d}{k_d} H_8 e^{-i\delta_8} \quad (3.33)$$

Al igual que en el caso anterior, los términos de H corresponden a los factores de amplificación de las respuestas pseudoestáticas, mientras que δ corresponde a los ángulos de fase. En este caso se busca reducir la amplificación en H_6 cuya expresión se muestra a continuación:

$$H_6 = \sqrt{\frac{\left[(1 + \mu) f^2 - \rho^2 \right]^2 + 4 \xi_d^2 \rho^2 f^2 (1 + \mu)^2}{|D_3|}} \quad (3.34)$$

Donde:

$$|D_3| = \left\{ \left[(1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - f^2 \rho^2 \mu - 4 \xi_p \xi_d f \rho^2 \right]^2 + 4 \left[\xi_p \rho (f^2 - \rho^2) + \xi_d f \rho (1 - \rho^2 (1 + \mu)) \right] \right\}^{0.5} \quad (3.35)$$

A diferencia del caso analizado anteriormente, al graficar las curvas de H vs ρ para diferentes valores de ξ_d , estas no intersectan en puntos específicos conocidos anteriormente como P y Q. Esto se debe a que el amortiguamiento crítico de la estructura principal genera un desplazamiento de las curvas de amplificación, lo que conlleva un cambio en la metodología.

Debido a que el caso a estudiar no permite generar las condiciones para resolver el problema de manera analítica, se plantea como un problema de optimización, el cual debido a su complejidad se resuelve de manera numérica. Se deben encontrar valores de f y ξ_d , que minimicen el máximo valor que alcanza el factor de amplificación dinámica asociado a la respuesta que se desea minimizar, es decir, H_6 . Matemáticamente se describe cómo:

$$\min_f \left\{ \min_{\xi_d} \left\{ \max_{\rho} \left\{ H_6(\rho, \xi_d, f) \right\} \right\} \right\} \quad (3.36)$$

Para encontrar los valores óptimos de diseño $f|_{OPT}$ y $\xi_d|_{OPT}$, se realiza un procedimiento numérico iterativo, en donde se escriben las curvas de amplificación dinámica en función de ρ y se utilizan valores dados de μ y ξ_p . La condición óptima de diseño se obtendrá al encontrar el menor de los valores máximos del factor de amplificación dinámica, para los distintos μ y ξ_p considerados.

Primeramente, se consideran los valores óptimos al imponer condiciones extremas: El DMS con masa nula y la estructura principal no amortiguada, es decir, $\mu \rightarrow 0$ y $\xi_p = 0$. Estos valores preliminares servirán para “calibrar” la expresión numérica.

Al resolver ambos casos extremos, se obtiene la ecuación (3.38) para la razón de frecuencias, y la ecuación (3.40) para la razón de amortiguamiento crítico del dispositivo. En dichas ecuaciones los términos Δf y $\Delta \xi_d$ representan la diferencia entre las restricciones y los valores obtenidos mediante análisis numérico.

La expresión para $f|_{OPT}$ será:

$$f|_{OPT} = (f|_{OPT}(\mu \rightarrow 0) + f|_{OPT}(\xi_p = 0) - 1) + \Delta f \quad (3.37)$$

$$f|_{OPT} = \left(\frac{\sqrt{1-0,5\mu}}{1+\mu} + \sqrt{1-2\xi_p^2} - 1 \right) \Delta f \quad (3.38)$$

Mientras que la expresión para $\xi_d|_{OPT}$ será:

$$\xi_d|_{OPT} = \xi_d|_{OPT}(\xi_p = 0) + \Delta \xi_d \quad (3.39)$$

$$\xi_d|_{OPT} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)(1-0,5\mu)}} \quad (3.40)$$

El procedimiento anteriormente descrito fue desarrollado por Hsiang-Chuan Tsai y Guan-Cheng Lin (Guan-Cheng Lin et al., 1993). A continuación, se entregan las fórmulas obtenidas para $f|_{OPT}$ y $\xi_d|_{OPT}$, utilizando los valores obtenidos para Δf y $\Delta \xi_d$:

$$f|_{OPT} = \left(\frac{\sqrt{1-0,5\mu}}{1+\mu} + \sqrt{1-2\xi_p^2} - 1 \right) - (2,375 - 1,034\sqrt{\mu} - 0,426\mu)\xi_p\sqrt{\mu} - \dots \quad (3.41)$$

$$\dots - (3,370 - 16,903\sqrt{\mu} + 20,496\mu)\xi_p^2\sqrt{\mu}$$

$$\xi_d|_{OPT} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)(1-0,5\mu)}} + (0,151\xi - 0,170\xi_p^2) + (0,163\xi + 4,980\xi_p^2)\mu \quad (3.42)$$

3.3.4 Estructura principal amortiguada, DMS amortiguado. Aceleración basal aleatoria.

Debido a que en la realidad los efectos sísmicos sobre una estructura no son monofrecuenciales, esta sección estudia el efecto de acciones externas de naturaleza aleatoria, que incorpora densidades espectrales de valores similares en un rango de frecuencias.

Para este análisis se considera el mismo sistema de estructura con DMS desarrollado en la sección anterior, sin embargo, la aceleración basal es idealizada como una aceleración caracterizada como ruido blanco. En este caso la función de auto correlación para la aceleración de suelo se encuentra dada por:

$$R_{\ddot{u}_s}(\tau) = \ddot{u}_{so} \cdot \delta(\tau) \quad (3.43)$$

Donde \ddot{u}_{so} es la intensidad del espectro de potencia del movimiento de la base, y $\delta(\tau)$ la función delta de Dirac. Luego, la densidad espectral está dada por:

$$S_{\ddot{u}_s}(\tau) = \ddot{u}_{so} \quad (3.44)$$

En base a lo anterior, es posible expresar el valor cuadrático medio del desplazamiento del sistema principal de la siguiente forma:

$$E\{u_p^2\} = \frac{\ddot{u}_{so}}{\omega_p^3} \int_{-\infty}^{\infty} |H_6(\rho) e^{i\delta_6(\rho)}|^2 d\rho \quad (3.45)$$

Para resolver la integral de la expresión anterior, es posible expresar el factor de amplificación dinámica de la siguiente forma:

$$H_6(\rho) e^{i\delta_6(\rho)} = \frac{B_2 \rho^2 + iB_1 \rho + B_0}{A_4 \rho^4 + iA_3 \rho^3 + A_2 \rho^2 + iA_1 \rho + A_0} \quad (3.46)$$

Donde cada uno de sus términos se muestran a continuación:

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= f^2 \\ A_1 &= 2f(\xi_p f + \xi_d) \\ A_2 &= -(1 + f^2(1 + \mu) + 4\xi_p \xi_d f) \\ A_3 &= -2(\xi_p + \xi_d f(1 + \mu)) \\ A_4 &= 1 \\ B_0 &= f^2(1 + \mu) \\ B_1 &= 2f\xi_d(1 + \mu) \\ B_2 &= -1 \end{aligned} \right\} \quad (3.47)$$

Expresado de esta manera, se obtiene la solución de la integral:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_6(\rho) e^{i\delta_6(\rho)}|^2 d\rho = \frac{\pi \left[\left(\frac{B_0^2}{A_0} \right) (A_2 A_3 - A_1 A_4) - A_3 (B_1^2 + 2B_0 B_2) + A_1 B_2^2 \right]}{A_1 (A_2 A_3 - A_1 A_4) - A_0 A_3^2} \quad (3.48)$$

A continuación, para obtener los parámetros óptimos de diseño del DMS, se busca determinar los valores que deben adoptar f y ξ_d , que minimicen la respuesta de la estructura principal. Para cumplir este objetivo, se utiliza el valor medio cuadrático del desplazamiento de la estructura primaria con el dispositivo instalado, normalizado con respecto al valor cuadrático medio del desplazamiento de la estructura sin el dispositivo instalado.

$$\bar{E}\{u_p^2\} = \frac{E\{u_p^2\}}{E\{u_p^{*2}\}} \quad (3.49)$$

Donde $E\{u_p^{*2}\}$ se determina con la siguiente expresión:

$$E\{u_p^{*2}\} = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{u_p^* \ddot{u}_s}(\omega)|^2 S_{\ddot{u}_s}(\omega) d\omega \quad (3.50)$$

Donde el término $H_{u_p^* \ddot{u}_s}(\omega)$ corresponde a la función de transferencia desplazamiento-aceleración de base del sistema principal.

$$H_{u_p^* \ddot{u}_s}(\rho) = \frac{1}{\omega_p^2 [(1 - \rho^2) + 2i\xi_2 \rho]} \quad (3.51)$$

Una vez definida la función objetivo, es posible encontrar los parámetros de diseño f y ξ_d , que minimizan el valor de esta función. Estos valores se determinan utilizando valores fijos de μ y ξ_p . Para calibrar dichas expresiones, se utilizan los resultados obtenidos por G.B. Warburton (1982) para estructuras no amortiguadas sujetas a aceleración de base caracterizada como ruido blanco, cuyos parámetros óptimos son los siguientes:

$$f|_{OPT}(\xi_p = 0) = \frac{\sqrt{1 - 0,5\mu}}{1 + \mu} \quad (3.52)$$

$$\xi_d|_{OPT}(\xi_p = 0) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1 - 0,25\mu)}{(1 + \mu)(1 - 0,5\mu)}} \quad (3.53)$$

Utilizando procedimiento planteado en la sección anterior, es posible definir un polinomio cuadrático en ξ_p y $\sqrt{\mu}$, en base al comportamiento de la función objetivo al modificar estos valores fijos.

Se propone la siguiente expresión para el óptimo de la razón de frecuencias:

$$f|_{OPT} = \frac{\sqrt{1 - 0,5\mu}}{1 + \mu} + (1,419\mu + 0,577\sqrt{\mu} - 1,977)\xi_p^2 + \dots \quad (3.54)$$

$$\dots + (1,468\mu - 2,712\sqrt{\mu} + 0,005)\xi_p$$

A partir de los resultados numéricos, es posible observar que el valor de $\xi_d|_{OPT}$ es prácticamente independiente de la razón de amortiguamiento crítico de la estructura principal. Como consecuencia, el valor óptimo de la razón de amortiguamiento crítico del dispositivo es el siguiente:

$$\xi_d|_{OPT} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1 - 0,25\mu)}{(1 + \mu)(1 - 0,5\mu)}} \quad (3.55)$$

3.3.5 Resumen procedimiento de diseño del DMS.

Para diseñar un DMS se presentan a modo de resumen los siguientes pasos, obtenidos a partir del trabajo de Luis Rozas (2009):

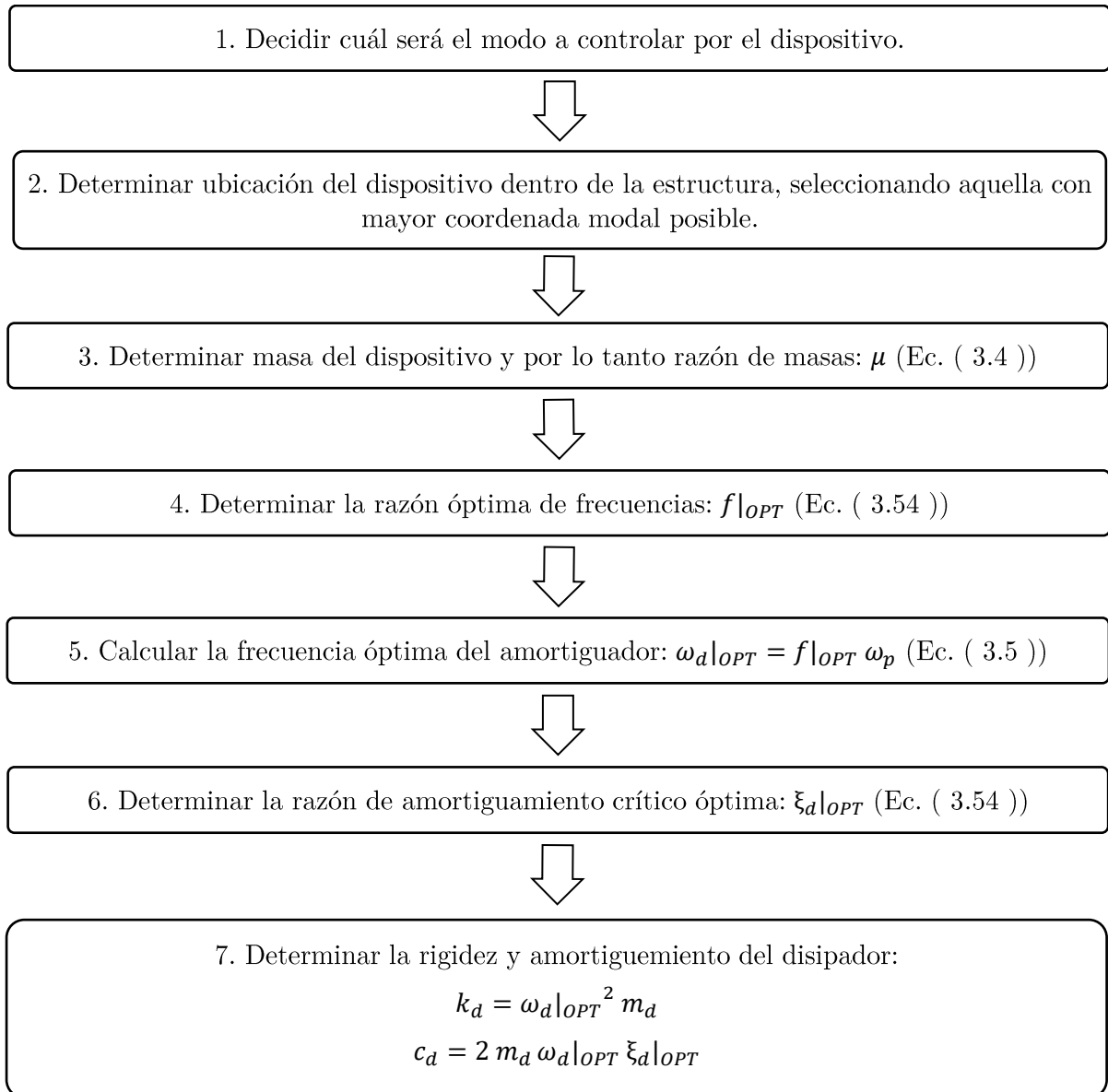


Figura 3-7: Diagrama de flujo para diseño de DMS.

3.4 Ecuaciones de equilibrio dinámico del péndulo

Se realiza un análisis físico de las leyes que rigen el comportamiento de un péndulo, considerando que este es excitado tanto por un movimiento horizontal como vertical. Este análisis permite identificar las propiedades que condicionan el comportamiento y las propiedades que poseerá el disipador, con el fin de optimizar la eficiencia con la que trabajará sobre la estructura a controlar.

3.4.1 Oscilación de péndulo simple.

Este caso de estudio posee un comportamiento oscilatorio de una masa puntual, colgada de una cuerda inextensible de masa despreciable. Se considera un elemento de masa M , suspendido por una cuerda inextensible de largo L , donde se define su posición en coordenadas polares cuyo ángulo de posición corresponde a θ . Se espera que al soltar la masa a partir del reposo, esta oscile debido a la fuerza que actúa sobre ella, es decir la componente tangencial del peso (Lim, 1994).

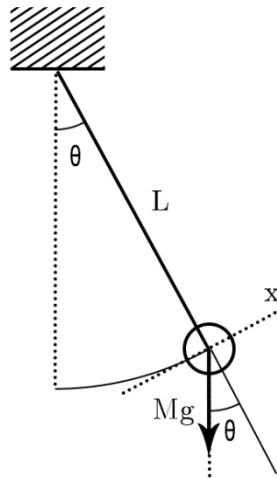


Figura 3-8: Diagrama de péndulo simple.

Se considera la sumatoria de fuerzas en el eje X de nuestro sistema, el cual es tangente a la cuerda que sostiene la masa del péndulo.

$$\sum F_x = M \cdot a = -W_x \quad (3.56)$$

$$\text{sen}(\theta) = \frac{W_x}{W} \quad (3.57)$$

$$W_x = W \cdot \text{sen}(\theta) = M \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.58)$$

$$M \cdot a = -M \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.59)$$

$$a = -g \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.60)$$

Consideramos la cuerda recorrida por theta como:

$$S = r \cdot \theta \quad (3.61)$$

$$S = L \cdot \theta \quad (3.62)$$

Considerando la expresión anterior se obtiene:

$$a = \frac{d^2 S}{dt^2} = -g \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.63)$$

$$a = L \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (3.64)$$

Considerando las ecuaciones (3.63) y (3.64) obtiene:

$$L \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -g \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.65)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{L} \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.66)$$

Considerando pequeñas deformaciones en un movimiento armónico simple, es posible realizar la siguiente aproximación:

$$\text{sen}(\theta) = \theta \quad (3.67)$$

Se redefine la ecuación, resultando de la siguiente manera:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{L} \cdot \theta \quad (3.68)$$

Se define la posición angular del movimiento armónico simple del péndulo, como:

$$\theta = \theta_0 \cdot \cos(\omega t + \phi) \quad (3.69)$$

De esta manera, se define la frecuencia angular ω como:

$$\omega^2 = \frac{g}{L} \quad (3.70)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (3.71)$$

Luego, sabiendo que el período T de un movimiento armónico simple se define por:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.72)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (3.73)$$

De esta manera, siendo el inverso al periodo, la frecuencia corresponde a:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.74)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (3.75)$$

3.4.2 Ecuación de equilibrio dinámico del péndulo compuesto.

Se considera un elemento cúbico de masa M_w , suspendido por una varilla infinitamente rígida cuyo ángulo de posición corresponde a theta (θ). La varilla posee una masa M_v , y posee un largo L_v que gira libremente. Se analiza su Ecuación de Equilibrio Dinámico (EDD) para el sistema sin cargas externas (condición homogénea asociada al movimiento libre no amortiguado) y sin fuentes de disipación.

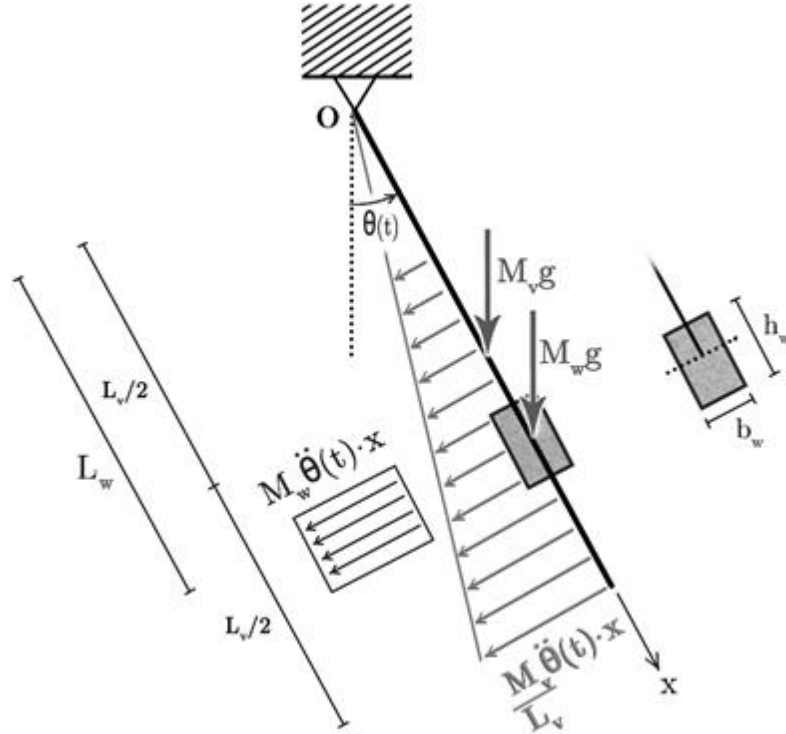


Figura 3-9: Diagrama de péndulo compuesto.

La EED del sistema que se obtiene de la sumatoria de momentos en tono al punto “O” se expresa de la siguiente manera:

$$I_0 \cdot \ddot{\theta}(t) + k_{eq} \cdot \theta(t) = 0 \quad (3.76)$$

Siendo I_0 la inercia total del sistema, que en este caso se compone por la suma de la inercia de la masa puntual y de la varilla.

$$I_0 = I_v + I_w \quad (3.77)$$

Donde, el momento de inercia de la varilla de masa M_v y de longitud L_v , respecto al punto de suspensión "O", corresponde a (obtenido a partir del teorema de Steiner):

$$I_v = \frac{1}{12} M_v L_v^2 + M_v \left(\frac{L_v}{2} \right)^2 = \frac{1}{3} M_v L_v^2 \quad (3.78)$$

Además, se definen las dimensiones del elemento cúbico de masa M_w para obtener su momento de inercia, considerando un cuerpo rectangular de una altura h_w y un ancho b_w , parámetros representados en la Figura 3-9. Para dicho cálculo se considera la siguiente expresión:

$$I_w = \frac{1}{12} M_w (h_w^2 + b_w^2) + M_w L_w^2 \quad (3.79)$$

Donde L_w en este caso corresponde a la distancia del eje de rotación con el centro de masa del elemento.

Luego se obtiene el momento generado por el peso de la varilla y la masa adherida:

$$M_{0v} = M_v \cdot \left(\frac{L_v}{2} \right) \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) \quad M_{0w} = M_w \cdot L_w \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.80)$$

Se obteniendo el momento producido por el peso del sistema:

$$M_0 = M_{0v} + M_{0w} \quad (3.81)$$

$$M_0 = \text{sen}(\theta) \left(\sum M_i \cdot L_i \right) \cdot g \quad (3.82)$$

Donde el término $\sum M_i L_i$ corresponde a la sumatoria del producto de cada una de las masas que posee el péndulo compuesto y la distancia que tiene hasta el centro de gravedad de cada elemento respecto al punto "O" (distancia radial hasta el punto "O").

Equivalentemente, corresponde al producto entre la masa total y la distancia radial hasta el centro de gravedad de las masas que posee el pendulo compuesto.

Si se desprecia fuentes de disipación de energía, la ecuación de movimiento linealizada (es decir considerando pequeñas deformaciones, o que $\text{sen}(\theta) = \theta$), resulta de la forma:

$$I_0 \ddot{\theta}(t) + \left(\sum M_i \cdot L_i \right) \cdot g \cdot \theta(t) = 0 \quad (3.83)$$

De esta manera, la rigidez equivalente y la frecuencia angular del péndulo compuesto será:

$$k_{eq} = \left(\sum M_i \cdot L_i \right) \cdot g \quad (3.84)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\left(\sum M_i \cdot L_i \cdot g \right)}{I_0}} \quad (3.85)$$

Y su frecuencia y periodo natural será:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\left(\sum M_i \cdot L_i \right) \cdot g}{I_0}} \quad ; \quad T_n = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I_0}{\left(\sum M_i \cdot L_i \right) \cdot g}} \quad (3.86)$$

3.4.3 Ecuación de equilibrio dinámico del péndulo compuesto, frente a excitación generada por un movimiento horizontal y vertical de su apoyo.

Se considera el mismo sistema de péndulo compuesto usado para el caso homogéneo no amortiguado (de la subsección anterior); pero expandiéndola para incluir el efecto de un sismo en su apoyo descrito por una aceleración horizontal ($\ddot{u}_h(t)$) y vertical ($\ddot{u}_v(t)$), además de incluir en forma simplificada la disipación del sistema considerando una tasa de amortiguamiento equivalente.

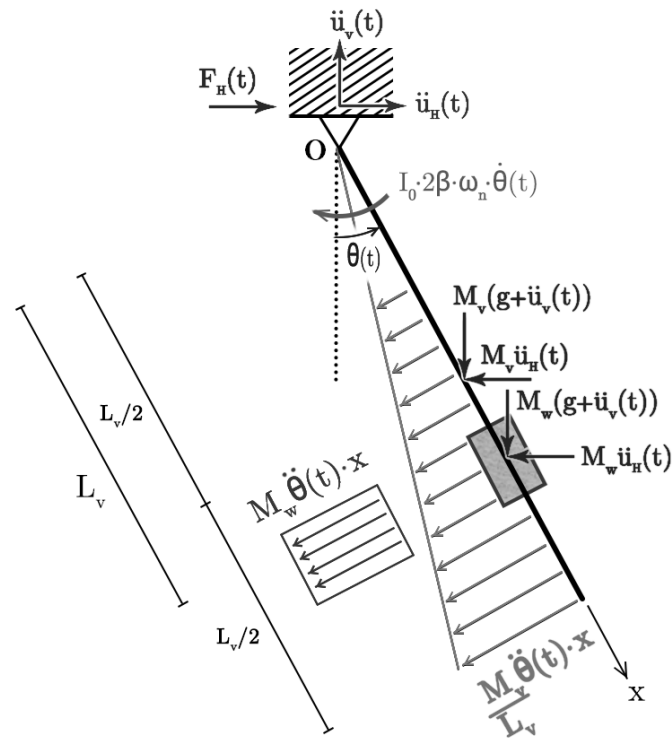


Figura 3-10: Diagrama del péndulo frente a acciones externas.

Sumado a lo ya mencionado, este escenario considera un momento producido por efectos de amortiguamiento visco-elástico lineal expresado en una razón de amortiguamiento crítico β del dispositivo, teniendo en cuenta que el amortiguamiento crítico del sistema se expresa como :

$$\beta = \frac{c_{eq}}{2 \cdot \omega_n \cdot I_0} \Rightarrow c_{eq} = 2 \cdot \beta \cdot \omega_n \cdot I_0 \quad (3.87)$$

Por lo que al considerar el factor c^* y las aceleraciones externas se obtiene la siguiente expresión:

$$I_0 \cdot \ddot{\theta} + c_{eq} \cdot \dot{\theta} + \left(\sum M_i L_i \right) \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) + \left(\sum M_i L_i \right) \cdot \ddot{u}_v \cdot \text{sen}(\theta) + \left(\sum M_i L_i \right) \cdot \ddot{u}_h \cos(\theta) = 0 \quad (3.88)$$

Donde al reordenar los términos de la ecuación de equilibrio dinámico, entendiendo los efectos de las aceleraciones de la base (horizontal y vertical) como acciones externas se obtiene:

$$I_0 \ddot{\theta} + c_{eq} \cdot \dot{\theta} + \left(\sum M_i L_i \right) \cdot g \text{sen}(\theta) = - \left(\sum M_i L_i \right) \cdot \left[\ddot{u}_v \text{sen}(\theta) + \ddot{u}_h \cos(\theta) \right] \quad (3.89)$$

Si se linealiza la ecuación de movimiento del péndulo considerando pequeñas deformaciones ($\theta \rightarrow 0$) se tiene que $\text{sen}(\theta) \approx \theta$ y que $\cos(\theta) \approx 1$ por cuanto la ecuación de movimiento se puede expresar como:

$$I_0 \ddot{\theta} + c_{eq} \cdot \dot{\theta} + \left(\sum M_i L_i \right) \cdot g \cdot \theta = - \left(\sum M_i L_i \right) \cdot \left[\ddot{u}_v \cdot \theta + \ddot{u}_h \right] \quad (3.90)$$

En caso de que el ángulo θ sea pequeño se tendrá que $\ddot{u}_v \cdot \theta + \ddot{u}_h \approx \ddot{u}_h$, lo que indicaría que la acción vertical podría ser eventualmente ignorada (como se suele suponer en análisis de DMS). En cambio, si θ no es pequeño se tendrá que la respuesta del péndulo puede ser modificada significativamente por la acción sísmica vertical (pudiendo modificar

su respuesta sintonizada). Por otra parte, reorganizando los términos, la ecuación de movimiento linealizada puede ser rescrita de la siguiente manera:

$$I_0 \ddot{\theta} + c_{eq} \cdot \dot{\theta} + \left(\sum M_i L_i \right) \cdot (g + \ddot{u}_v) \cdot \theta = - \left(\sum M_i L_i \right) \cdot \ddot{u}_h \quad (3.91)$$

Esta última expresión indicaría que el periodo natural del péndulo cambiaría con la aceleración vertical (es decir cambia a través del tiempo para el caso sísmico). Es decir, el periodo natural podría expresarse en forma linealizada como se muestra en la siguiente expresión (observándose que la aceleración vertical sería equivalente a cambiar la aceleración de gravedad efectiva):

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{\left(\sum M_i \cdot L_i \right) \cdot (g + \ddot{u}_v(t))}} \quad (3.92)$$

Cabe mencionar que un péndulo podría tener grandes deformaciones (dependiendo de su frecuencia, amortiguamiento y excitación), por cuanto la linealización de su ecuación de movimiento podría ser incorrecta. En tal caso, se tendrá que el efecto del sismo vertical de la ecuación (3.89) ($\ddot{u}_v \sin(\theta)$) sería comparable con el efecto del sismo horizontal ($\ddot{u}_h \cos(\theta)$), pudiendo afectar significativamente la repuesta sintonizada del péndulo, afectando la posible eficiencia del dispositivo.

Por otra parte, la respuesta del péndulo será computarizada utilizando la ecuación (3.89), es decir considerando grandes deformaciones como se detalla en la sección 4.7.1. Para esto, en cada paso de tiempo se utilizará un sistema de interacciones del tipo Newton Raphson para resolver la ecuación de movimiento en forma numérica y precisa al considerar el efecto de la acción horizontal y vertical. Dicho de otra manera, se supone una aceleración angular ($\ddot{\theta}$) constante por cada paso de tiempo, obteniendo una variación de velocidad angular ($\Delta\dot{\theta}_n$) y por lo tanto su valor siguiente ($\dot{\theta}_{n+1}$). Obtenido el valor de la velocidad angular, de manera análoga se obtiene la variación del ángulo de giro ($\Delta\theta_n$) y por lo tanto su valor siguiente (θ_{n+1}), el cual es ajustado para satisfacer la ecuación de movimiento.

A partir del equilibrio de fuerzas horizontales de la Figura 3-10 es posible determinar la reacción horizontal que el apoyo debe aplicar al péndulo (F_H t) (donde L_c corresponde a la distancia radial en cual se supone que se encuentra el centro de acción

del momento producido por la disipación viscoelástica, que en esta memoria se supone $L_c = L_v$). Esta fuerza horizontal es por tanto según el principio de acción y reacción la fuerza restitutiva que genera el péndulo a la estructura en cual se apoya (de igual valor, pero en dirección opuesta).

$$F_H(t) = \left(\sum M_i L_i \right) \ddot{\theta}(t) \cdot \cos(\theta) + \frac{2 \cdot \beta \cdot \omega_n \cdot I_0}{L_c} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot \cos(\theta(t)) + (M_v + M_w) \cdot \ddot{u}_h(t) \quad (3.93)$$

Capítulo 4

Metodología y Montaje en Laboratorio

4.1 Introducción

En este capítulo se describe los instrumentos utilizados y su disposición, descripción y montaje de la estructura a controlar, diseño y aplicación del DMS, generación de registros, y metodología del trabajo realizado.

Como objetivo principal se busca implementar un dispositivo capaz de controlar el primer modo de vibrar de una estructura del tipo edificio de corte de 6 grados de libertad. Para verificar su eficiencia, se somete la estructura a distintos registros sísmicos con distintos niveles de intensidad, midiendo la respuesta de la estructura original o la estructura con el DMS, sujeta a sismos horizontales puros o a la combinación de sismo horizontal y vertical.

4.2 Descripción de la estructura a controlar

La estructura a controlar corresponde a una torre de seis niveles que fue originalmente confeccionada por Rozas (2009) y modificada por Pastor (2019). Cada uno de estos niveles tiene un emparrillado de cuatro vigas longitudinales y dos vigas transversales, las cuales corresponden a perfiles de acero tipo cajón de 3 mm de espesor, formando una sección transversal de 50 mm x 30 mm (Figura 4-1).

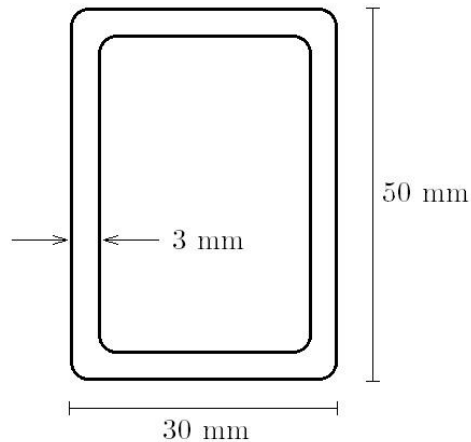


Figura 4-1: Sección transversal perfil de acero estructura.

Los niveles se soportan en cuatro columnas de acero y se encuentran ubicadas en las esquinas del emparrillado, todas ellas tienen una sección de 50 x 3 mm. Las propiedades estructurales mecánicas del acero estructural A36 utilizado en las columnas se encuentran descritos en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Propiedades Mecánicas del Acero Estructural.

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad (ρ)	[Kg/m ³]	7850
Módulo de Elasticidad (E)	[GPa]	200.0
Módulo de Corte (G)	[GPa]	77.22

Relación de Poisson (μ) - 0.30

Expansión Termal [$mm/mm\ ^\circ C$] 1.17e-05

Sobre el sexto nivel se ubican cuatro planchas de acero mientras que en cada uno de los niveles restantes se disponen dos (Figura 4-3). Con esto se busca aumentar la masa de los niveles superiores e incrementar el periodo fundamental de la estructura. Estas poseen una dimensión de 425 mm x 250 mm y 3 mm de espesor, y un peso de aproximadamente 2,5 kg cada una.

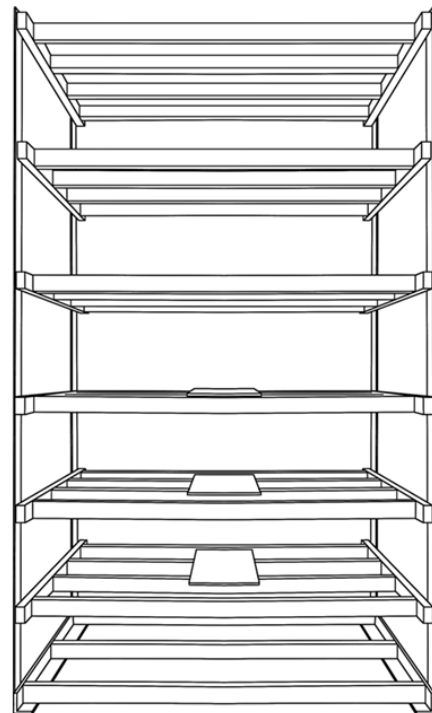


Figura 4-2: Estructura principal de seis niveles.

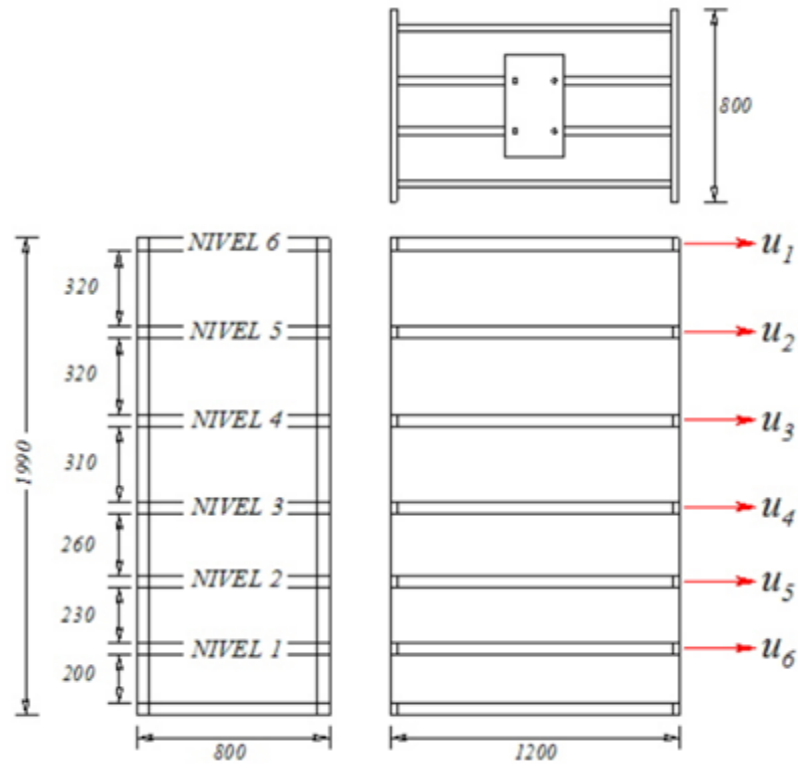


Figura 4-3: Vista en planta y elevación de la estructura. Señala dimensiones en milímetros y grados de libertad de ésta. Esquema modificado del realizado por Rozas (2009).

La Figura 4-3 señala la altura que posee cada nivel, junto con la definición de grados de libertad de la estructura que se empleará en la presentación de resultados. En cada nivel de la estructura, específicamente en su cara lateral derecha, es instalado un acelerómetro (a excepción del sexto nivel, que posee dos sensores en el mismo sentido con el fin de medir la respuesta de torsión). La disposición de los sensores se detalla en la sección 4.4.1.

La estructura se fija a la mesa vibradora MOOG del laboratorio de Sólidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile mediante un perfil de acero ubicado en su base, que a su vez reposa sobre perfiles de madera. Este sistema se sostiene mediante pernos de acero, que aseguran una condición de no desplazamiento de la estructura respecto a la mesa.

A continuación, la Tabla 4-2 muestra el peso de cada nivel de la estructura, considerando cada nivel como los distintos perfiles rectangulares en conjunto con el par de

planchas de acero. Estas masas fueron cuidadosamente pesadas antes y después de desmontar la estructura.

Para definir la matriz de masa, se desmonta la estructura para pesar cada nivel de ésta mediante el uso de una balanza, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4-2. Estas masas permitirán determinar un modelo simplificado que considera la masa concentrada a la altura de cada nivel de la estructura (sección 4.7.2).

Tabla 4-2: Peso de cada nivel de la estructura

Nivel	Peso [kgf]
1	26.12
2	25.83
3	25.76
4	26.60
5	25.76
6	30.61
Total	160.68

4.3 Descripción del DMS tipo péndulo

El DMS que se utilizó durante los ensayos corresponde a un péndulo compuesto, acondicionado para ser instalado en el nivel superior de la estructura. El dispositivo posee en su totalidad un peso de 6,89 kgf, lo que corresponde a un 4,29% de la masa total de la estructura (razón de masas según ecuación (3.4)).

La siguiente figura presenta la disposición de cada una de sus partes:

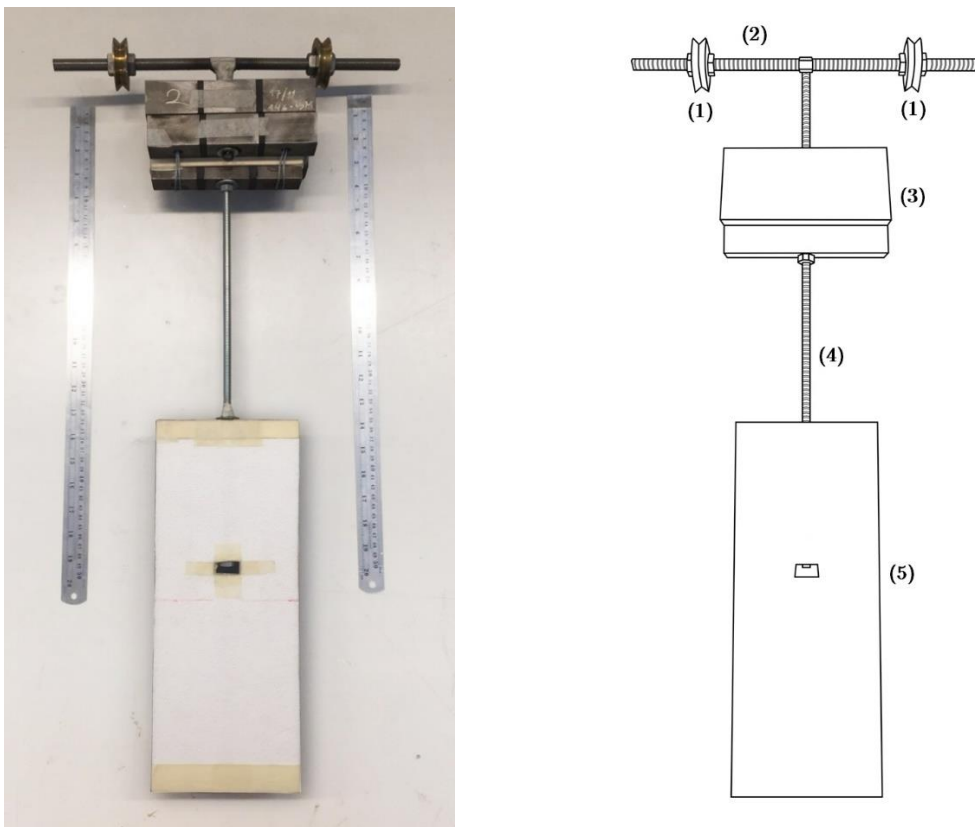


Figura 4-4: DMS tipo péndulo desde vista frontal.

(1) corresponde a un par de rodamientos de acero que permiten el libre giro del dispositivo. Estos se apoyan en bloques de madera que irán instalados en el nivel superior de la estructura, de manera que los rodamientos serán distanciados por 197 mm.

(2) corresponde a una varilla de acero roscada, de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, ubicada horizontalmente y apoyada sobre los rodamientos. Esta posee un largo de 300 mm, distancia necesaria para alcanzar los dos perfiles que sostendrán el dispositivo. En su centro es soldado un extremo de la varilla vertical del sistema.

(3) corresponde a un conjunto de bloques de acero que poseen en su totalidad un peso de 6.75 kgf y poseen un canal vertical que permite el ingreso de la varilla que los sostiene. A su vez en cada extremo del canal, se instala una tuerca capaz de modificar la posición en que se ubica esta masa, de manera de poder ajustar el radio de giro y por lo tanto el periodo del dispositivo mediante la metodología señalada en la sección 4.6.3.

(4) corresponde a una varilla de acero roscada, de $\frac{1}{4}$ pulgada de diámetro, verticalmente soldada a la varilla horizontal. Posee un largo de 495 mm y en ella se instalan los elementos (3) y (5) del DMS.

(5) corresponde a una plancha de polietileno expandido de 2 mm de grosor, cuyas dimensiones son 140 mm de ancho y 350 mm de alto. Posee un peso de 0.035 kgf, y se ubica en el extremo inferior de la varilla vertical. Su finalidad es aportar disipación al dispositivo mediante el efecto de arrastre fluidodinámico que se produce entre la plancha de polietileno y el aire durante la oscilación, la finalidad de este dispositivo fue incrementar la tasa de amortiguamiento efectivo del dispositivo

Las dimensiones de cada uno de los elementos se presentan a continuación:

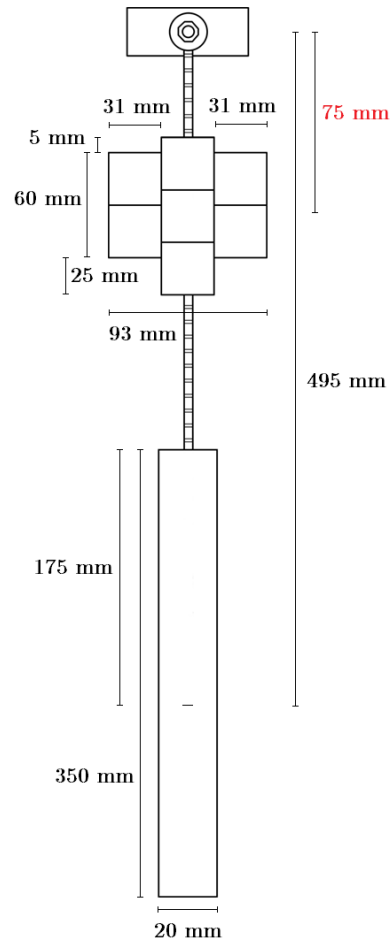


Figura 4-5: Diagrama DMS con dimensiones en milímetros.

La Figura 4-5 muestra una vista lateral del DMS, es decir, alto y ancho, teniendo en cuenta que estas dimensiones son relevantes para el cálculo de la inercia del sistema completo en rotación (sección 3.4.2). Es posible observar que la masa principal posee siete barras de 31 mm de ancho con 30 mm de alto, distribuidos en 3 columnas acopladas. La distancia finalmente utilizada entre el eje de rotación y el centro de masas del dispositivo se señala en color rojo, siendo esta 75 mm.

Por otra parte, de manera complementaria a los elementos ya mencionados, se utiliza un sistema de ensamblaje para instalar el dispositivo en la estructura. Este sistema consta de dos bloques de madera capaces de contener cada uno de los dos rodamientos del DMS, junto con un par de abrazaderas de plástico cuyo objetivo es acoplar los bloques de madera con el perfil de acero del sexto nivel de la estructura.

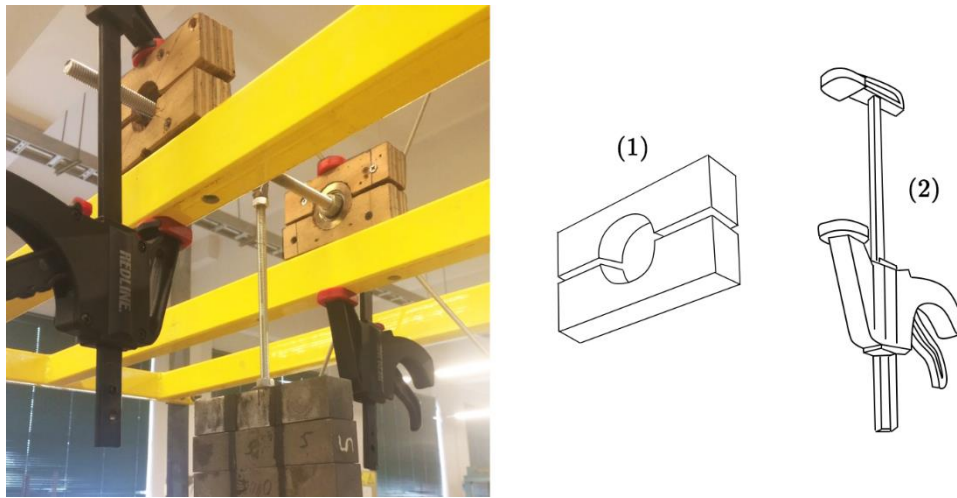


Figura 4-6: Bloque de madera (1) y abrazadera (2).

4.4 Montaje en laboratorio

Para realizar y monitorear el ensayo en laboratorio, se hace uso de una mesa vibradora en la que se monta la estructura. Sus aceleraciones son medidas utilizando acelerómetros y registradas a través de un sistema de adquisición de datos. Por otra parte, se obtiene un registro audiovisual de cada uno de los ensayos realizados. La descripción de cada uno de los instrumentos mencionados se presenta a continuación.

4.4.1 Instrumentos de medición

Se emplean acelerómetros capacitivos correspondientes al modelo 8310A K-BEAM de la marca KISTLER (Figura 4-7). Estos miden aceleraciones de manera uniaxial, utilizando un elemento de detección de capacitancia variable micro mecanizado de silicio. La dirección de medición de este tipo de acelerómetro es perpendicular a la superficie del dispositivo y por lo tanto a la superficie a la que se adhiere.



Figura 4-7: Acelerómetro KISTLER 8310A K-BEAM (Kistler Instruments Corporation, s. f.).

De acuerdo con el catálogo KISTLER, estos dispositivos son ideales para ser utilizados en la medición de aceleraciones de bajo nivel en un entorno estable o de bajo nivel de ruido y enfocados para la medición de bajas frecuencias y por tanto útiles para registrar el movimiento sísmico de estructuras (montadas en laboratorio), junto con poseer una baja sensibilidad a variaciones térmicas y a la aceleración transversal.

Se utilizan un total de 12 acelerómetros, cuyas características tales como rango de medición, constante de calibración y sensibilidad transversal se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Características técnicas acelerómetros KISTLER.

Número de Sensor	Rango de medición (g)	Modelo y número de serie	Constante de Calibración [V/g]	Sensibilidad Transversal (%)	Frecuencia de resonancia (kHz)
A1	± 2	2002309	1.003	3	1.4
A2	± 2	2002310	0.993	3	1.4
A3	± 2	2002311	0.986	3	1.4
A4	± 2	2003776	0.995	3	1.4
A5	± 2	2003777	0.994	3	1.4
A6	± 2	2003778	0.984	3	1.4
A7	± 2	2003779	0.987	3	1.4
A8	± 2	2003780	0.989	3	1.4
A9	± 2	2003781	0.987	3	1.4
A10	± 2	2003782	0.984	3	1.4
A11	± 2	2003783	0.997	3	1.4
A12	± 2	2003784	0.986	3	1.4

Una vez montada la estructura, se colocan acelerómetros en diferentes puntos de esta. Este sistema de monitoreo registra la aceleración en cada uno de los acelerómetros en un tiempo común, y las almacena a una tasa de 200 muestras por segundo para ser analizadas posteriormente. Un acelerómetro extra es colocado en el disipador de masa sintonizada (de manera que el sensor oscila junto al dispositivo), con el fin de obtener su historial de aceleraciones. Estos dispositivos entregan resultados en voltaje, por lo que cada uno posee una constante de conversión para obtener aceleración. Dichas constantes, junto con el modelo y tipo de cada acelerómetro se presentan en la Tabla 4-3.

En cada uno de los niveles de la estructura se ubica un acelerómetro en el sentido longitudinal (correspondiente al eje X que corresponde a la dirección más flexible de la estructura, entendiéndose que la estructura trabaja fundamentalmente como un sistema

2D, al tener una alta rigidez transversal y a torsión), salvo el sexto nivel, que posee dos sensores en el mismo sentido con el fin de medir posibles efectos de torsión. Además, el sexto nivel posee en su marco un sensor en el sentido vertical (eje Z), capaz de medir inputs verticales que solicitan el DMS (sensor A3 en Figura 4-9).

En la base de la estructura se ubican tres sensores que medirán las aceleraciones de entrada en cada uno de los ejes cartesianos, cuyo montaje se presenta en la Figura 4-8.

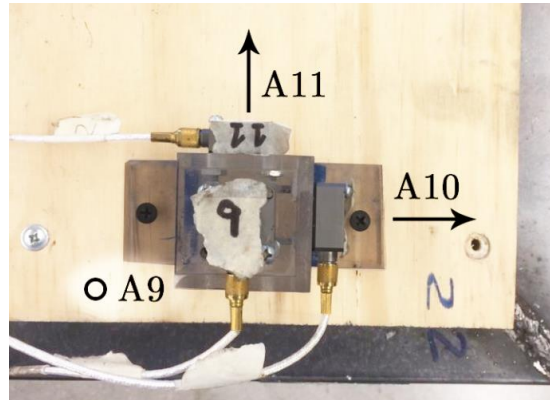


Figura 4-8: Montaje experimental sensores A9, A10 y A11.

La ubicación y sentido de cada sensor descrito, junto con la dirección y sentido de los ejes definidos, se representa de manera gráfica en la Figura 4-9.

Tabla 4-4: Ubicación de sensores en la estructura

Número de Sensor	Ubicación
A1	Nivel 6
A2	Nivel 6
A3	Nivel 6
A4	Nivel 5
A5	Nivel 4

A6	Nivel 3
A7	Nivel 2
A8	Nivel 1
A9	Base eje Z
A10	Base eje X
A11	Base eje Y
A12	D.M.S

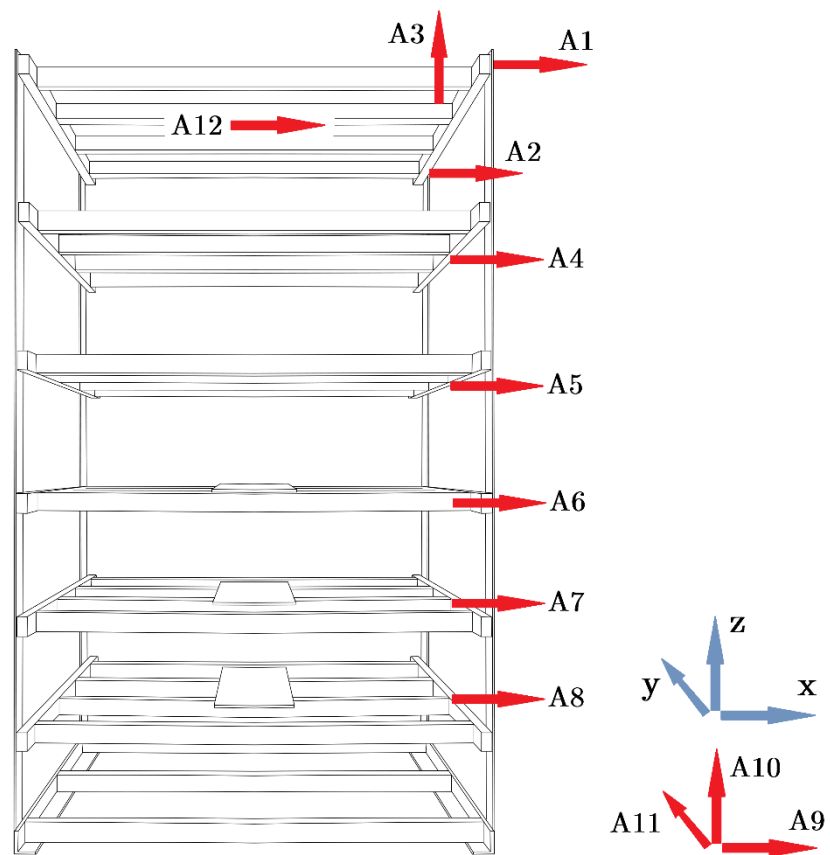


Figura 4-9: Disposición de sensores en la estructura.
 En azul: Dirección y sentido de sentido de ejes definidos.

4.4.2 Sistema de adquisición de datos

Para digitalizar y registrar las señales analógicas provenientes de los sensores, se utiliza un sistema de adquisición de datos (DAQ). El Sistema DAQ, esquematizado en la Figura 4-10, se compone de acondicionadores de señales, filtros analógicos, hardware de medidas DAQ, y un computador con software programable, siendo en conjunto capaces de medir un fenómeno eléctrico o físico como corriente, temperatura, presión, sonido, que en este caso corresponde a voltaje y que es digitalizado como una serie de datos a una tasa de muestreo definida. En este contexto se emplean software como LabView para controlar y configurar del DAQ y la medición.



Figura 4-10: Esquema del funcionamiento de un Sistema DAQ (National Instruments, 2020).

El sistema de adquisición de datos consiste en una tarjeta de adquisición de datos National Instruments NI-PCI 6014 sin filtro, con una fuente de poder MCP M10-380S-303E con 12 V de voltaje de excitación (National Instruments, 2020).

De esta manera las señales analógicas son convertidas en digitales para ser manipuladas por un computador gracias a un convertidor analógico-digital (ADC). El ADC utilizado corresponde a un chip con una resolución de 16 bits configurado para realizar muestras a 200 Hz. Estas muestras se transfieren al PC a través del bus, donde la señal original es reconstruida.

Para el Software Controlador se utiliza un computador con el software de adquisición LabView, configurado para registrar datos a una tasa de muestreo de 200 Hz para todos los ensayos realizados. Esta alta tasa de muestreo se seleccionó tomando en

cuenta el hecho de que se medirían la respuesta vertical del péndulo y de la estructura, qué podrían ser eventualmente afectados por efectos asociados a alta frecuencia.

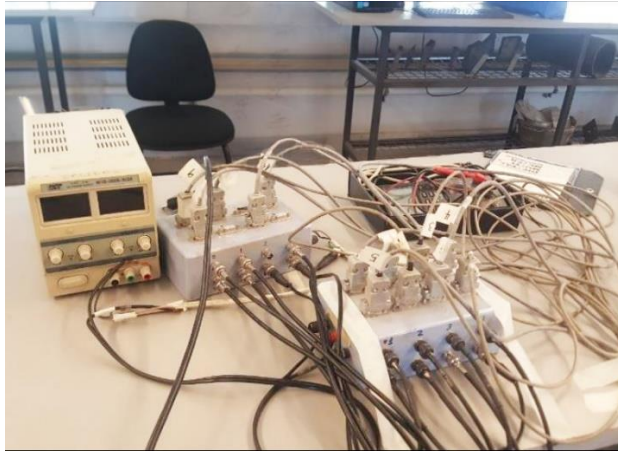


Figura 4-11: Dispositivo de adquisición de datos.



Figura 4-12: Computador Sistema que posee la tarjeta de adquisición de datos.

4.4.3 Cámara de video

Para registrar el comportamiento de la estructura se utiliza una cámara de video PANASONIC AG-AC30. De esta manera se obtienen registros audiovisuales de cada uno de los ensayos realizados a una resolución de 1080p, es decir 1920 x 1080 pixeles de ancho y alto respectivamente. La velocidad de fotogramas corresponde a una de 23.98 imágenes por segundo. En total se obtienen 12 videos, cada uno asociado a una configuración de ensayo.



Figura 4-13: Cámara de Video PANASONIC AG-AC30.

4.5 Registros utilizados para la comparación

4.5.1 Mesa Vibradora MOOG

Para poder realizar los ensayos, se generan diversos registros sísmicos que son aplicados en la base de la estructura utilizando una mesa vibradora, ubicada en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. La mesa corresponde a MOOG 6DOF2000E modelo 170-131, que posee un movimiento eléctrico de seis grados de libertad (6 GDL) con un bastidor metálico suspendido horizontal para el montaje de carga útil.

Si bien la mesa vibradora posee 6 GDL, este trabajo prescindirá de aquellos que generan una rotación de su base. Por lo tanto, los movimientos definidos por el sistema y considerados para reproducir los registros, son los siguientes (Figura 4-14):

- Heave: Movimiento vertical hacia arriba y hacia abajo (Eje Z).
- Surge: Movimiento horizontal hacia la izquierda y hacia la derecha (Eje X).
- Lateral: Movimiento horizontal hacia adelante y hacia atrás (Eje Y).

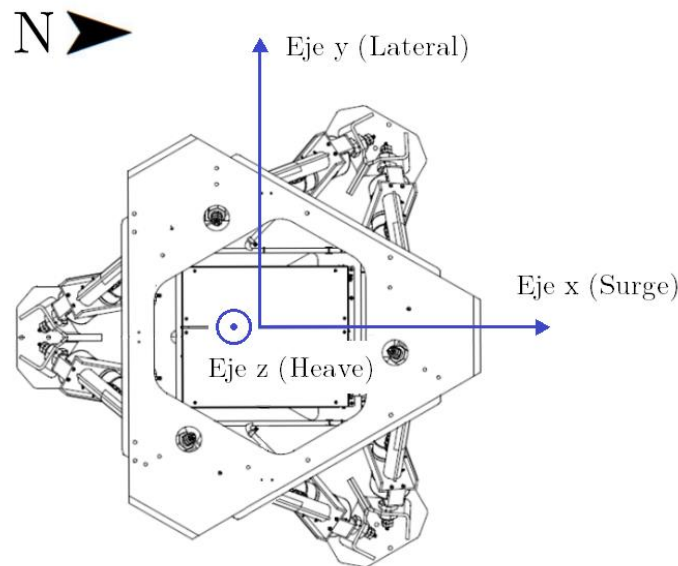


Figura 4-14: Ejes cartesianos mesa vibradora.
Fuente: Modificada de Moog (Moog Inc., 2008)

A continuación, la Tabla 4-5 presenta los valores máximos que la mesa vibradora es capaz de reproducir, para cada uno de los grados de libertad mencionados:

Tabla 4-5: Valores límites de movimiento de la mesa vibradora.

GDL	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración
Heave	± 18 cm	± 30 cm/s	± 0.5 g
Surge	± 25 cm	± 50 cm/s	± 0.6 g
Lateral	± 25 cm	± 50 cm/s	± 0.6 g

4.5.2 Especificación de registros utilizados

Para generar los registros que serán ingresados a la mesa, se utilizarán los obtenidos durante los siguientes sismos:

- Terremoto de Tarapacá (2005): Estación de Pica, asociada al sismo intraplaca de profundidad intermedia, ocurrido debido a una ruptura al interior de la placa de Nazca. Magnitud 7.8 Mw, con epicentro a 49 km al Norte de Pica y registrado por RENADIC.
- Terremoto del Maule (2010): Estación de Llolleo, sismo de falla inversa interplacas originado debido al desplazamiento de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, cubriendo 450 km de longitud en dirección norte-sur. Magnitud 8.8 Mw, con epicentro a 332 km al Suroeste de Llolleo y registrado por RENADIC.
- Terremoto de Kobe (1995): Estación de Port Island, sismo de subducción originado en un borde convergente, donde la placa Filipina subduce bajo la Euroasiática. Magnitud 6.9 Mw, con epicentro a 20 km del Suroeste de Kobe (Facts and Details, s. f.).

A continuación, la Tabla 4-6 presenta la fuente de la cual se obtuvo cada registro asociado a los sismos mencionados anteriormente. Esto es, la estación del acelerógrafo del cual se obtiene el registro, junto con las componentes utilizadas.

Tabla 4-6: Fuente de registros utilizados para ensayar la estructura

Sismo	Localidad	Estación	Eje X	Eje Z
JAPÓN 1995, KOBE	Port Island	CEOR	90	UP
CHILE 2010, MAULE	Llolleo	SMA-1	L	V
CHILE 2005, TARAPACÁ	Pica	Etna	NS	V
CHILE 2010, MAULE MOD.	Llolleo	SMA-1	L	MOD.

Utilizando el programa computacional MATLAB se generan archivos “.txt” que poseen la aceleración de los ejes X y Z de los registros seleccionados. Estos archivos poseen tres columnas, donde la primera corresponde a la aceleración del eje X, la segunda a la del eje Y, y la última a la del eje Z. Ya que la estructura trabaja como un sistema 2D, la segunda columna de cada archivo tendrá un valor nulo, es decir, el eje Y tendrá en todo momento una aceleración igual a cero. Estos valores poseen un Δt de 0.005 seg, es decir, que se ingresan a una tasa de 200 muestras por segundo.

La amplitud de cada registro fue reducida (ponderada por un factor de escala) para adecuarse a las limitaciones de reproducción de la mesa vibradora, la cual posee máximos de desplazamiento, velocidad y aceleración (Tabla 4-5). De esta manera el registro utilizado posee una amplitud al tanto por ciento del original, especificado en el factor “Reducción” de la Tabla 4-7.

A partir de un registro ya reducido, se obtienen variaciones de éste a partir de la escala que se le da a las dos direcciones que lo definen. Para cada variación de un mismo registro, la escala del eje X se mantendrá constante, mientras que la escala del eje Z va en aumento, esto con el fin de comparar la eficiencia del disipador frente a este incremento.

Para cada nuevo registro generado, ambos factores se especifican en “Escala eje X” y “Escala eje Z” de la Tabla 4-7.

A partir de los archivos “.txt”, se generan archivos binarios del tipo “joystickXXX” a una tasa de muestreo de 60 Hz, que son posteriormente leídos en el sistema de control de la mesa vibradora permitiendo de esta forma generar una entrada al sistema. Cada uno de los archivos “joystickXXX” se señalan en la Tabla 4-7.

Con el fin de llevar la estructura y el desempeño del dispositivo al caso límite, se generan registros con una alta aceleración vertical, denominados “Llolleo Modificado” (cuya abreviación es “LMOD”) ya que corresponde a una modificación del sismo de Llolleo (LLOL). Estos registros poseen como componente horizontal las aceleraciones utilizadas en el registro de Llolleo, mientras que las aceleraciones verticales son de tipo sinusoidal cuya frecuencia corresponde a la obtenida al excitarse el modo fundamental de la estructura a controlar. La amplitud de esta excitación vertical corresponde a la máxima aceleración permitida por la mesa que reproduce los registro en laboratorio.

Tabla 4-7: Escala de registros utilizados para ensayar la estructura

Código archivo	Sismo	Reducción	Escala eje X	Escala eje Z	Nombre registro
joystick607.txt	JAPÓN 1995, KOBE	40%	1.00	0.00	“KOBE04100000”
joystick608.txt	JAPÓN 1995, KOBE	40%	1.00	1.00	“KOBE04100100”
joystick612.txt	CHILE 2010, LLOLLEO	70%	0.50	0.00	“LLOL07050000”
joystick613.txt	CHILE 2010, LLOLLEO	70%	0.50	0.50	“LLOL07050050”
joystick614.txt	CHILE 1985, LLOLLEO	70%	0.50	1.00	“LLOL07050100”

joystick623.txt	CHILE 2005, PICA	60%	1.00	0.00	“PICA06100000”
joystick624.txt	CHILE 2005, PICA	60%	1.00	1.00	“PICA06100100”
joystick632.txt	CHILE 1985, LLOLLEO MOD.	70%	0.50	0.50	“LMOD07050050”
joystick633.txt	CHILE 1985, LLOLLEO MOD.	70%	0.50	1.00	“LMOD07050100”

De esta manera, para señalar la intensidad de aceleración en cada dirección del registro, se modifican los ocho primeros dígitos del nombre del archivo. Los dos primeros representan el factor de reducción del registro original, representando el número entre cero y uno por el cual fue ponderado (Por ejemplo, “04” significa que fue ponderando por 0.4, es decir que fue reducido a un 40%). Los tres siguientes corresponden al factor de escala que multiplica a los valores del eje X del registro ya reducido (Por ejemplo, “100” significa que fue ponderando por 1.00, y “050” significa que fue ponderando por 0.5), mientras que los tres últimos corresponden al factor de escala que multiplica a los valores del eje Z.

Para presentar la respuesta de cada ensayo en las próximas secciones de este trabajo, se conserva el nombre del registro extrayendo el número ponderador (Por ejemplo, “04” en el caso de “KOBEO4100100.txt”) y se agrega un dígito al final del nombre del archivo. Este dígito final señala si dicho ensayo fue realizado sin el DMS (se agrega un “0”), o si el dispositivo fue instalado (se agrega un “1”). Es decir, el archivo “LLOL_050100_0” corresponde a la respuesta sin el dispositivo instalado frente al registro “LLOL07050100.txt” ya que posee un cero, mientras que “LLOL_050100_1” es la respuesta de la estructura sometida al mismo registro que el caso anterior, pero con el dispositivo instalado.

A continuación, se presenta la aceleración máxima e Intensidad de Housner (I.H.) de cada registro utilizado, para ambas direcciones:

Tabla 4-8: Aceleración máxima e Intensidad de Housner de cada registro teórico.

Nombre registro	Ac máxima Eje X [g]	Ac máxima Eje Z [g]	I.H. Eje X [cm/s]	I.H. Eje Z [cm/s]
“KOBEO4100000.txt”	0.111	0.000	41.035	0.000
“KOBEO4100100.txt”	0.111	0.225	41.035	46.519
“LLOLO7050000.txt”	0.114	0.000	32.621	0.000
“LLOLO7050050.txt”	0.114	0.250	32.621	23.959
“LLOLO7050100.txt”	0.114	0.500	32.621	47.919
“PICA06100000.txt”	0.346	0.000	52.755	0.000
“PICA06100100.txt”	0.346	0.484	52.755	18.651
“LMOD07050050.txt”	0.114	0.105	32.621	41.838
“LMOD07050100.txt”	0.114	0.210	32.621	83.675

Las aceleraciones de los registros utilizados se presentan a continuación:

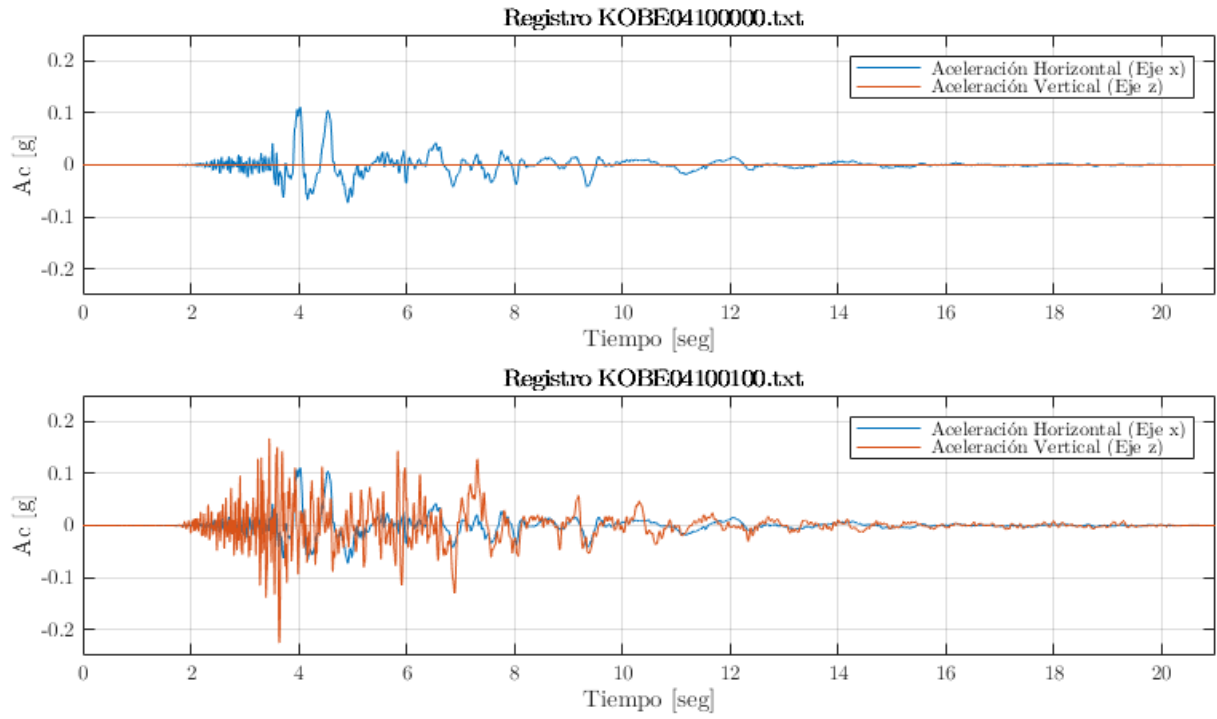


Figura 4-15: Registros teóricos aplicados a la mesa MOOG asociados al terremoto de Kobe 1995.

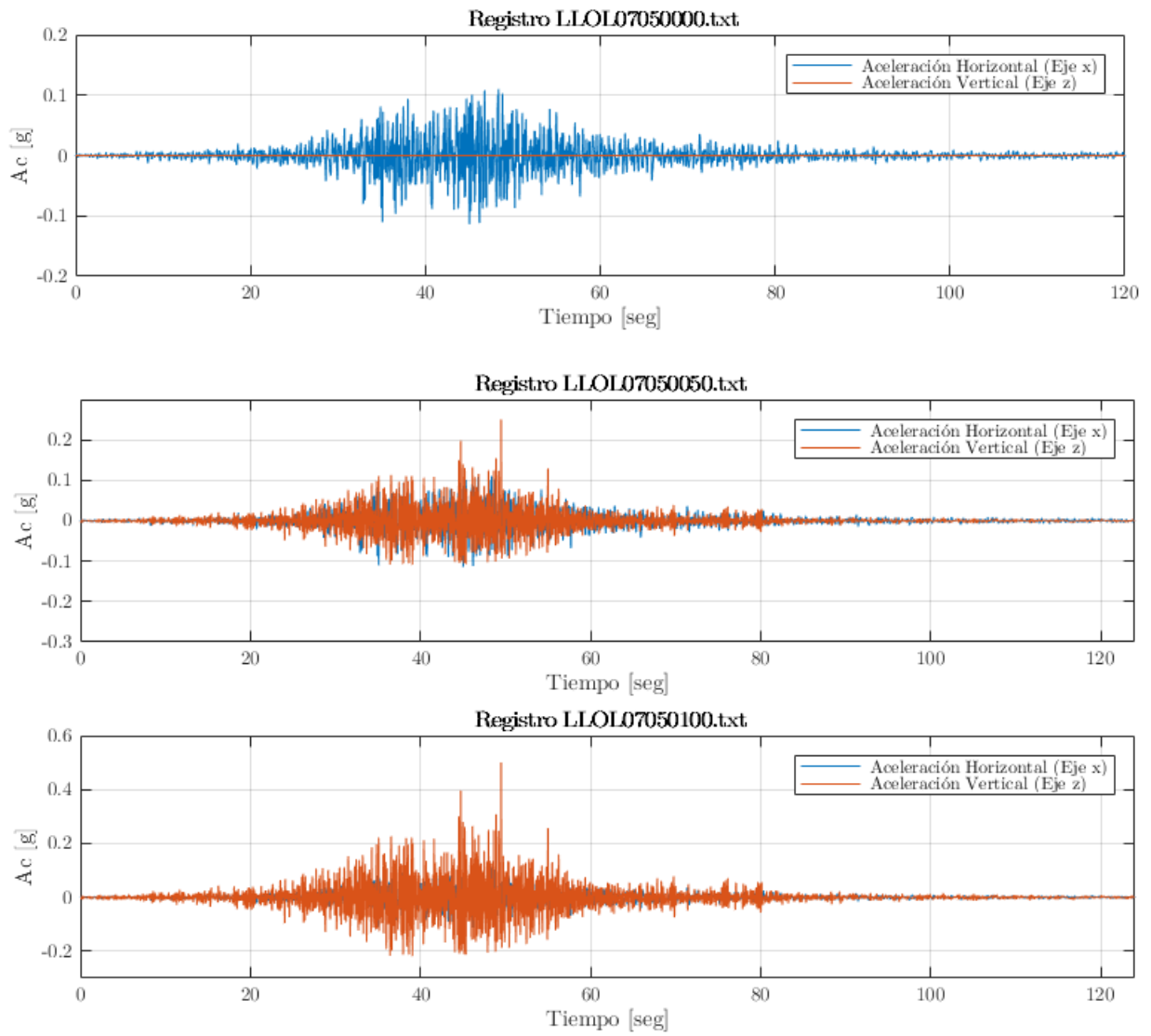


Figura 4-16: Registros teóricos aplicados a la mesa MOOG asociados al terremoto de Lollole 2010.

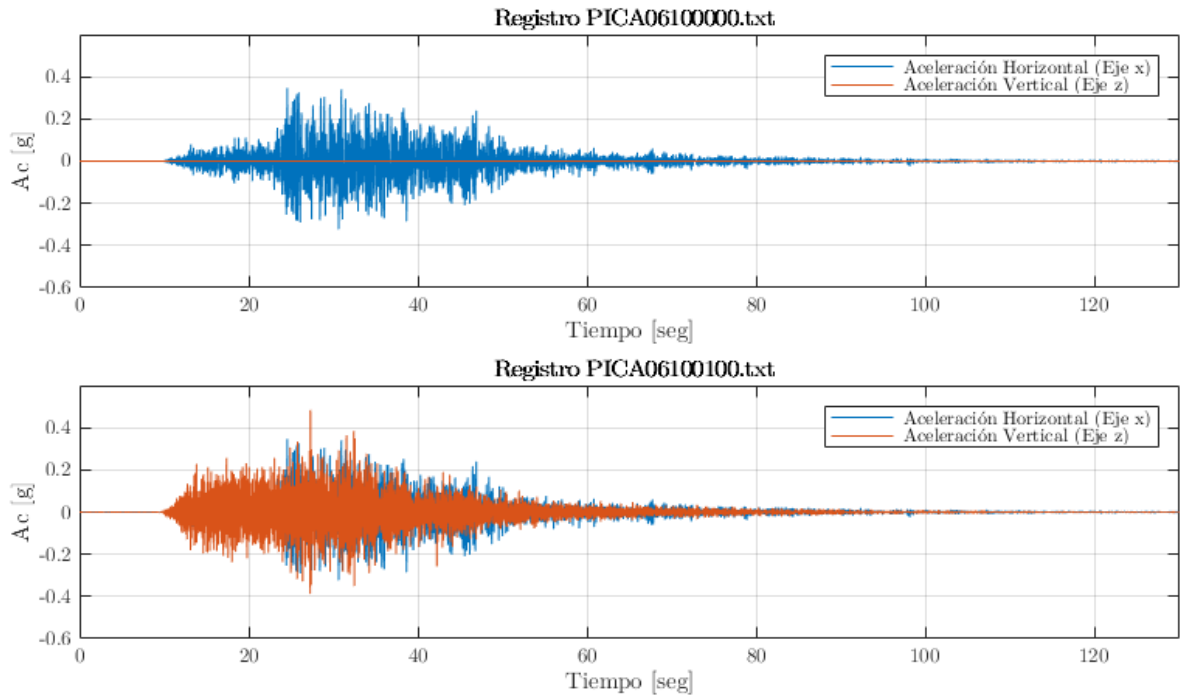


Figura 4-17: Registros teóricos aplicados a la mesa MOOG asociados al terremoto de Pica 2005.

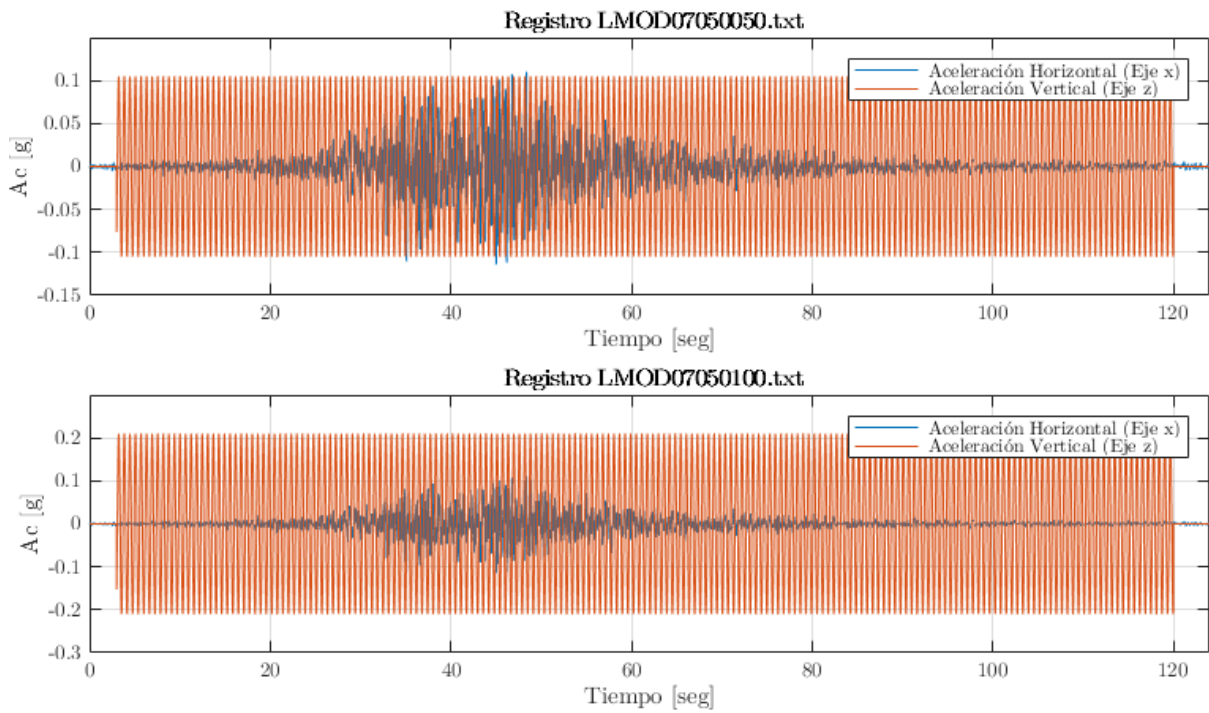


Figura 4-18: Registros teóricos aplicados a la mesa MOOG asociados al terremoto de Lolleo 2010, modificado.

4.5.3 Registros obtenidos a partir de mesa MOOG.

A continuación, Tabla 4-9 presenta la aceleración máxima e Intensidad de Housner (I.H.) obtenida a partir de cada registro utilizado, durante los ensayos en laboratorio.

Tabla 4-9: Aceleración máxima e Intensidad de Housner de cada registro en laboratorio.

Nombre registro	Ac máxima Eje X [g]	Ac máxima Eje Z [g]	I.H. Eje X [cm/s]	I.H. Eje Z [cm/s]
“KOBEO4100000.txt”	0.258	0.184	74.882	15.196
“KOBEO4100100.txt”	0.533	0.806	80.498	94.955
“LLOLO7050000.txt”	0.150	0.116	27.499	11.567
“LLOLO7050050.txt”	0.130	0.126	28.645	24.045
“LLOLO7050100.txt”	0.202	0.399	39.389	39.301
“PICA06100000.txt”	0.163	0.143	37.128	17.187
“PICA06100100.txt”	0.177	0.153	41.223	16.878
“LMOD07050050.txt”	0.229	0.246	37.227	38.885
“LMOD07050100.txt”	0.775	1.001	97.299	109.897

A continuación, se presentan las aceleraciones registradas por los acelerómetros ubicados en la mesa vibradora MOOG, al momento de ejecutar los archivos “.txt” especificados en la sección 4.5.2. De esta manera es posible observar las diferencias entre el registro teórico y el experimental, los cuales difieren debido a las características y limitaciones de la mesa vibradora con la cual se trabaja.

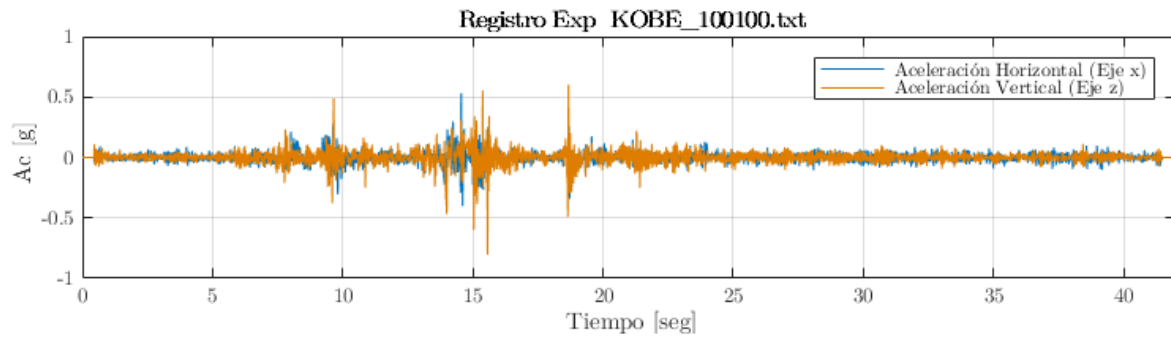
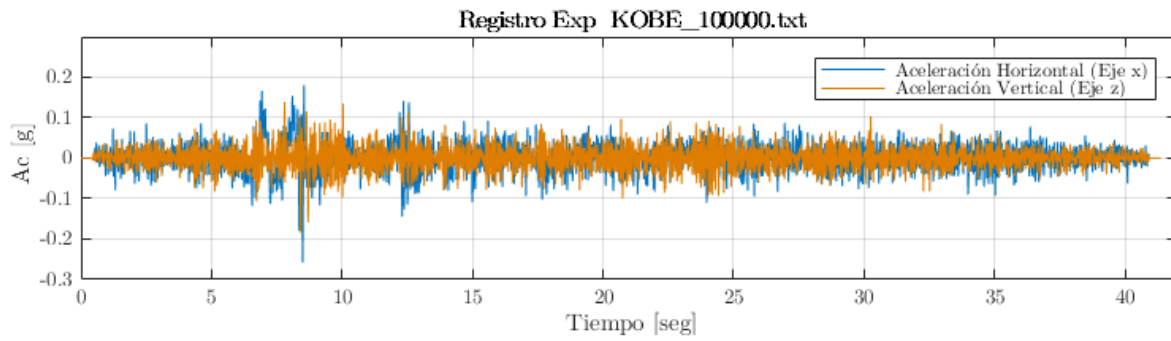
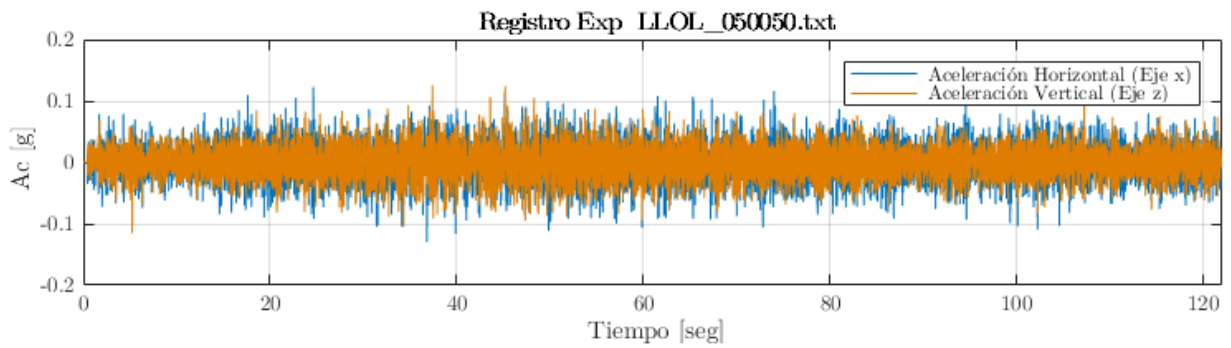
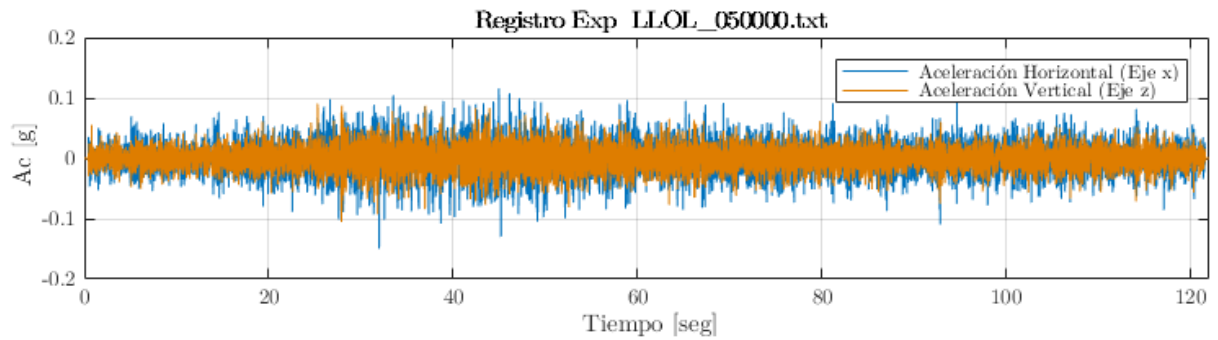


Figura 4-19: Registros experimentales obtenidos a partir de la mesa MOOG asociados al terremoto de Kobe 1995.



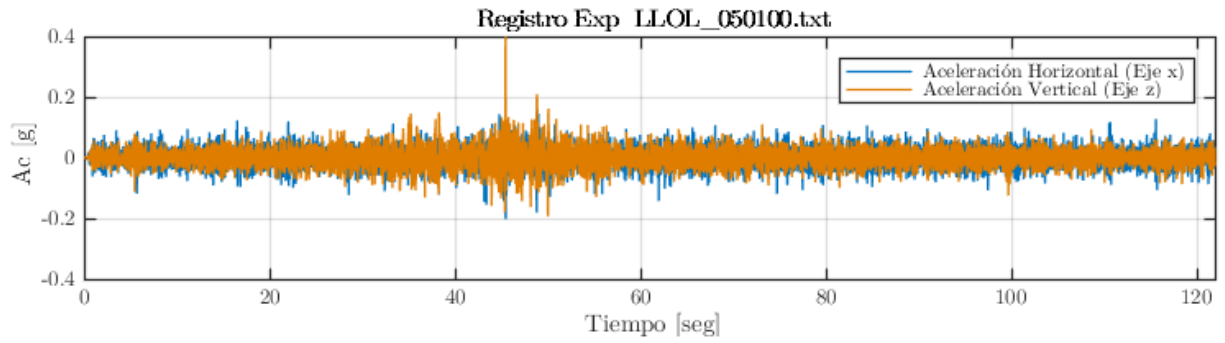


Figura 4-20: Registros experimentales obtenidos a partir de la mesa MOOG asociados al terremoto de Llolleo 2010.

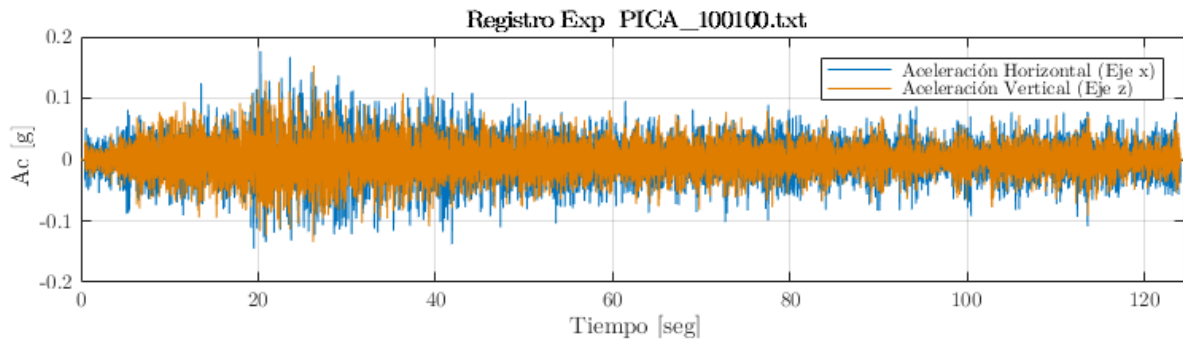
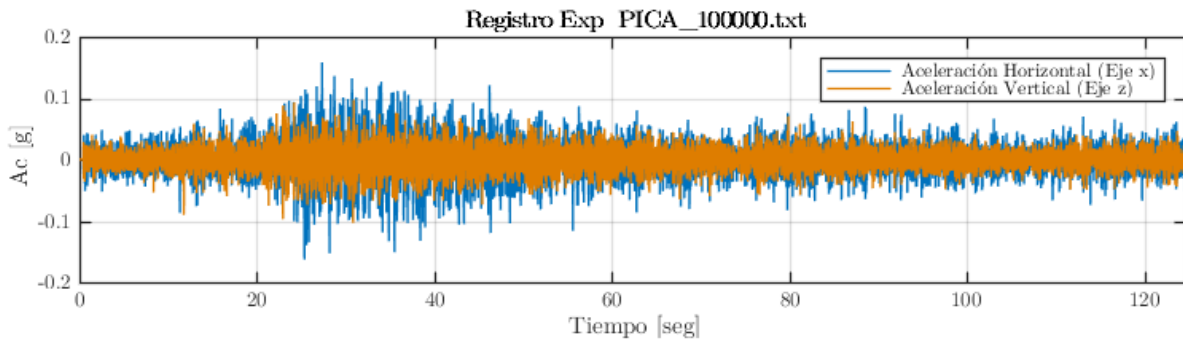


Figura 4-21: Registros experimentales obtenidos a partir de la mesa MOOG asociados al terremoto de Pica 2005.

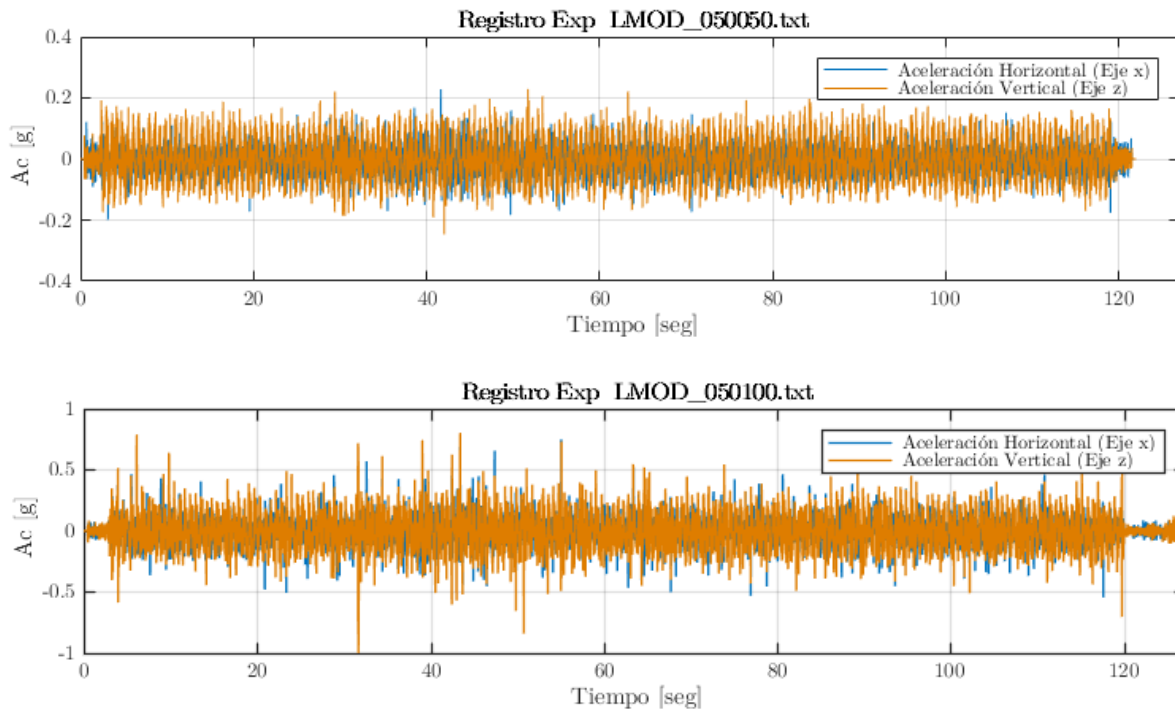


Figura 4-22: Registros experimentales obtenidos a partir de la mesa MOOG asociados al terremoto de Lolleo 2010, modificado.

4.6 Determinación de parámetros modales de la estructura.

4.6.1 Métodos de Análisis

Para determinar parámetros modales de la estructura, se emplea la definición de grados de libertad asociados a su movimiento horizontal según se señala en la Figura 4-3, donde cada nivel es enumerado de abajo hacia arriba, por lo que el primer grado de libertad corresponde al desplazamiento del sexto nivel (superior), mientras que el último corresponde al desplazamiento del primer nivel (inferior).

Se realizan mediciones iniciales de la estructura sin sistema de disipación, correspondientes a ensayos del tipo pull-back y sísmicos horizontales con la finalidad de determinar las propiedades dinámicas de la estructura (frecuencias naturales, tasas de amortiguamiento equivalentes y formas modales) empleando diferentes métodos de identificación, como Ibrahim (Ibrahim et al., 1977) (para ensayos tipo pull-back) y DSI (Deterministic-Stochastic Subspace Identification) (Van Overschee et al., 1996).

A continuación, se mencionan y describen los métodos utilizados.

El método de Ibrahim en el dominio del tiempo (ITD) (Ibrahim et al., 1977), a diferencia de algoritmos que trabajan en el dominio de frecuencias, utiliza la respuesta a través del tiempo. Estos algoritmos ajustan los datos a la función de respuesta a un impulso, es decir, trabaja mediante excitaciones externas tipo “pullback” como entrada. Mediante el uso de este método es posible obtener la frecuencia de cada modo junto con las tasas de amortiguamiento de la estructura, mediante la estimación de las características dinámicas de ésta. Este método considera sus múltiples grados de libertad en términos de sus formas modales.

El método de identificación Deterministic-Stochastic Subspace Identification DSI corresponde a un método espacio estado, que trabaja en tiempo discreto, desarrollado por Van Overschee & De Moor (Van Overschee et al., 1996). Permite obtener las propiedades dinámicas de una estructura a partir de datos de entrada y salida conocidas, asumiendo un comportamiento lineal invariante en el tiempo, es decir, no considerar una pérdida de rigidez de la estructura. De manera que su frecuencia, razones de amortiguamientos y formas modales permanecen constantes.

Como método de identificación en tiempo-frecuencia se utilizan espectrogramas, herramienta que trabaja en el espacio tiempo-frecuencia de una señal, estableciendo un análisis del contenido de frecuencia por medio de la distribución de energía por pequeñas ventanas de tiempo. Entrega representaciones gráficas de la amplitud del espectro de potencia (PSD) en función del tiempo y la frecuencia, donde amplitudes mayores indican mayor contenido de energía. Por otro lado, el espectro de potencia corresponde al valor cuadrático de la transformada de Fourier de una pequeña ventana de tiempo de la señal. Los resultados en espectrogramas de este trabajo poseen a la izquierda del recuadro el espectro de potencia, mientras que la señal analizada se presenta en el recuadro superior. Detalles y metodología de esta herramienta se encuentra en el trabajo de F. J. Hernández (2009).

Para realizar un análisis espectral, se utiliza la Función de Transferencia por pequeñas ventanas de tiempo (STTF), método que considera una relación espectral entre una determinada señal de entrada y salida, es decir, logra analizar la amplificación de outputs dado un cierto input. Pablo Díaz (2018) detalla en su trabajo las ventajas del método, en contraste con el espectrograma: La función de transferencia es independiente de la potencia local de la señal de entrada, es decir se normaliza respecto a la potencia del input. Luego, el espectrograma está fuertemente influenciado por la señal de entrada, que estará siempre presente en las aceleraciones totales y no guarda relación con la respuesta estructural. Finalmente, debido a que la función de transferencia por pequeñas ventanas se puede relacionar a diversos inputs, permite analizar las frecuencias predominantes de la estructura al analizar la variación de frecuencias predominantes de la estructura relativas ya sea al nivel basal o al nivel del sistema de aislación.

4.6.2 Parámetros Modales de la Estructura

Para llevar a cabo la determinación de parámetros mediante el método de Ibrahim, se aplican desplazamientos iniciales a cada nivel de la estructura para que posteriormente esta oscile libremente. Con el fin de identificar modos asociados a altas frecuencias es que se realizan diferentes ensayos tipo pull-back contemplando diferentes configuraciones de formación inicial.

La Figura 4-23 muestra el diagrama de estabilidad que se obtiene utilizando el método DSI a partir de los datos obtenidos para el registro “LLOL_050000_0.txt”

(tomando como input el sensor que registra la aceleración en la base de la estructura, y como output los seis sensores ubicado en cada uno de los niveles de la misma). El diagrama de estabilidad considera un criterio de 4% para similitud de frecuencias, 5% para tasas de amortiguamiento y de 5% para comparación de formas modales según el criterio MAC (Pastor et al., 2012). Adicionalmente se incluye una tabla en que se resume las frecuencias identificadas y la tasa de amortiguamiento promedio para cada modo identificado. Junto a esto se añade la desviación estándar (σ) de su estimación a partir de órdenes del modelo variadas (orden de 2 a 120) tanto para la frecuencia (en la segunda columna) como para la tasa de amortiguamiento (cuarta columna), y el número de coincidencias (N) en base a los criterios de similitud, donde se analiza la estabilidad de los parámetros dinámicas al variar el orden del sistema.

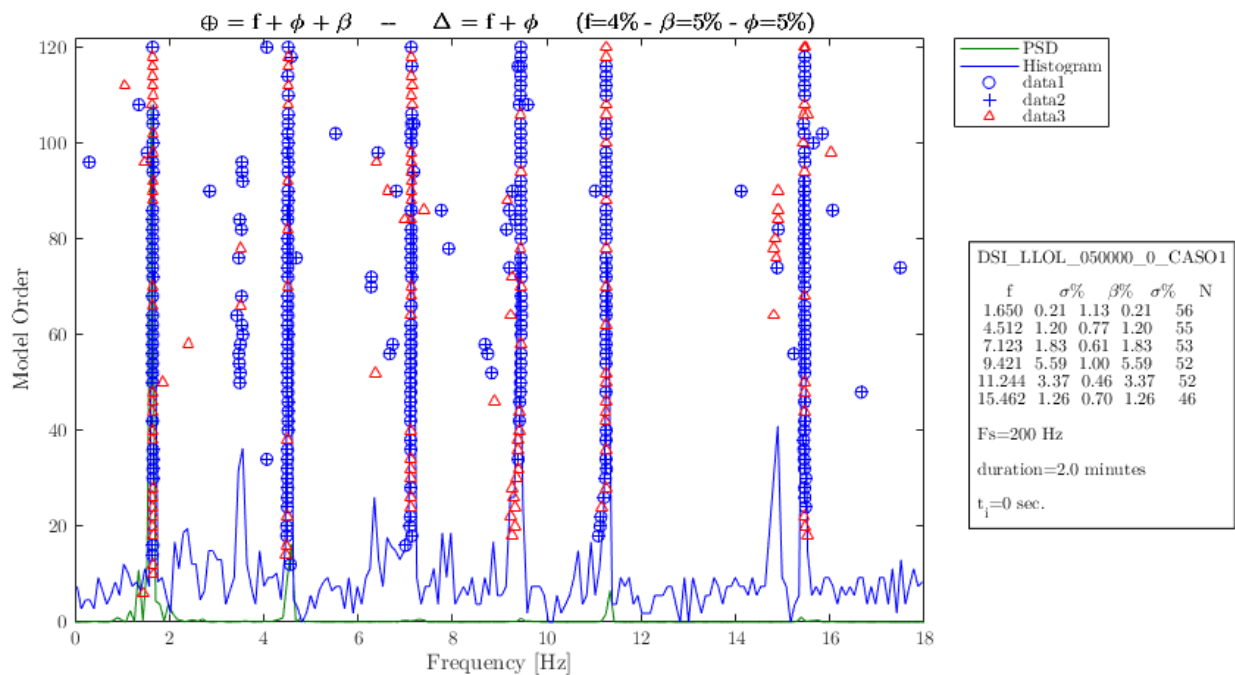


Figura 4-23: Resultados DSI para respuesta “LLOL_050000_0.txt”.

En la Tabla 4-10, se resume las frecuencias naturales, periodos naturales y tasas de amortiguamiento asociada a cada modo estructural obtenidas a partir del método DSI para el registro “LLOL_050000_0.txt”.

Tabla 4-10: Tabla resultado DSI para respuesta “LLOL_050000_0.txt”.

f [Hz]	T [seg]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N [-]
1.650	0.060	0.21	1.13	0.21	56
4.512	0.222	1.20	0.77	1.20	55
7.123	0.140	1.83	0.61	1.83	53
9.421	0.106	5.59	1.00	5.59	52
11.244	0.089	3.37	0.46	3.37	52
15.462	0.065	1.26	0.70	1.26	46

La Figura 4-24 muestra las propiedades dinámicas (periodos naturales, tasas de amortiguamiento y formas modales) que se obtiene al utilizar el método DSI al registro “LLOL_050000_0.txt”, obteniendo la frecuencia fundamental como la de cada modo de vibrar, el amortiguamiento, y la matriz de formas modales.

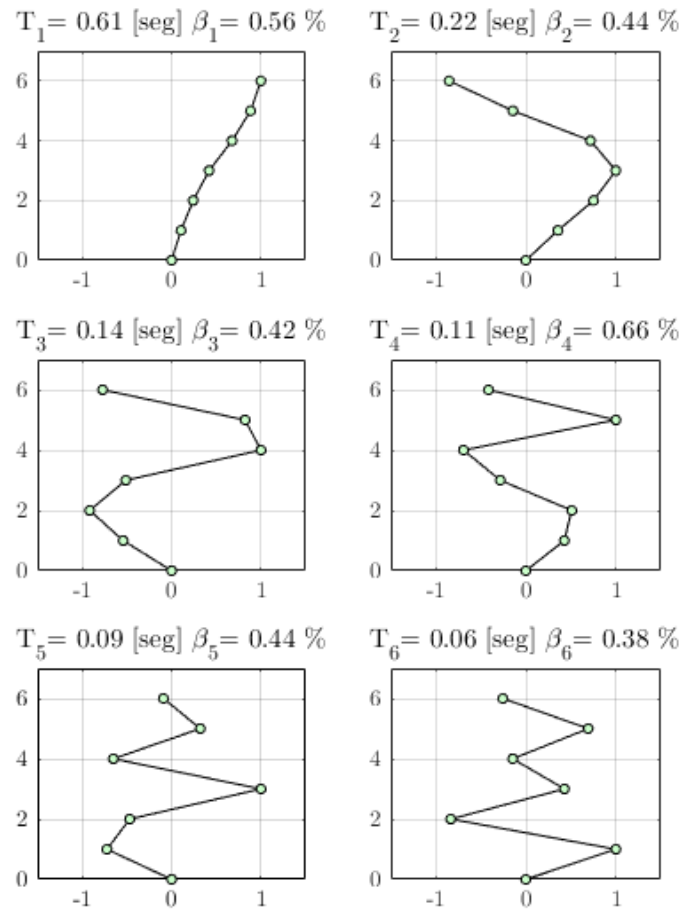


Figura 4-24: Formas de vibrar, frecuencias y amortiguamiento de la estructura.

Luego, la matriz de formas modales se describe a continuación,

$$[\phi] = \begin{bmatrix} 1.000 & -0.854 & -0.781 & -0.402 & -0.084 & -0.021 \\ 0.892 & -0.139 & 0.864 & 1.000 & 0.310 & 0.149 \\ 0.671 & 0.716 & 1.000 & -0.690 & -0.635 & -0.111 \\ 0.415 & 1.000 & -0.513 & -0.270 & 1.000 & 0.337 \\ 0.239 & 0.755 & -0.923 & 0.500 & -0.476 & -0.891 \\ 0.098 & 0.369 & -0.534 & 0.467 & -0.711 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

A partir del pesaje de cada piso de la estructura (Tabla 4-2), la matriz de masa de la estructura es:

$$[M_p] = \begin{bmatrix} 30.61 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25.75 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 26.60 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 25.76 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 25.83 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 26.12 \end{bmatrix} [\text{kgf}] \quad (4.2)$$

A partir de estos resultados (frecuencias naturales y formas modales de todos los modos de la estructura) y de la matriz de masa (obtenida del pesaje de los componentes), es posible estimar la matriz de rigidez de la estructura mediante la expresión (4.3), relacionada al problema de valores y vectores propios de un sistema dinámico de múltiples grados de libertad.

$$[K_p] = [\phi][\omega]^2[\phi]^{-1}[M_p] \quad (4.3)$$

En base a la ecuación (4.3), la matriz de rigidez es igual a:

$$[K_p] = \begin{bmatrix} 27320 & -23400 & 920 & -400 & 110 & -420 \\ -32620 & 53410 & -28290 & 3970 & -9710 & 11730 \\ 540 & -26880 & 58030 & -31080 & 2440 & -2000 \\ -120 & 1110 & -31010 & 76780 & -49130 & 2140 \\ -1560 & 1240 & 440 & -51160 & 121490 & -74800 \\ 2170 & -1580 & 680 & -120 & -68900 & 164560 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{N} \\ \text{m} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Se puede observar que la matriz de rigidez obtenida no es exactamente simétrica. De igual forma, se puede observar que existen términos no nulos en algunos términos cruzados en que se esperaría que fuesen nulos. Sin embargo, la matriz tiende a ser simétrica y los valores no nulos (y que debieran ser nulos) son bajos comparado con los términos que están en la diagonal de la matriz de rigidez. Cabe mencionar que una forma simple para hacer que esta matriz sea simétrica sería promediar está con su traspuesta sin embargo al utilizar esa matriz, se obtienen propiedades dinámicas (frecuencias naturales y formales modales) que no coinciden exactamente con los valores estimados (cercaos). Se entiende que la matriz de rigidez no es simétrica debido a errores en la estimación de los parámetros dinámicos intrínsecos de mediciones experimentales (errores de medición, efectos de precisión en el equipo y efectos de ruido externo y en el sistema de medición) y del método empleado (método DSI) además de que los modos pueden ser en algún grado no clásicos y otros efectos no considerados como efectos de 2º orden asociado a posibles grandes deformaciones.

4.6.3 Parámetros Modales del DMS

Para determinar los parámetros óptimos que debe poseer el DMS, se consideran las expresiones presentadas en la sección 3.3 y las propiedades de la estructura principal. Dichas expresiones entregan los parámetros óptimos de diseño para un DMS amortiguado de un grado de libertad, cuyo fin es disminuir la respuesta de la estructura al ser excitada.

En base a la expresión (3.54) se calcula el valor óptimo que debe tener la razón de frecuencias $f|_{opt}$, valor que entrega la razón entre la frecuencia del dispositivo y la del primer modo de la estructura. Junto con este parámetro, se calcula el valor óptimo de la

razón de amortiguamiento crítico del dispositivo $\xi_d|_{OPT}$ a partir de la expresión (3.55). El valor de $f|_{OPT}$ es definido por la masa del DMS, la masa total de la estructura y la tasa de amortiguamiento de su primer modo, mientras que $\xi_d|_{OPT}$ depende únicamente de la razón de masas.

Luego, utilizando los valores presentados en las secciones 4.2 y 4.3, es posible obtener el valor para $f|_{OPT}$ y $\xi_d|_{OPT}$, y por lo tanto la frecuencia óptima del dispositivo $\omega_d|_{OPT}$.

Tabla 4-11: Valor óptimo para la razón de frecuencias, razón de amortiguamiento, frecuencia y periodo del DMS.

$f _{OPT}$	$\xi_d _{OPT}$ [%]	$\omega_d _{OPT}$ [Hz]	$T_d _{OPT}$ [seg]
0.9457	10.19	1.560	0.641

Una vez determinados los parámetros de diseño óptimos del dispositivo, se desarrollan rutinas en MATLAB para modelar la respuesta que presenta la estructura (sin DMS) en contraste con su respuesta al poseer instalado el dispositivo, ante el mismo registro (unidireccional, horizontal). Para esto, se modela la estructura como un sistema de seis grados de libertad, considerando su matriz de masa y rigidez presentadas en la sección 4.2., y utilizando rutinas de resolución de sistemas de varios grados de libertad basados en el método de Newmark (Newmark, 1959). Por otra parte, el DMS es modelado resolviendo en forma numérica la ecuación de movimiento de la sección 3.4.3, obteniendo una solución mediante el Método Newton-Raphson especificado en la sección 4.7.1, considerando como entrada el movimiento del sexto nivel de la estructura (posición donde se instala el DMS). Sin embargo, el dispositivo se modela para diferentes tasas de amortiguamiento y periodo, los cuales varían en torno a los valores óptimos $T_d|_{OPT}$ y $\xi_d|_{OPT}$ calculados. Esto genera una matriz de ensayos para cada configuración de T_d y ξ_d , que se traduce en un gráfico 3D que define la zona en que el dispositivo trabaja de forma óptima reduciendo las demandas de la respuesta de la estructura, como aceleración máxima del nivel superior, corte basal, y desplazamiento (drift) del primer nivel.

A continuación, se presentan los resultados para el registro “LLOL07050000” (ver sección 4.5) donde en el plano x-y se obtiene la matriz para cada configuración de periodo y razón de amortiguamiento. Luego, la altura de cada punto de la figura (valor del eje Z) presenta la razón entre la aceleración máxima del nivel superior de la estructura con el DMS instalado (A_c'), cuyas características quedan determinadas por su posición en el plano x-y, y la respuesta al no implementar el DMS en el sistema (A_c):

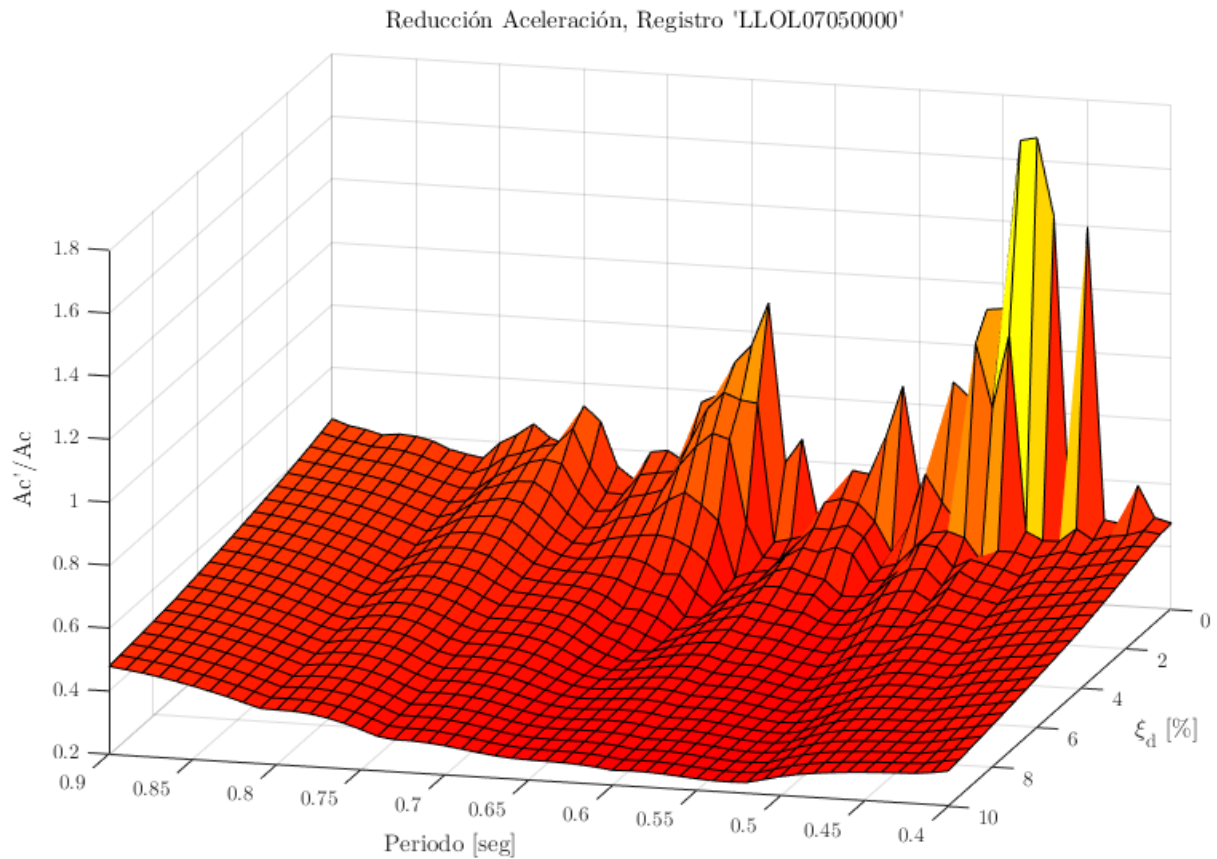


Figura 4-25: Razón de Reducción de Aceleración, Registro ‘LLOL07050000’.

A continuación, se presenta la gráfica para la razón entre el desplazamiento máximo del primer nivel de la estructura con el DMS instalado (Drift'), y la respuesta al no implementar el DMS en el sistema (Drift). Esto, para cada configuración del dispositivo, utilizando el mismo registro. Se considera la diferencia entre el primer nivel y la base, debido a que en laboratorio este factor presenta valores mayores a los de los niveles superiores.

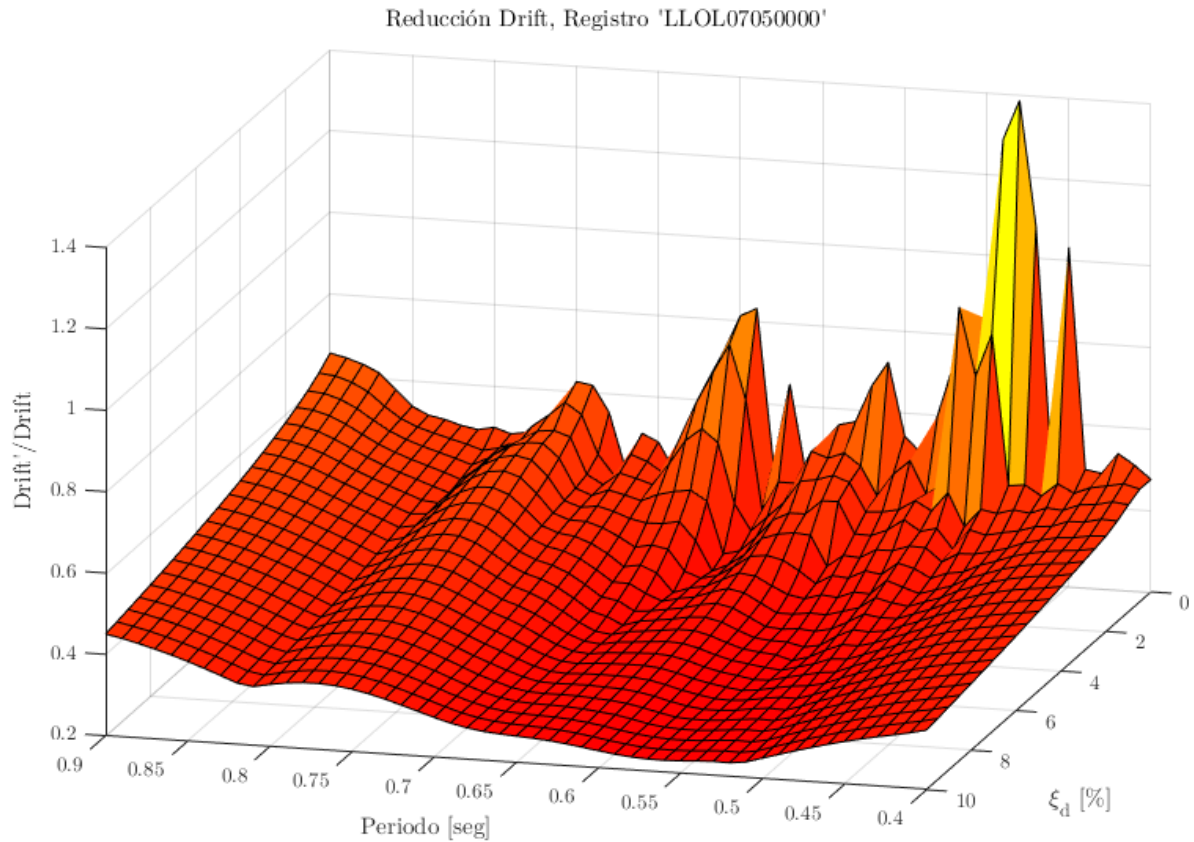


Figura 4-26: Razón de Reducción de Drift, Registro 'LLOL07050000'.

A continuación, se presenta la gráfica para la razón entre el corte basal máximo del primer nivel de la estructura con el DMS instalado (Q_b'), y la respuesta al no implementar el DMS en el sistema (Q_b). Esto, para cada configuración del dispositivo, utilizando el mismo registro:

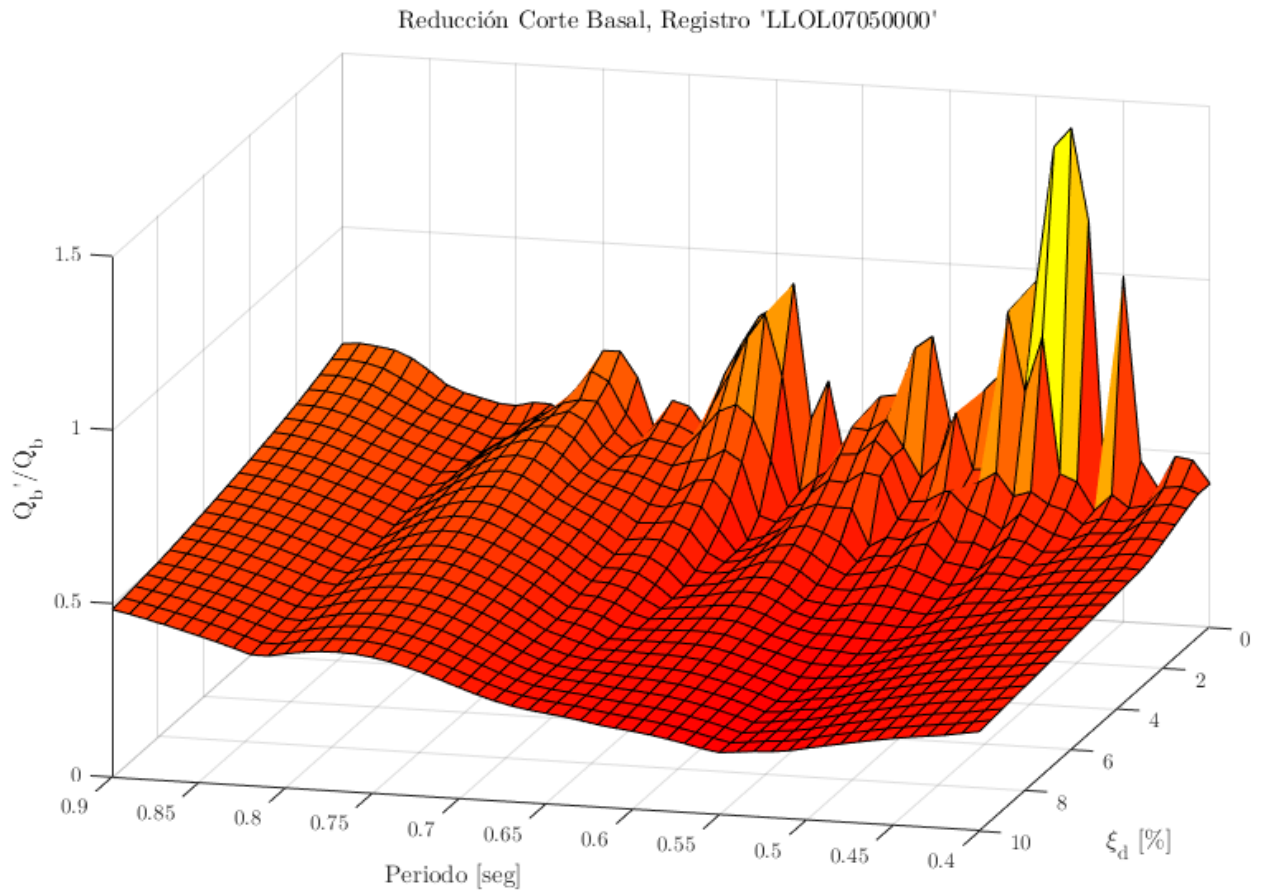


Figura 4-27: Razón de Reducción de Corte Basal, Registro 'LLOL07050000'.

En la sección Anexos se añaden las gráficas para la respuesta de aceleración, corte basal y desplazamiento del primer nivel, de los registros 'KOBEO4100000' y 'PICA06100000'.

En base a los resultados presentados, dependiendo del registro a ensayar, es posible establecer una región en la cual se poseen distintas combinaciones de periodos y tasas de amortiguamiento que permiten reducir la respuesta la estructura, de manera que el problema a resolver no se restringe únicamente a una combinación. Por otra parte, identificar una región óptima de parámetros es favorable al momento de escoger la frecuencia, ya que no se cuenta con un mecanismo que controle con precisión la tasa de amortiguamiento con la que trabajará el dispositivo. Si bien los límites de la región óptima de parámetros del DMS varía dependiendo del registro ensayado, en base a los distintos resultados obtenidos es posible llegar a una región en común, en torno a los parámetros presentados en la Tabla 4-11. Al analizar los tres registros ensayados, es posible observar una mayor reducción de aceleración en el área cercana a la franja en que el dispositivo posee el período óptimo definido en la Tabla 4-11. Por otra parte, dentro de la región definida anteriormente, la reducción aumenta a medida que el amortiguamiento tiende a su valor óptimo, es decir a medida que aumenta. Sin embargo, para todo el rango de períodos, al poseer un amortiguamiento bajo (entre un 0 y 2%) el rendimiento del dispositivo varía considerablemente, generando incluso una amplificación en la respuesta de la estructura.

En laboratorio, se instala el DMS en una superficie rígida, donde a través de un proceso iterativo se modifica la posición de su masa principal. Con esto se busca configurar el dispositivo para que adquiera la frecuencia óptima señalada en la Tabla 4-11.

Se instala en el dispositivo un acelerómetro (sensor A12, ver sección 4.4.1) que registra la aceleración que posee al dejarlo oscilar libremente. A través de una rutina generada en MATLAB y mediante el uso de rutinas que utilizan el método PSD (ver sección 4.6.1) es posible obtener el periodo del péndulo.

En caso de que el dispositivo no posea la frecuencia buscada, se considera la frecuencia medida anteriormente para acortar (en caso de que la frecuencia deseada sea mayor) o extender (en caso de que la frecuencia deseada sea menor) el radio de giro de la masa (Figura 4-3), para posteriormente realizar el análisis del registro descrito anteriormente. Este proceso se repite hasta alcanzar una diferencia mínima, entre el periodo experimental y el período óptimo $\omega_d|_{OPT}$.

Los resultados obtenidos a partir de la iteración final del ensayo de ajuste del dispositivo de presentan a continuación.

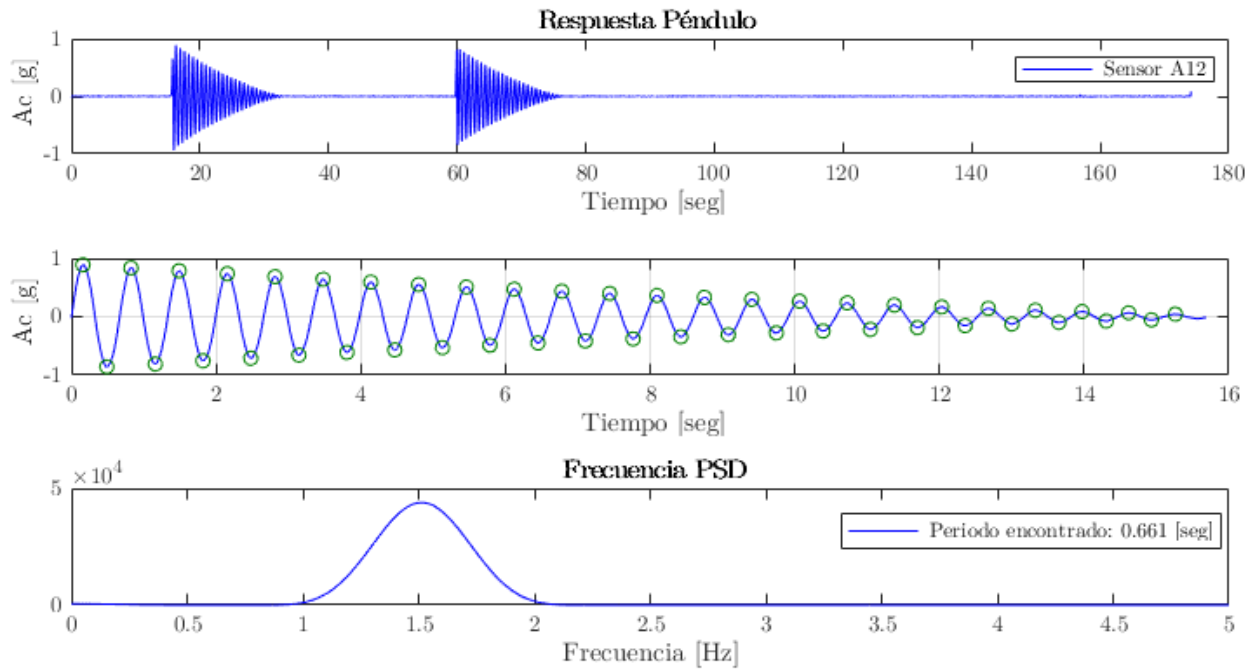


Figura 4-28: Resultados de iteración final del ensayo de ajuste del DMS.

Se observa que el dispositivo posee un periodo de 0.661 seg, es decir una frecuencia de 1.513 Hz. Al comparar la frecuencia experimental con la frecuencia óptima $\omega_d|_{OPT}$ (cuyo valor es 1.560 Hz, por lo que presenta un error porcentual de un 3%), se considera que la diferencia es aceptable y que el dispositivo se encuentra ajustado para ser instalado en la estructura.

Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos al implementar el método DSI en el sistema, respuesta obtenida del registro "LLOL_050000_1" (ensayo del registro "LLOL07050000" en la estructura con DMS instalado, ver sección 4.5.2). De esta manera se identifica la frecuencia de cada modo de vibrar de la estructura junto con la frecuencia que posee el dispositivo, que corresponde a la primera frecuencia identificada que aparece en la tabla de la Figura 4-29 (con una frecuencia natural de 1.315 Hz y una tasa de amortiguamiento de 3.23%). Por otra parte, se observa que los otros modos identificados son similares a los obtenidos para la estructura sin el dispositivo (Figura 4-23), pero con frecuencias levemente más altas y con una tasa de amortiguamiento asociada al modo fundamental mayor (i.e., se incrementa de 1.13% a 2.00 %).

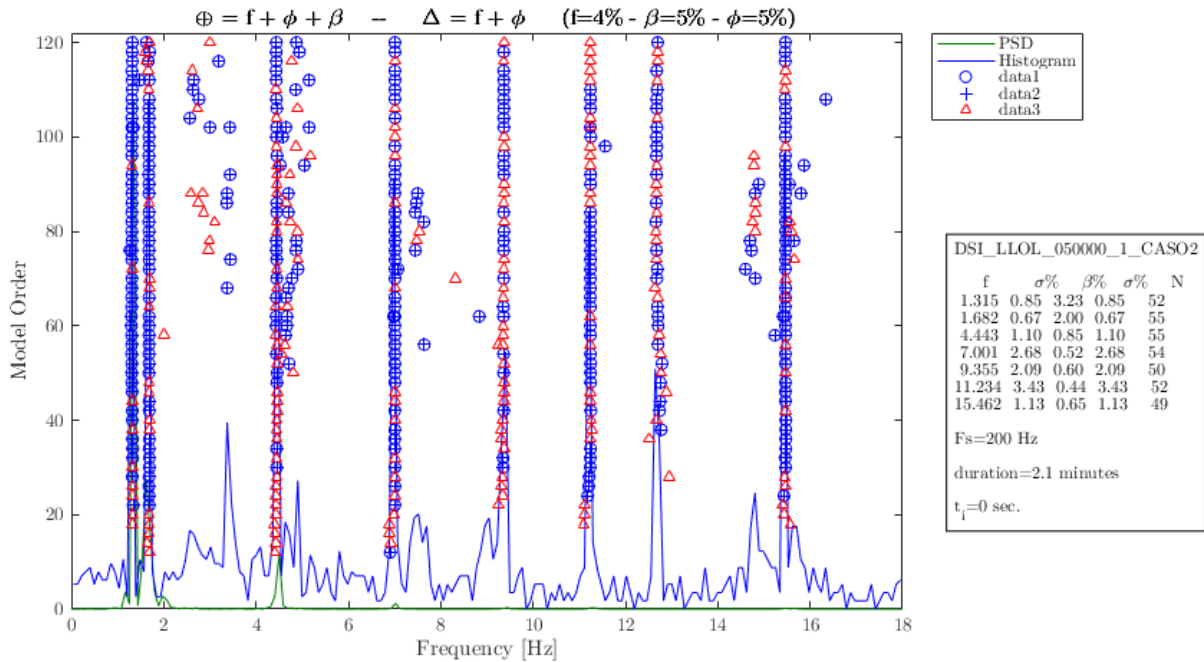


Figura 4-29: Resultados DSI para registro “LLOL_050000_1.txt”.

Se utiliza Función de Transferencia por pequeñas ventanas utilizando una metodología autoregresiva que relaciona la respuesta con múltiples inputs (ARX), realizando el análisis espectral del dispositivo considerando dos inputs: La componente horizontal y vertical de aceleraciones registradas en el nivel superior de la estructura. Se considera el registro “LLOL_050050_1” (registro que posee aceleración horizontal y vertical, ver sección 4.5.2), con el fin de identificar la frecuencia que predomina al inducir ambas excitaciones. De esta manera, se observa una frecuencia del dispositivo que no varía significativamente con el tiempo durante del ensayo, que corresponde a 1.315 Hz. Sin embargo, al igual que en los resultados presentados en la Figura 4-29 se observa que la frecuencia disminuye aproximadamente un 13% en comparación con los ensayos preliminares de ajuste del dispositivo (que fue de 1.515 Hz).

Cuando se computa la función de transferencia asociada a la respuesta del dispositivo con relación a la entrada vertical que es medida en el piso superior se observa una segunda frecuencia predominante en torno a los 4.7 Hz que se relacionaría a la frecuencia natural de la barra roscada que sostiene al dispositivo. Según esta representación se observaría que tanto la componente vertical y horizontal tienen un efecto

importante en la respuesta del dispositivo al tener valores de la función de transferencia comparables en magnitud.

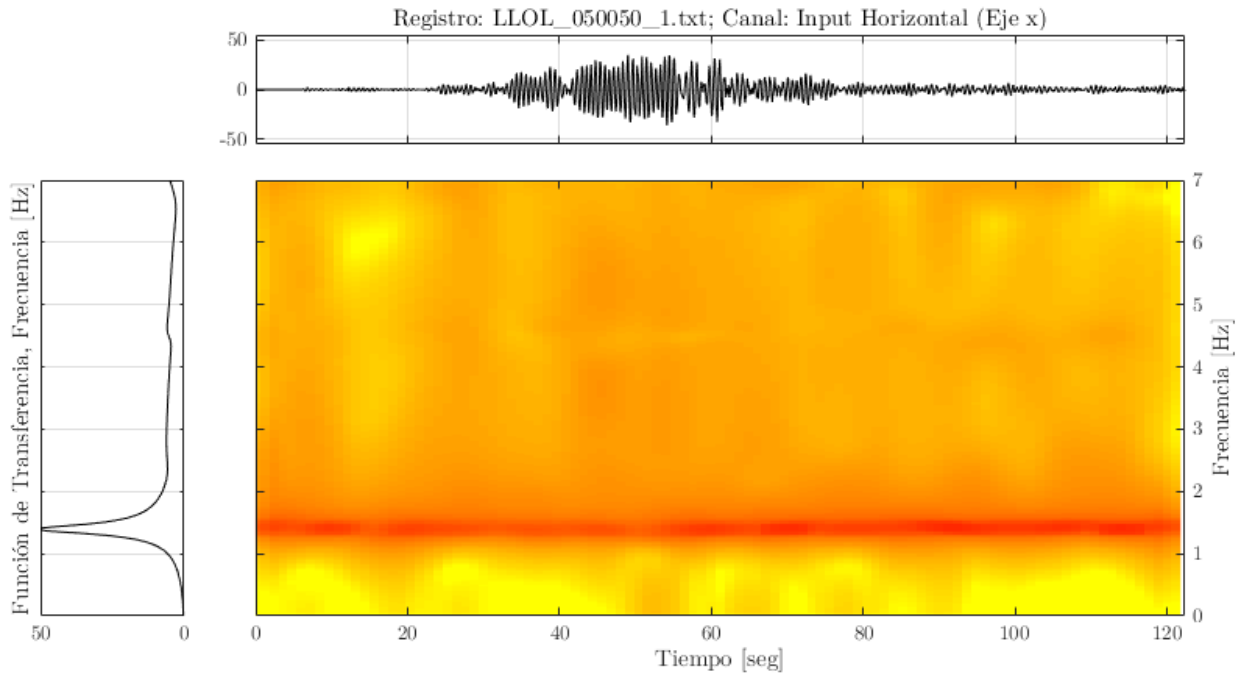


Figura 4-30: Función Transferencia de DMS, registro “LLOL_050050_1.txt”, Input Horizontal.

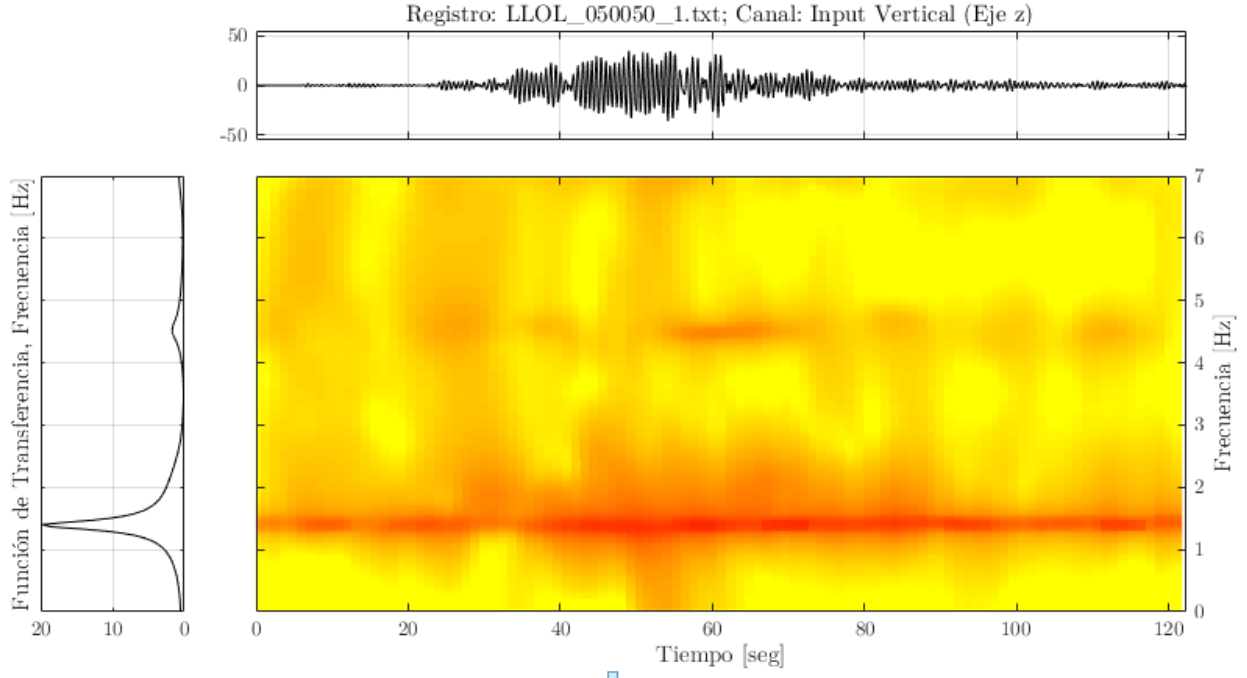


Figura 4-31: Función Transferencia de DMS, registro “LLOL_050050_1.txt”, Input Vertical.

4.7 Desarrollo modelo teórico de la estructura

Con el fin de poder estudiar de manera teórica el comportamiento de la estructura, se programa un modelo teórico de ésta que busca replicar de la manera más exacta posible la respuesta que tendría en cada configuración de ensayo. De esta manera se obtiene una aproximación de parámetros dinámicos no lineales, que se asociarían a la variación que presenta la disipación a través tiempo (que tiende a ser mayor a medida que las demandas son mayores, pero que al mismo tiempo muestran un alto grado de aleatoriedad). Este proceso de modelamiento se realiza con la ayuda de un programa computacional desarrollado en MATLAB implementando métodos de ajuste del tipo Newton-Raphson (Tjalling, 1995) junto con el Método de Newmark (Newmark, 1959).

Para poder obtener la respuesta teórica de este caso de estudio, es necesario modelar la estructura de 6 niveles en conjunto con un modelo que replique el comportamiento del DMS. A partir de la respuesta calibrada de este segundo modelo se determinan las fuerzas horizontales que el DMS aplicará a la estructura, para luego generar un modelo de la estructura para verificar su comportamiento sísmico, por lo que la fidelidad de esta segunda parte del problema será fundamental para evaluar la eficiencia de los DMS en mitigar la respuesta del sistema en su totalidad.

4.7.1 Modelo DMS tipo péndulo

El objetivo de esta etapa del trabajo es poder calibrar y determinar la aceleración, velocidad, desplazamiento y amortiguamiento que poseerá el DMS a través del tiempo, en función de la aceleración que lo excita. Estos parámetros se obtienen con la finalidad de modelar la fuerza que ejercerá el dispositivo sobre la estructura. En este caso, debido a la posición en la que el dispositivo se instaló dentro del sistema, los inputs o datos de entrada serán las aceleraciones que posea el último nivel de la estructura (en horizontal y vertical). Es decir, se obtiene a partir de sensores instalados en una barra transversal del piso superior tal como se indica en la Figura 4-9 (sensor A3).

Para validar el modelo, se consideran mediciones efectuadas previamente en un ensayo de éste junto a la estructura en laboratorio. De este ensayo se registra el input de aceleraciones que posee el DMS; sus características físicas, como la distancia entre la masa

y el eje, peso de la masa central, dimensiones geométricas y el registro de aceleraciones que se obtuvo al instalar en él un acelerómetro sobre la masa adherida al péndulo compuesto. Para ejemplificar este proceso, se considerará el ensayo realizado utilizando el sismo “LLOL_050050_1” (ver sección 4.5.2), cuyo input (aceleración nivel superior de la estructura) y output (aceleración del DMS) se muestran a continuación.

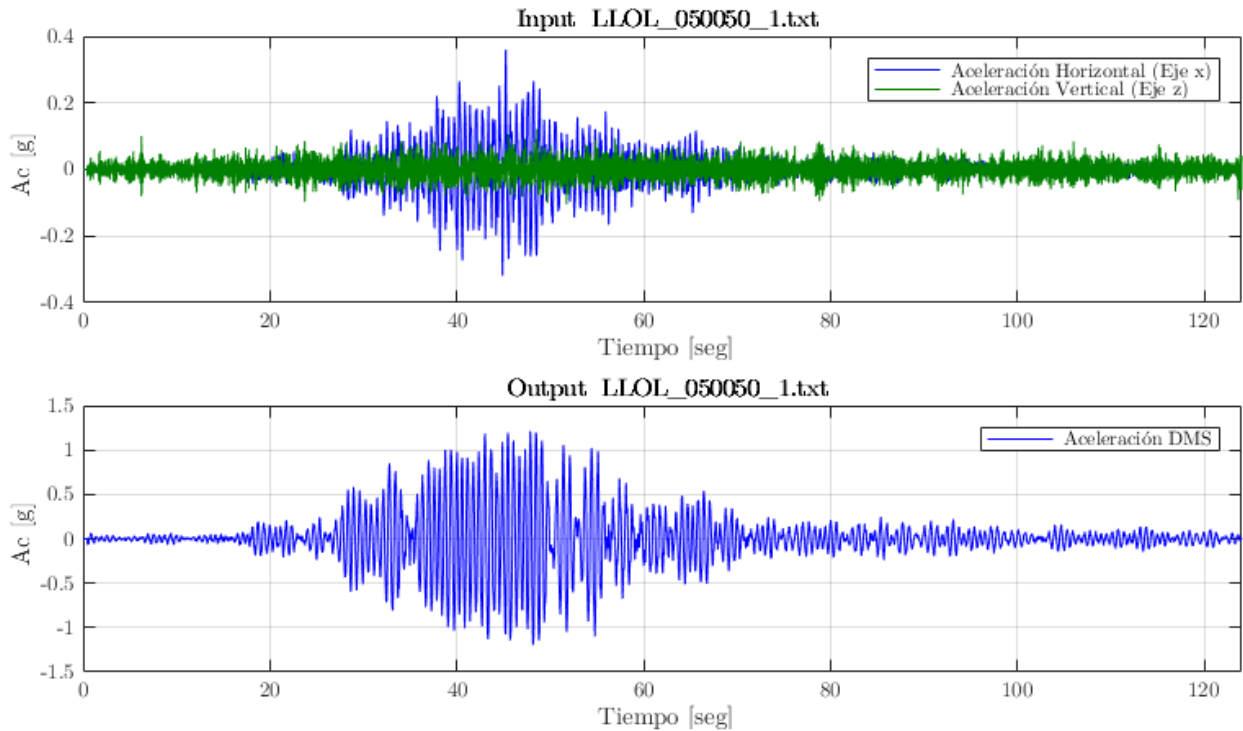


Figura 4-32: Input y Outputs para DMS en “LLOL_050050_1”.

Para obtener una correcta posición del DMS, en este caso su ángulo de giro, el registro de aceleraciones obtenido es ajustado. Para obtener la aceleración angular relativa del dispositivo ($\ddot{\theta}$) con respecto a la estructura, se considera su radio de giro, la aceleración total medida por el acelerómetro, y aceleración horizontal y vertical de la superficie a la que fue fijado (obtenidas a través de los sensores ubicados en el sexto nivel de la estructura). De manera que se obtiene el siguiente diagrama de aceleraciones:

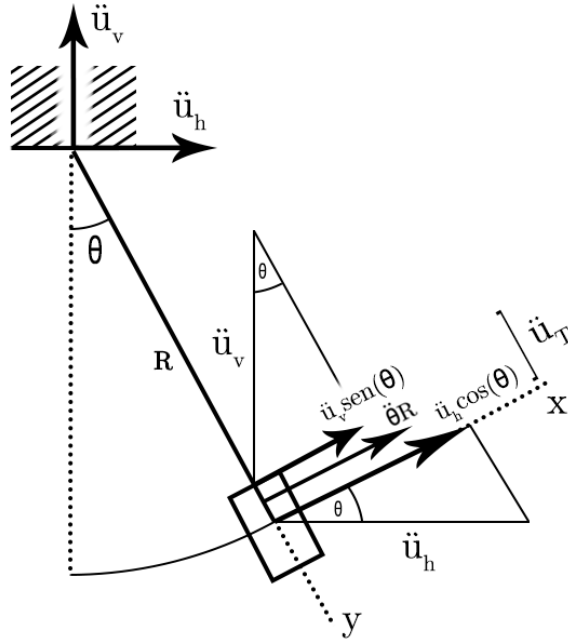


Figura 4-33: Diagrama de aceleraciones del péndulo.

Donde \ddot{u}_T corresponde a la aceleración total que posee el dispositivo al oscilar (medida por el acelerómetro), \ddot{u}_h y \ddot{u}_v son respectivamente la aceleración horizontal y vertical que posee el sexto nivel de la estructura, y $\ddot{\theta}R$ corresponde a la aceleración relativa que posee el péndulo con respecto a la estructura. Mientras, $\ddot{\theta}$ corresponde a la aceleración angular y R es el radio de giro del sensor instalado en el dispositivo. De esta manera, al realizar una sumatoria de aceleraciones en el eje X de la Figura 4-33, se obtiene la siguiente expresión:

$$\ddot{u}_T = \ddot{\theta}R + \ddot{u}_h \cos(\theta) + \ddot{u}_v \sin(\theta) \quad (4.5)$$

$$0 = -\ddot{u}_T + \ddot{\theta}R + \ddot{u}_h \cos(\theta) + \ddot{u}_v \sin(\theta) \quad (4.6)$$

Reordenando los términos, se obtiene la expresión para la aceleración angular:

$$\ddot{\theta} = [\ddot{u}_T - \ddot{u}_h \cos(\theta) - \ddot{u}_v \text{sen}(\theta)] \cdot R^{-1} \quad (4.7)$$

Para obtener el valor de $\ddot{\theta}$ se utiliza el Método Newton-Raphson (Tjalling, 1995), cuyo objetivo es estimar la solución numérica de una ecuación a través de aproximaciones sucesivas a partir de un valor inicial.

El Método Newton-Raphson considera una función $f(x)$ continuamente diferenciable dos veces en un intervalo $[a, b]$. Luego, sea $\bar{x} \in [a, b]$ una aproximación a la raíz p tal que:

$$\begin{cases} f'(\bar{x}) \neq 0 \\ |\bar{x} - p| \rightarrow 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Se considera el polinomio de Taylor de primer grado para $f(x)$ en torno a \bar{x} :

$$f(x) = f(\bar{x}) + (x - \bar{x})f'(\bar{x}) + \frac{(x - \bar{x})^2}{2} f''(c(x)) \quad (4.9)$$

Donde c se encuentra entre x y \bar{x} . Luego, ya que $f(p) = 0$, reemplazando $x = p$ se obtiene:

$$0 = f(\bar{x}) + (p - \bar{x})f'(\bar{x}) + \frac{(p - \bar{x})^2}{2} f''(c(p)) \quad (4.10)$$

El método se deriva suponiendo que el término que contiene a $(p - \bar{x})^2$ es despreciable y que:

$$0 \approx f(\bar{x}) + (p - \bar{x})f'(\bar{x}) \quad (4.11)$$

$$p \approx \bar{x} - \frac{f(\bar{x})}{f'(\bar{x})} \quad (4.12)$$

De esta manera método implica el generar la sucesión $\{p_n\}$ definida por:

$$p_n = p_{n-1} - \frac{f(p_{n-1})}{f'(p_{n-1})}, \quad n \geq 1 \quad (4.13)$$

En base al Método Newton-Raphson, se desarrolla una rutina en MATLAB haciendo uso de la función ‘FZERO’ (“Root of nonlinear function - MATLAB fzero”, s. f.) y la ecuación (4.6). Dicha función encuentra las raíces de una función no lineal, de manera que itera otorgando distintos valores a $\ddot{\theta}$ para que la expresión converja a un valor nulo. Es decir, se calcula el error de la ecuación de movimiento del péndulo para luego ser optimizada.

Una vez obtenido el vector de valores de $\ddot{\theta}$, es posible estimar el valor de la velocidad angular y el ángulo de giro mediante el Método de Newmark (Newmark, 1959), basado en la variación de la aceleración angular. Este método trabaja con el valor de $\ddot{\theta}$ y el valor del paso siguiente, es decir, a partir de $\ddot{\theta}_n$, $\ddot{\theta}_{n+1}$ y el tiempo entre cada intervalo Δt de 0.005 segundos.

Para esto se considera una condición inicial igual al reposo, donde el valor inicial de $\ddot{\theta}$, $\dot{\theta}$ y θ es igual a cero. Luego, se asume que durante todo el intervalo de tiempo Δt el dispositivo posee una aceleración constante igual al valor del promedio ($\ddot{\theta}_{prom}$) entre $\ddot{\theta}_n$ y $\ddot{\theta}_{n+1}$ (Figura 4-34).

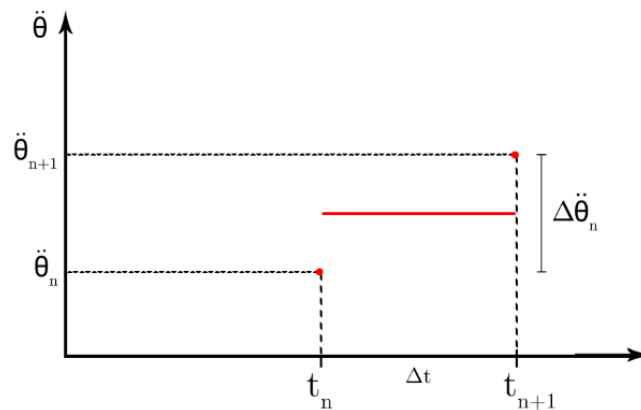


Figura 4-34: Esquema de aceleración angular constante, Método de Newmark.

De esta manera se obtienen las siguientes expresiones:

$$\Delta\ddot{\theta}_n = \ddot{\theta}_{n+1} - \ddot{\theta}_n \quad (4.14)$$

$$\ddot{\theta}_{prom} = \ddot{\theta}_n + \frac{\Delta\ddot{\theta}_n}{2} \quad (4.15)$$

A partir de esto, es posible definir la variación de velocidad angular (ecuación (4.16)), la cual posee un comportamiento lineal durante el intervalo Δt (Figura 4-35).

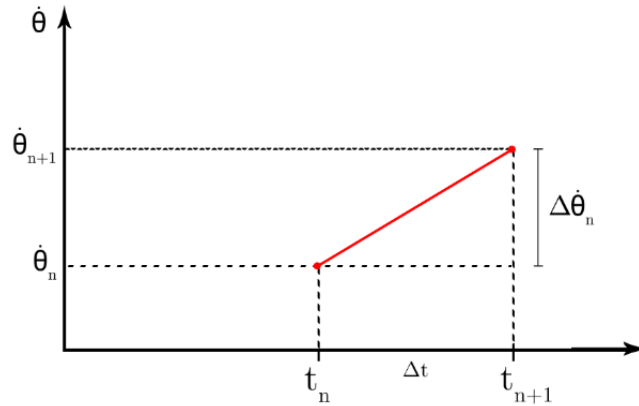


Figura 4-35: Esquema de velocidad angular constante, Método de Newmark.

De esta manera se obtienen las siguientes expresiones:

$$\Delta\dot{\theta}_n = \Delta t \cdot \ddot{\theta}_n + \frac{\Delta t}{2} \Delta\ddot{\theta}_n \quad (4.16)$$

$$\dot{\theta}_{n+1} = \dot{\theta}_n + \Delta\dot{\theta}_n \quad (4.17)$$

Finalmente, se estima la variación del ángulo de giro (ecuación (4.16)), la cual posee un comportamiento exponencial durante el intervalo Δt (Figura 4-36).

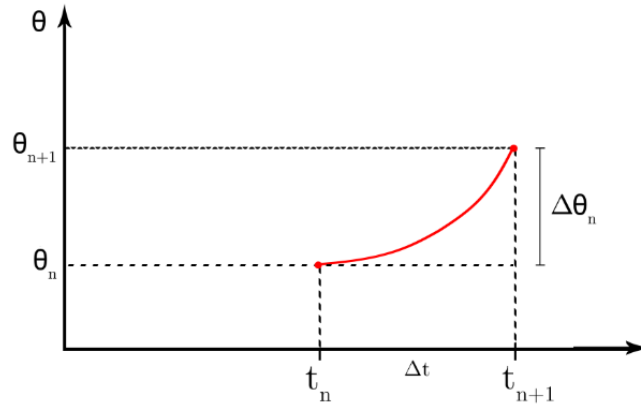


Figura 4-36: Esquema de ángulo de giro exponencial, Método de Newmark.

De esta manera se obtienen las siguientes expresiones:

$$\Delta\theta_n = \frac{\Delta t^2}{2}\ddot{\theta}_n + \frac{\Delta t^2}{4}\Delta\ddot{\theta}_n + \Delta t\dot{\theta}_n \quad (4.18)$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \Delta\theta_n \quad (4.19)$$

De esta manera se obtiene el valor experimental para la aceleración angular ($\ddot{\theta}$), para la velocidad angular ($\dot{\theta}$) y el ángulo de giro (θ) para cada intervalo de tiempo del registro utilizado.

Para desarrollar el modelo teórico se utilizan las ecuaciones presentadas en la sección 3.4.3, específicamente la expresión (3.89) cuya modelación numérica utiliza nuevamente el Método Newton-Raphson (Tjalling, 1995) y considera grandes deformaciones. Junto con la obtención del vector de aceleración angular, se obtienen los valores para la velocidad angular y el radio de giro mediante el uso del Método de Newmark (Newmark, 1959).

De esta manera es posible obtener un modelo preliminar de cómo se comportaría el dispositivo, sin embargo, es necesario ajustar la respuesta teórica en base a la respuesta experimental obtenida en laboratorio (valor de $\ddot{\theta}$ ajustado descrito anteriormente). Para esto se define un factor de ajuste a partir de la razón entre la frecuencia obtenida del ensayo experimental y la teórica del modelo numérico.

Utilizando pequeñas ventanas de tiempo (0.75 seg), y en base al error que posee la ecuación del péndulo, se determina la variación que debe poseer el amortiguamiento en

cada ventana (límite de variación de $\pm 15\%$) junto con la variación que posee el factor de ajuste (límite de variación de $\pm 0.05\%$), que pondera la frecuencia teórica del DMS en cada intervalo de tiempo (por lo que la frecuencia también posee límites de variación de $\pm 0.05\%$). De esta manera, la respuesta del DMS se ajustará a lo obtenido en el paso inicial de cada ventana de tiempo.

Una vez obtenida la respuesta teórica ajustada, se superpone con la obtenida experimentalmente, buscando optimizar el factor NRMSE (Root-mean-square error) que determina la exactitud con que una curva se aproxima a otra, evaluando aceleración, velocidad y desplazamiento. El desfase teórico-experimental se debe en parte a que un dispositivo de estas características posee un amortiguamiento variable a través del tiempo, a causa de la disposición de las partes que lo conforman y la no linealidad de sus propiedades.

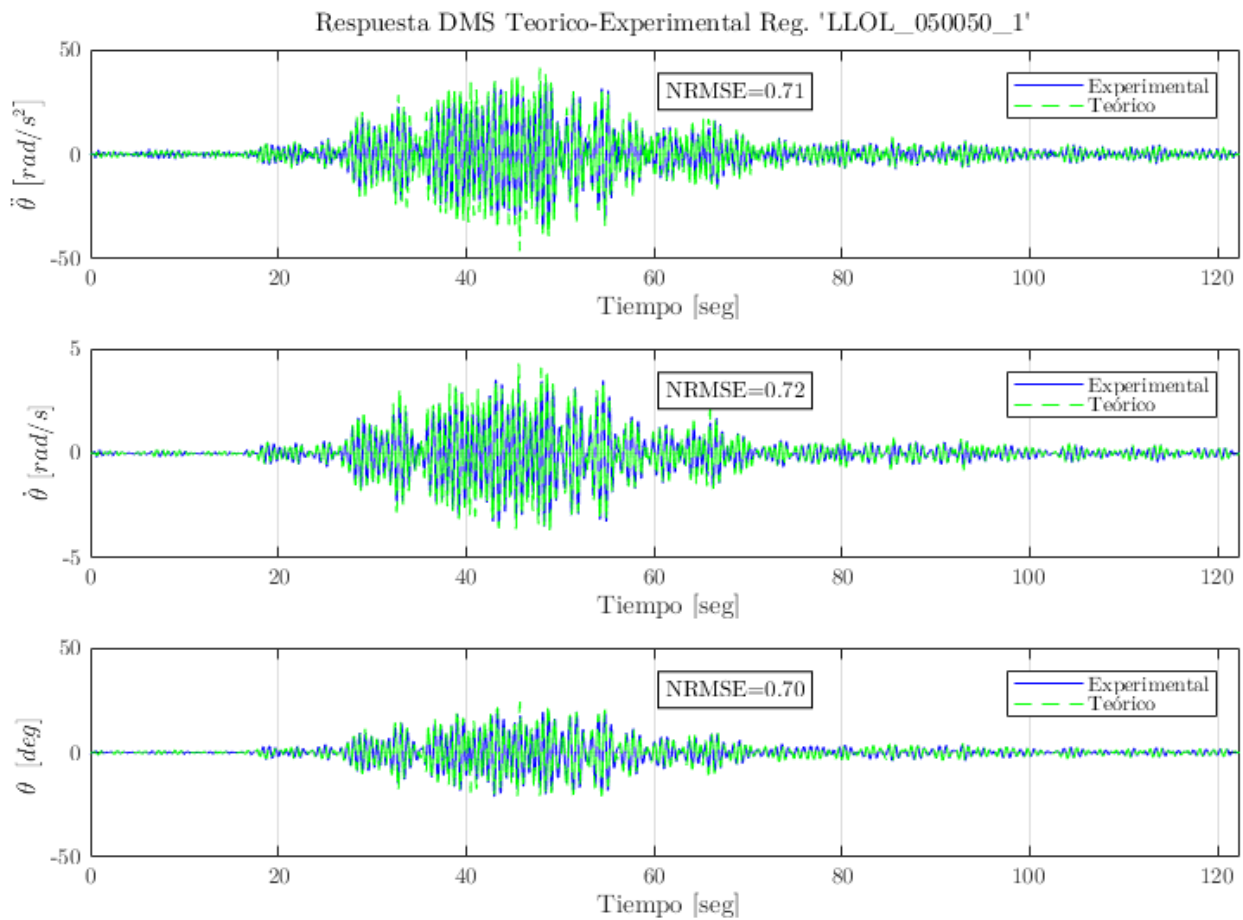


Figura 4-37: Comparación Respuesta Péndulo, mediante factor NRMSE.

Una vez obtenida la variación a través del tiempo del amortiguamiento, frecuencia, la aceleración, velocidad y desplazamiento angular del dispositivo, es posible determinar la fuerza que ejerce el dispositivo sobre la estructura a través del tiempo, utilizando la ecuación (3.93). Una vez obtenido, el vector de fuerzas es guardado como un archivo “.mat” que será utilizado posteriormente en el modelo de la estructura. En este caso el archivo es almacenado como “FH_LLOL_050050_1.mat” (asociado al registro del ensayo “LLOL_050050_1”).

El valor teórico ajustado a través del tiempo de la razón de amortiguamiento y frecuencia del DMS se presentan en la Figura 4-38, mientras que la fuerza que ejerce el dispositivo sobre la estructura se muestra en la Figura 4-39.

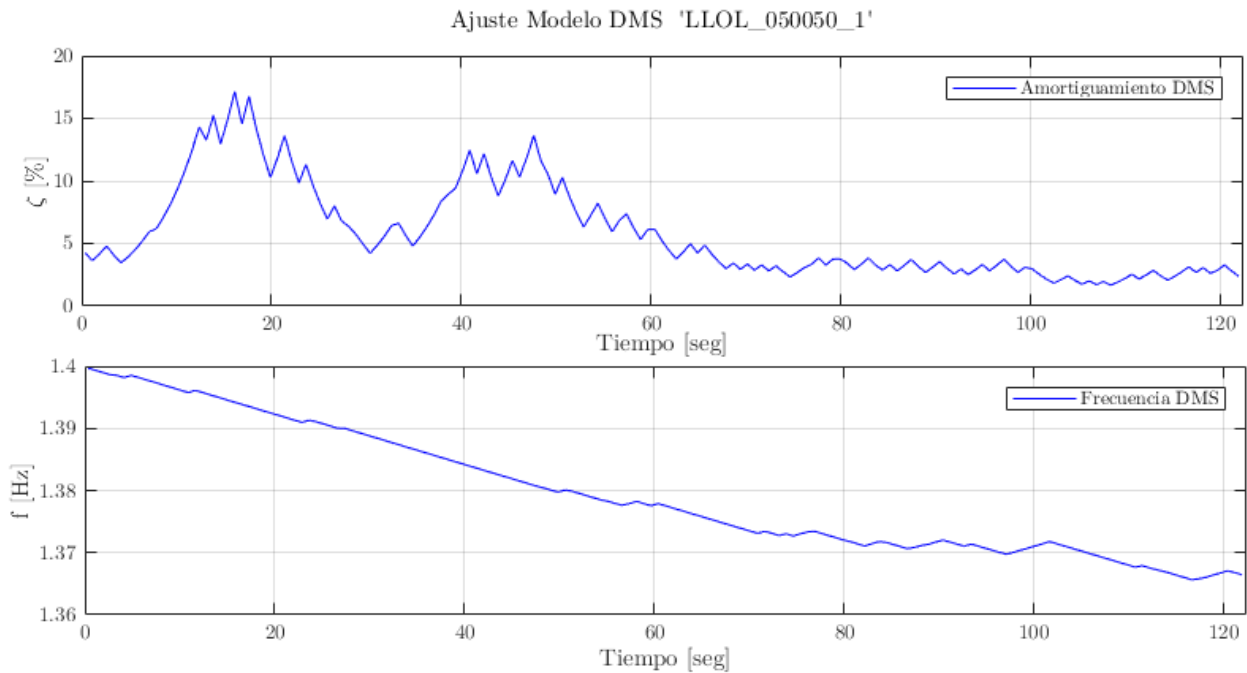


Figura 4-38: Razón de amortiguamiento y frecuencia, Modelo DMS ‘LLOL_050050_1’.

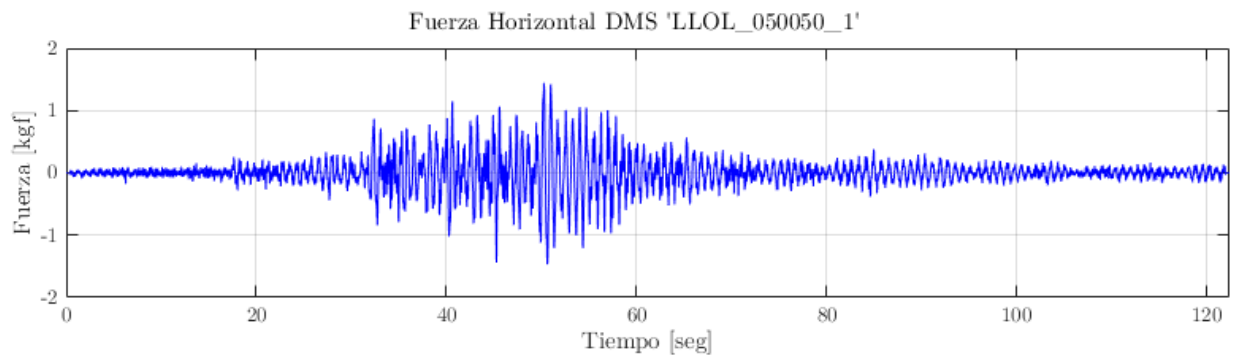


Figura 4-39: Fuerza horizontal, Modelo DMS 'LLOL_050050_1'.

4.7.2 Modelo Estructura de 6 Niveles

Se modela la estructura como un sistema de seis grados de libertad, considerando las propiedades dinámicas presentadas en la sección 4.6.2, y utilizando rutinas de resolución de sistemas de varios grados de libertad basados en el método de Newmark (Newmark, 1959). Luego, el modelo teórico es ajustado a partir de los resultados obtenidos al determinar experimentalmente los parámetros modales de la estructura.

Al igual que en el caso detallado en la sección 4.2, se considera una estructura del tipo edificio de corte que por tanto supone seis grados de libertad asociados únicamente el desplazamiento horizontal de cada uno de los niveles de ésta. Cada nivel es enumerado de abajo hacia arriba, por lo que el primer grado de libertad corresponde al desplazamiento del primer nivel, mientras que el último corresponde al desplazamiento del sexto nivel. De esta manera la Figura 4-3 sigue siendo referente para comprender la distribución de niveles de la estructura.

Para definir la matriz de masa, se desmonta la estructura original para pesar cada nivel de ésta mediante el uso de una balanza. Luego, una vez obtenida la matriz de masa, se realiza un procedimiento análogo al detallado en la sección 4.6.2, donde se obtiene el vector de frecuencias y la matriz de formas modales. Luego, mediante la expresión (4.3), es posible obtener la matriz de rigidez de la estructura.

El modelo es ajustado en base a la respuesta obtenida de cada ensayo en laboratorio, por lo que para ejemplificar este proceso se considerará la respuesta teórica utilizando el registro “LLOL_050000_1” (ver sección 4.5.2).

Se importa el archivo “FH_LLOL_050000_1.mat”, definido en la sección 4.7.1, que corresponde a la fuerza que ejerce el dispositivo sobre la estructura durante el ensayo “LLOL_050000_1”. De esta manera, el vector se suma como un input en el sexto nivel de la estructura, junto al registro sísmico relacionado al input en su base, en este caso, “LLOL_050000_1”. En caso de ser un ensayo donde la estructura no posee DMS, el vector de fuerzas es nulo.

Se busca ajustar la respuesta teórica de la estructura modificando sus propiedades dinámicas (tasas de amortiguamiento y formas modales), de manera que la aceleración teórica se asemeje a la obtenida experimentalmente. Para evaluar la semejanza entre ambas, se determina la exactitud con que una curva se aproxima a otra, utilizando el coeficiente NRMSE (Root-mean-square error), considerando la aceleración de cada uno de

los niveles. Para acotar el problema de optimización, se ajusta el amortiguamiento de los primeros 3 modos de vibrar, ya que son lo que determinan en mayor medida el comportamiento de la estructura.

Para realizar el ajuste teórico, se utilizan pequeñas ventanas de tiempo (1.5 seg), donde en cada intervalo se ajusta la tasa de amortiguamiento con una variación máxima de $\pm 15\%$, mientras que el factor de cambio de formas modales permite una variación máxima de un $\pm 1\%$, esto para los tres primeros modos de la estructura.

A continuación, la Figura 4-40 presenta las aceleraciones obtenidas a partir de cada nivel de la estructura en laboratorio, junto con las aceleraciones obtenidas del modelo teórico. A partir de dichas aceleraciones, se obtiene la comparación de respuestas en el espacio de frecuencias para cada nivel (Figura 4-41). Para cada comparación, se obtiene el factor “NRMSE” que determina su similitud. Luego, la Figura 4-42 presenta el valor del factor de ajuste de tasas de amortiguamiento de los tres primeros modos del modelo teórico ajustado.

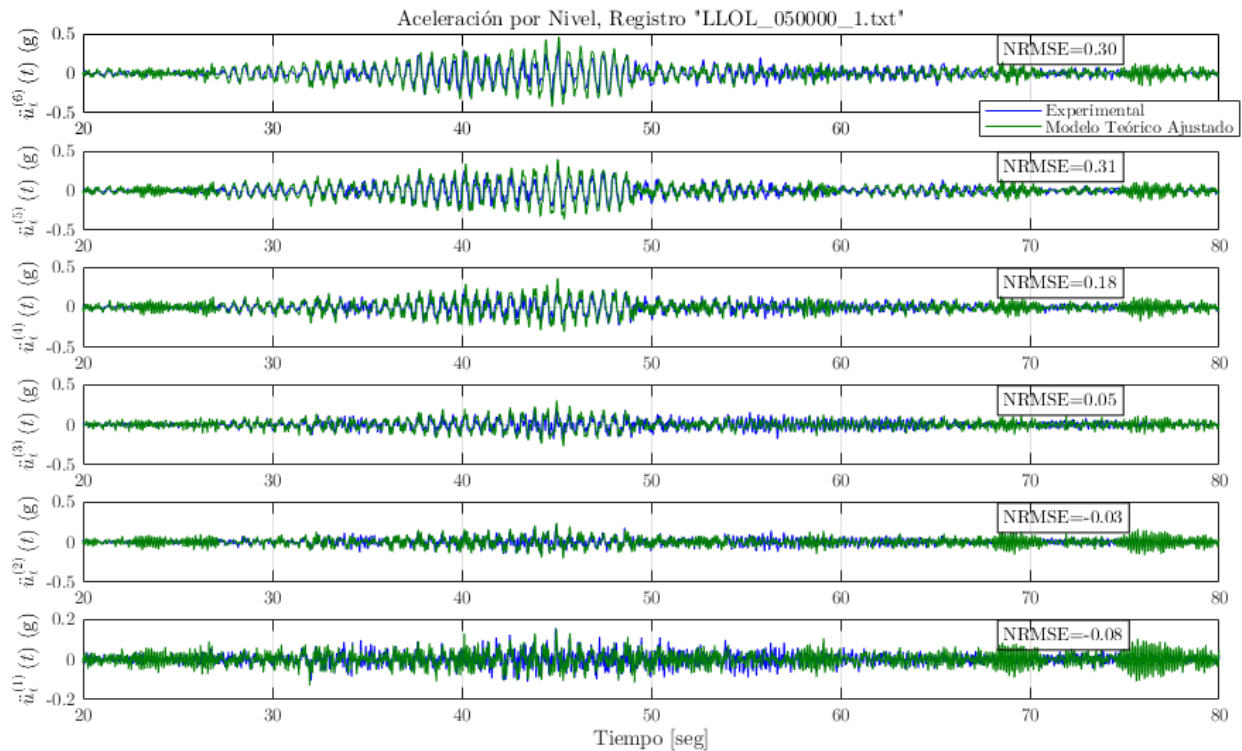


Figura 4-40: Comparación respuesta teórica y experimental, mediante coeficiente NRMSE, registro “LLOL_050000_1.txt”.

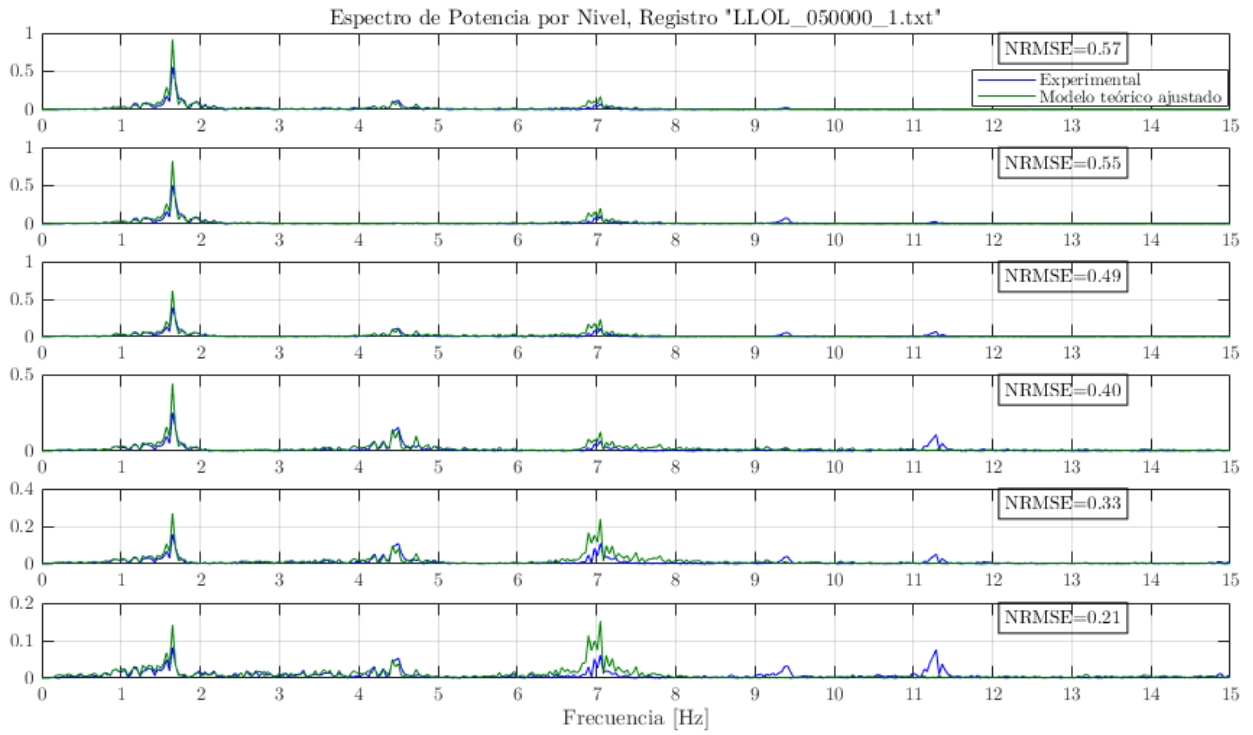


Figura 4-41: : Comparación frecuencia teórica y experimental, mediante coeficiente NRMSE, registro “LLOL_050000_1.txt”.

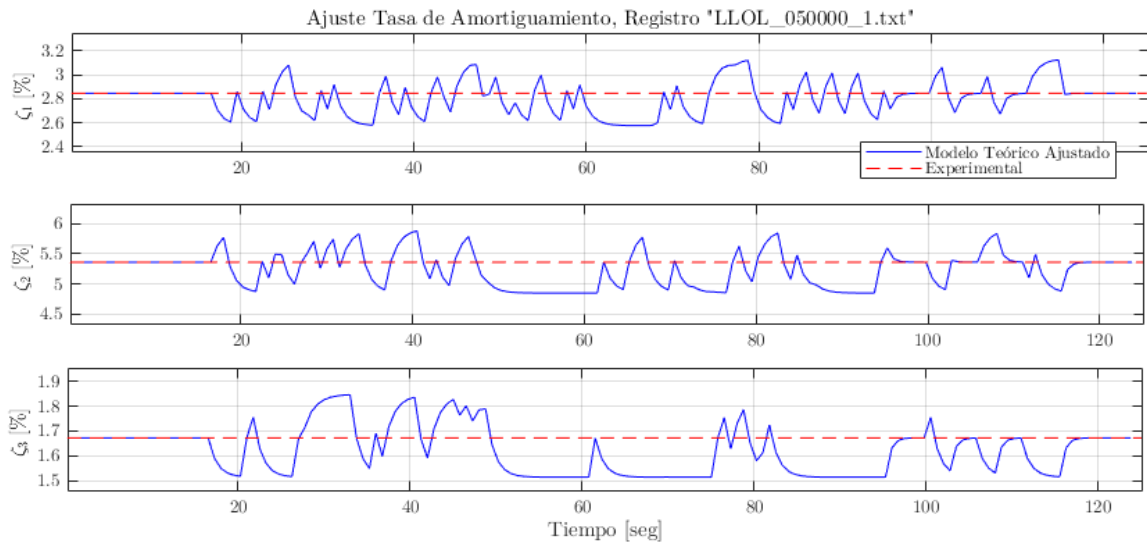


Figura 4-42: Ajuste de amortiguamiento para los tres primeros modos, registro “LLOL_050000_1.txt”.

A partir de los resultados obtenidos anteriormente, es posible obtener el desplazamiento relativo y el corte entre niveles del modelo teórico ajustado. Donde en el recuadro ubicado en la esquina superior derecha de cada gráfico se señala el valor máximo alcanzado.

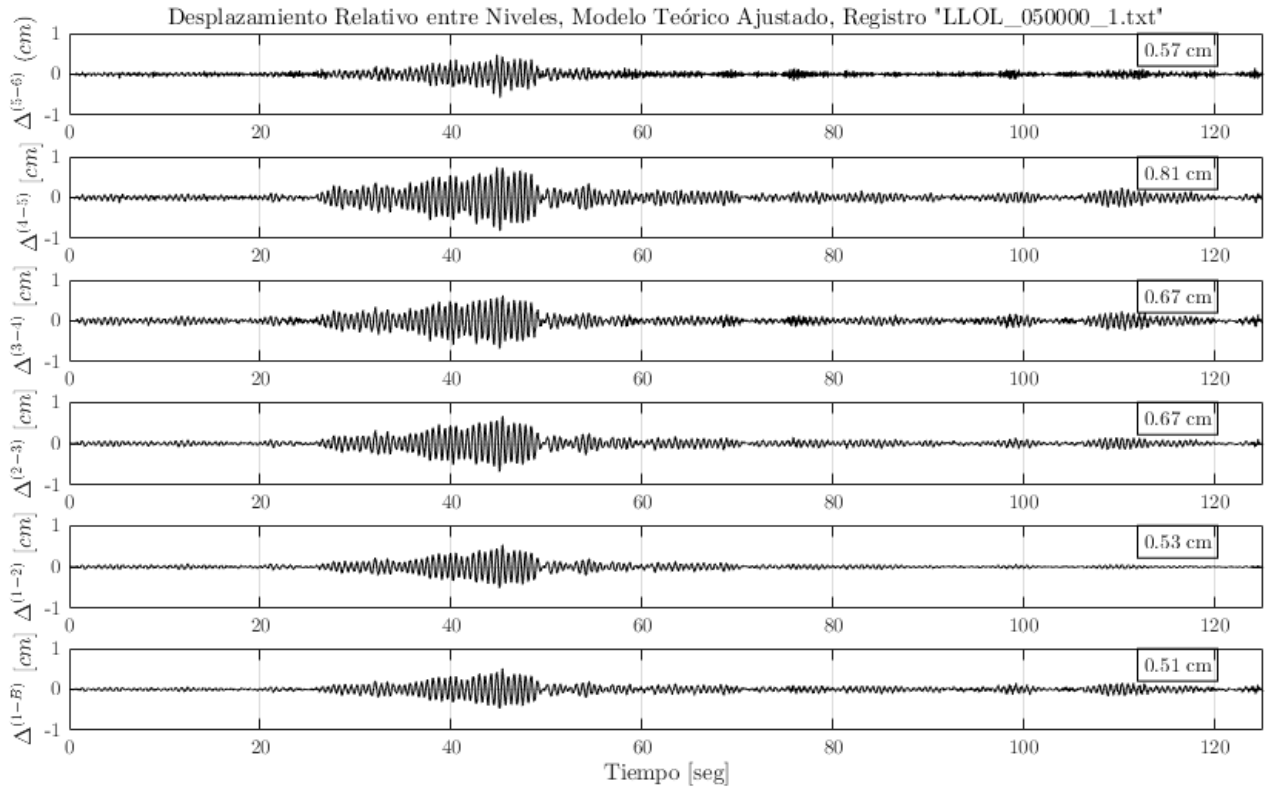


Figura 4-43: Desplazamiento entre pisos modelo teórico, registro “LLOL_050000_1.txt”.

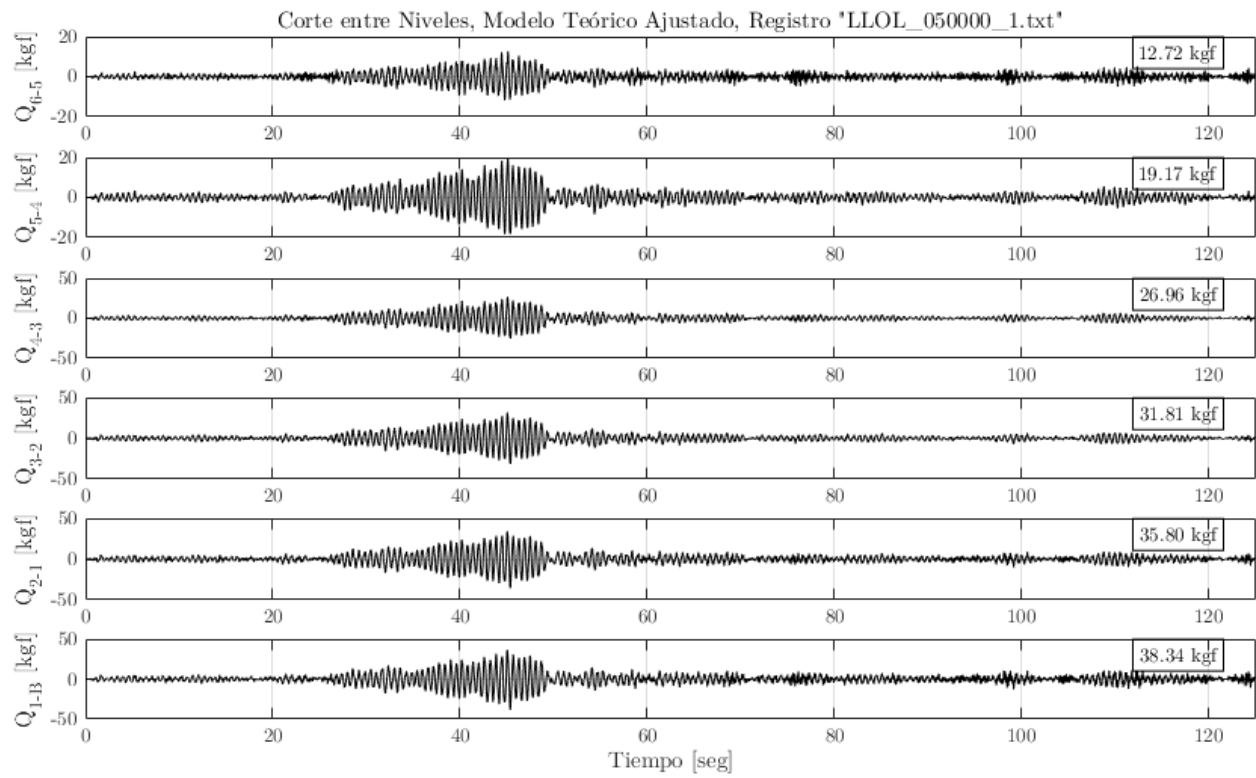


Figura 4-44: Corte entre pisos modelo teórico, registro “LLOL_050000_1.txt”.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Introducción

Con el fin de demostrar la incidencia de la componente vertical de un sismo en la eficiencia del DMS, la estructura descrita en la sección 4.2 es sometida a diversos registros sísmicos. Para esto la estructura es ensayada bajo las condiciones de cada configuración, que considera la implementación del disipador descrito en la sección 4.3. Para realizar este ensayo los registros son aplicados en su base utilizando una mesa vibradora, en el laboratorio de sólidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. La respuesta de la estructura junto al disipador, son medidas a través de acelerómetros instalados en cada nivel de ella. La posición en que fue ubicado cada sensor, y las especificaciones técnicas de cada uno, se presentan en la Figura 4-9 y la Tabla 4-3.

Para ejemplificar el proceso de obtención de resultados, en cada una de las subsecciones siguientes se presentan los resultados obtenidos a partir de los registros del

Terremoto del Maule (2010), Estación de Lolleo. Los resultados obtenidos a partir de las otras configuraciones de ensayo son añadidos en la sección Anexos. Los detalles y especificaciones tanto de los registros de Lolleo como del resto de registros se presentan en la sección 4.5.2.

A continuación, se presenta para cada configuración de ensayo:

- Output e Input, Ensayo Experimental
- Cuadro respuesta utilizando el método DSI.
- Espectrograma
- Fuerza Horizontal ejercida por DMS.
- Desplazamiento relativo máximo entre niveles.
- Corte entre niveles.

Luego, la sección 5.8 presenta el análisis comparativo resumen de la respuesta experimental de la estructura, donde se evalúan los siguientes parámetros:

- Aceleración máxima absoluta por nivel.
- Desplazamiento relativo máximo entre niveles.
- Corte máximo entre nivel.
- Intensidad de Housner por nivel.

5.2 Output e input, ensayo experimental

Se obtiene la respuesta de la estructura como del DMS, al ensayar el sistema utilizando los registros descritos en la sección 4.5.2.

Se define como Output la aceleración medida en cada nivel de la estructura, mientras que el Input corresponde a la aceleración medida en su base. La disposición de cada uno de los sensores es señalada en la Figura 4-9. Luego, en caso de ser implementado el dispositivo, Output DMS presenta la aceleración medida por el acelerómetro instalado en el DMS, ubicado en el sexto nivel de la estructura. Una vez obtenidos los registros, estos son corregidos y filtrados utilizando un filtro Butterworth digital de paso alto de 0.1 Hz y uno de paso bajo de 30 Hz.

A continuación, se presenta el Output e Input de aceleración para cada registro obtenido a partir del Terremoto del Maule (2010), Estación de Llolleo.

Respuesta del sistema para Registro ‘LLOL’, Componente Horizontal al 50%, Componente Vertical al 0%. Sin DMS:

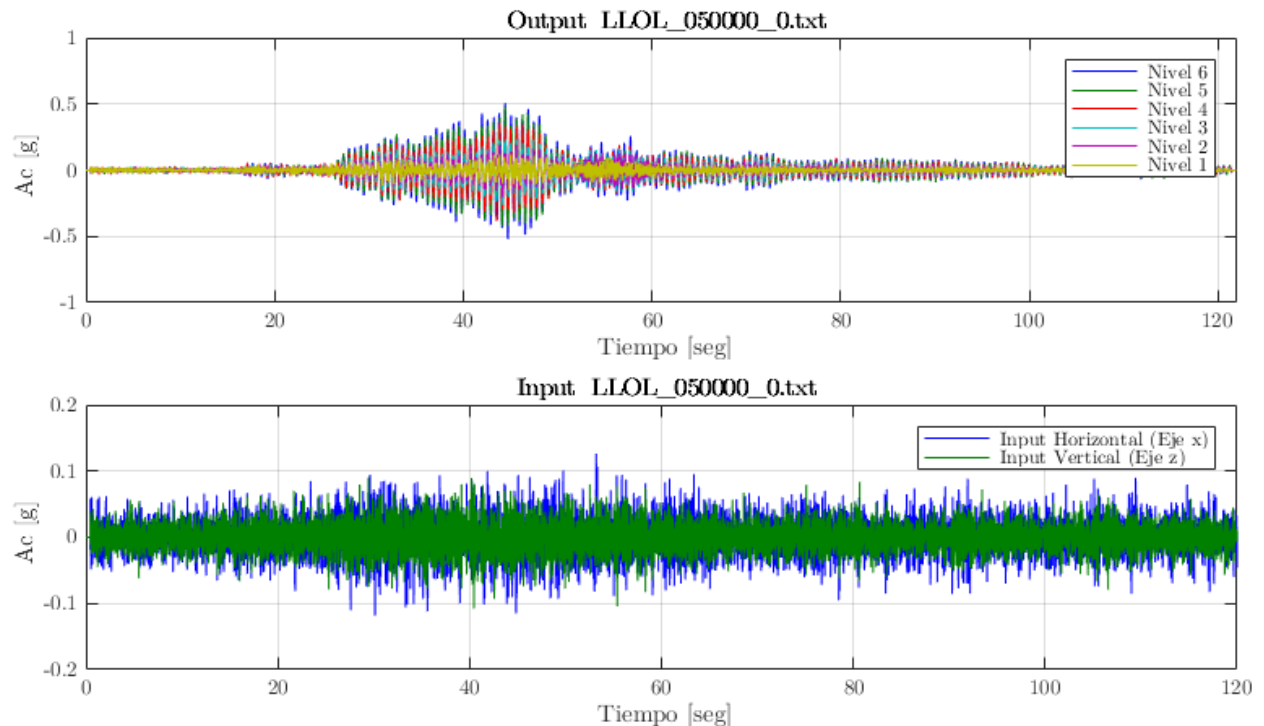


Figura 5-1: Output e Input, Registro ‘LLOL_050000_0’.

Respuesta del sistema para Registro 'LLOL', Componente Horizontal al 50%, Componente Vertical al 0%. DMS instalado:

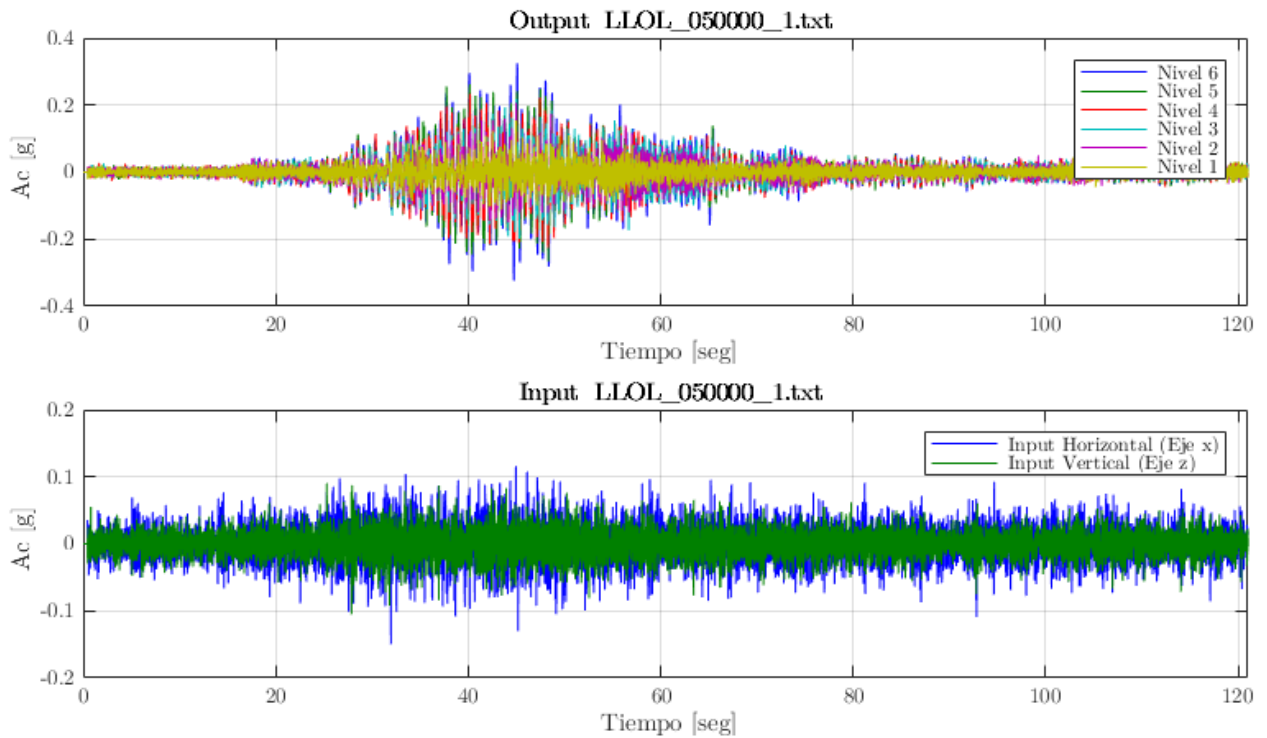


Figura 5-2: Output e Input, Registro 'LLOL_050000_1'.

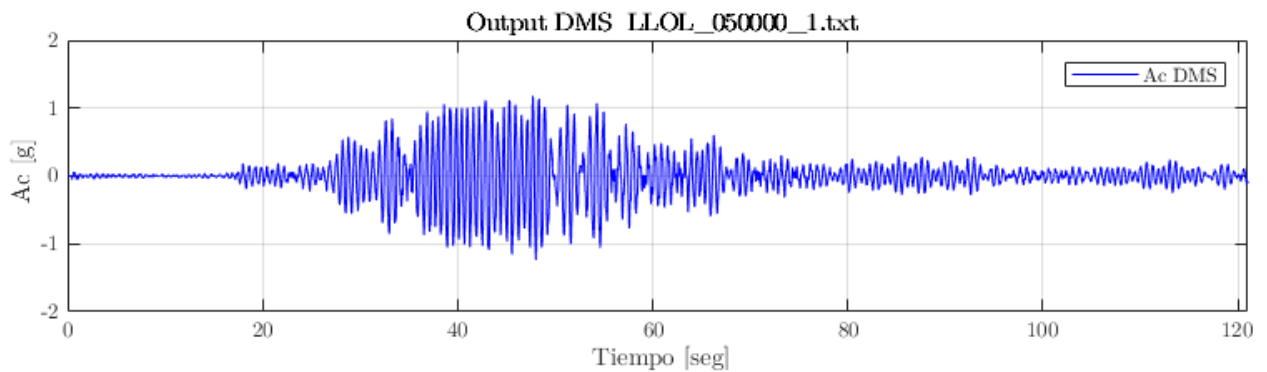


Figura 5-3: Output DMS, Registro 'LLOL_050000_1'.

Respuesta del sistema para Registro 'LLOL', Componente Horizontal al 50%, Componente Vertical al 50%. DMS instalado:

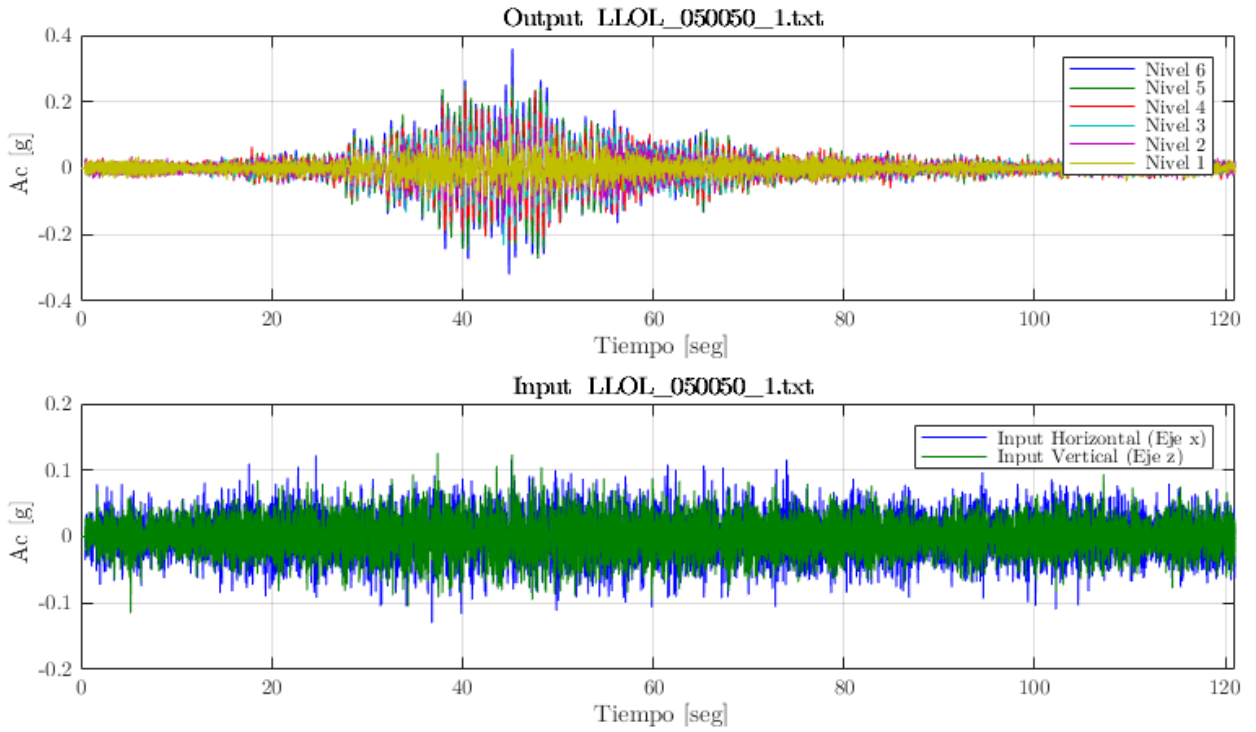


Figura 5-4: Output e Input, Registro 'LLOL_050050_1'.

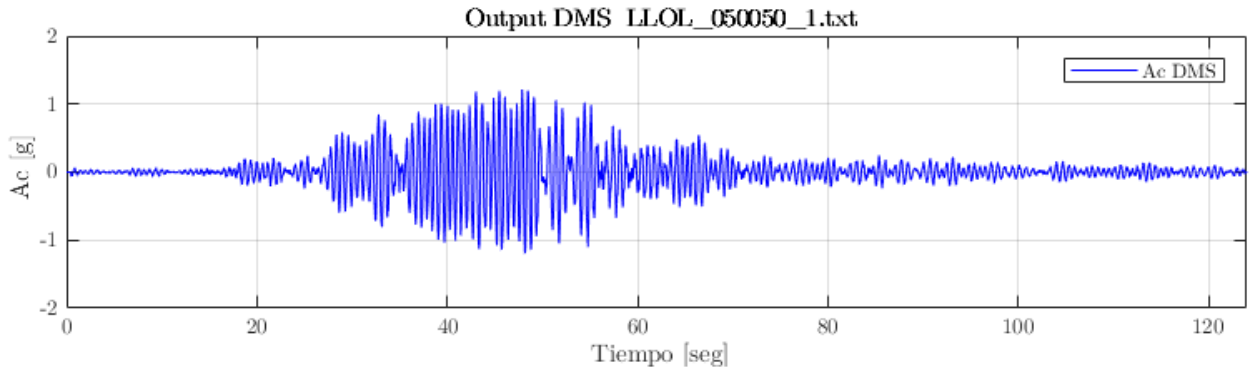


Figura 5-5: Output DMS, Registro 'LLOL_050050_1'.

Respuesta del sistema para Registro 'LLOL', Componente Horizontal al 50%, Componente Vertical al 100%. DMS instalado:

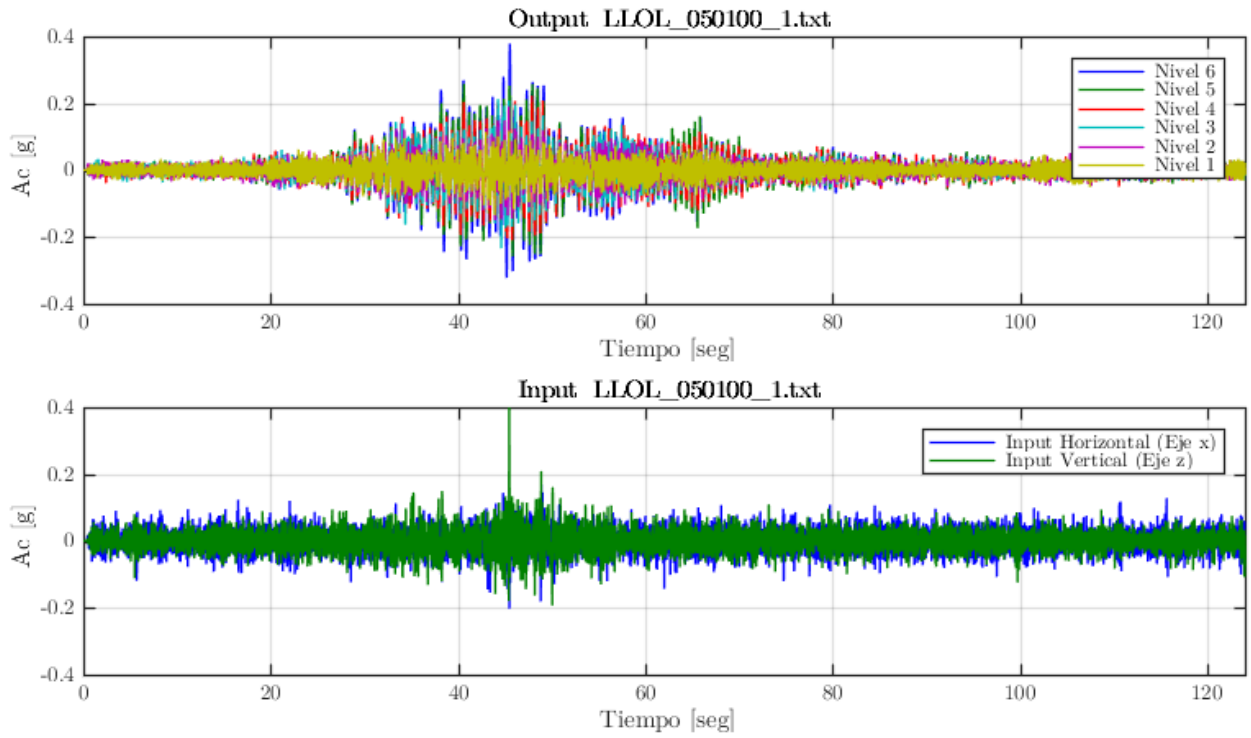


Figura 5-6: Output e Input, Registro 'LLOL_050100_1'.

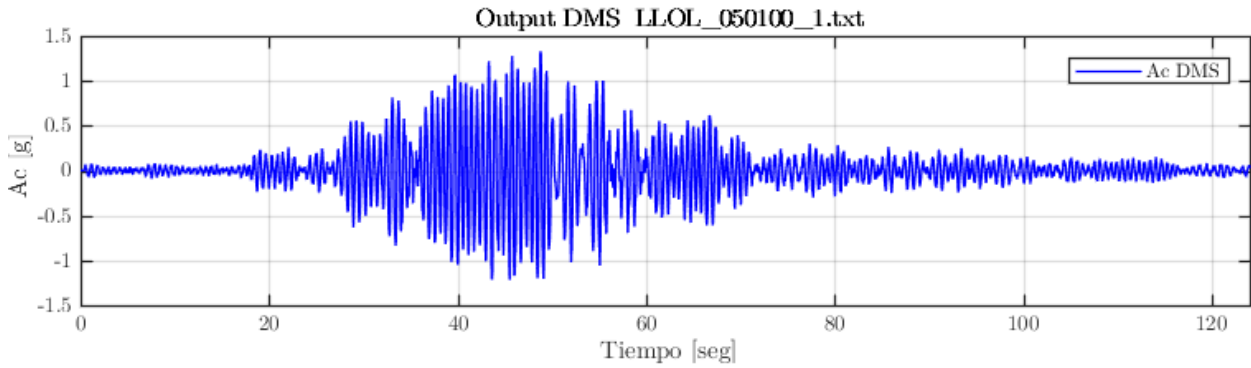


Figura 5-7: Output DMS, Registro 'LLOL_050100_1'.

5.3 Cuadro de respuesta, método DSI

Para cada configuración de ensayo se obtiene el cuadro respuesta utilizando el método DSI. Esta respuesta se presenta considerando casos:

- El Caso 1 corresponde al análisis del sistema considerando la respuesta de la estructura como output, mientras que el input corresponde al registro obtenido en la base de la mesa, junto con la fuerza horizontal en caso de ser implementado el DMS.
- El Caso 2 se aplica solo en casos dónde el DMS es implementado. En este análisis, se considera como output la respuesta de la estructura junto con la aceleración que presenta el DMS, mientras que el input corresponde al registro obtenido en la base de la mesa.

A continuación, se presenta el cuadro de respuesta del método DSI, para cada registro obtenido a partir del Terremoto del Maule (2010), Estación de Llolleo:

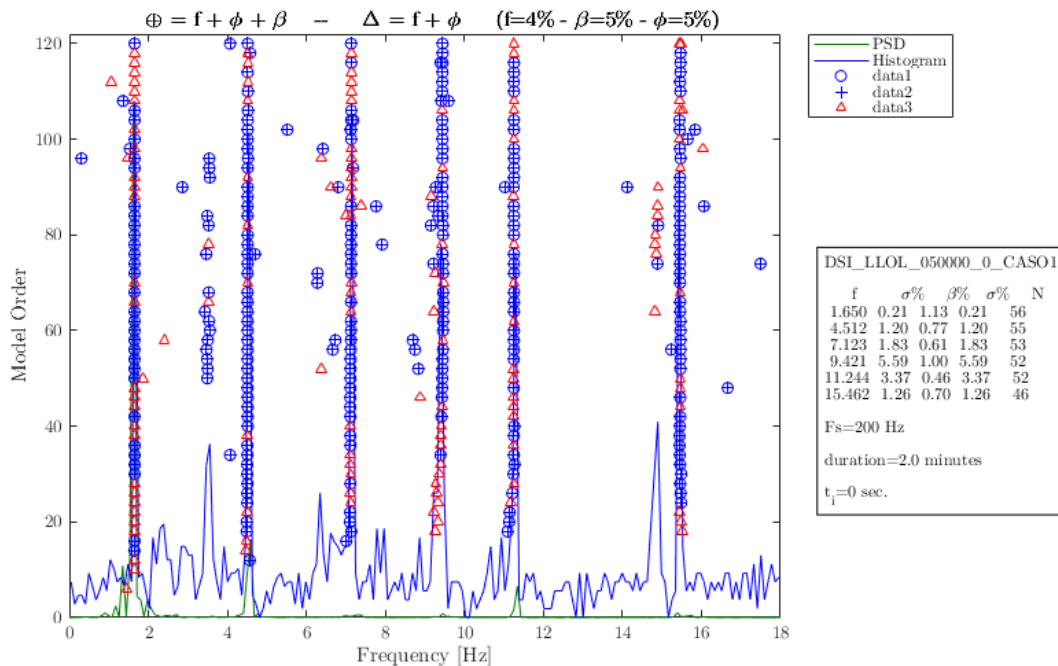


Figura 5-8: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050000_0” CASO1 (sin DMS).

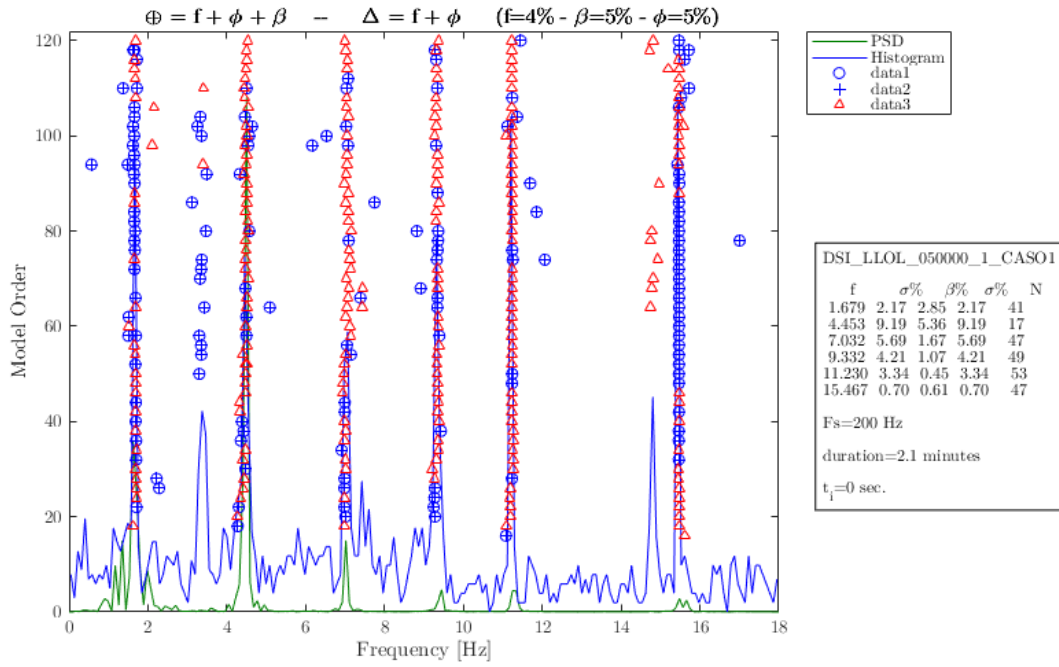


Figura 5-9: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050000_1” CASO1 (con DMS).

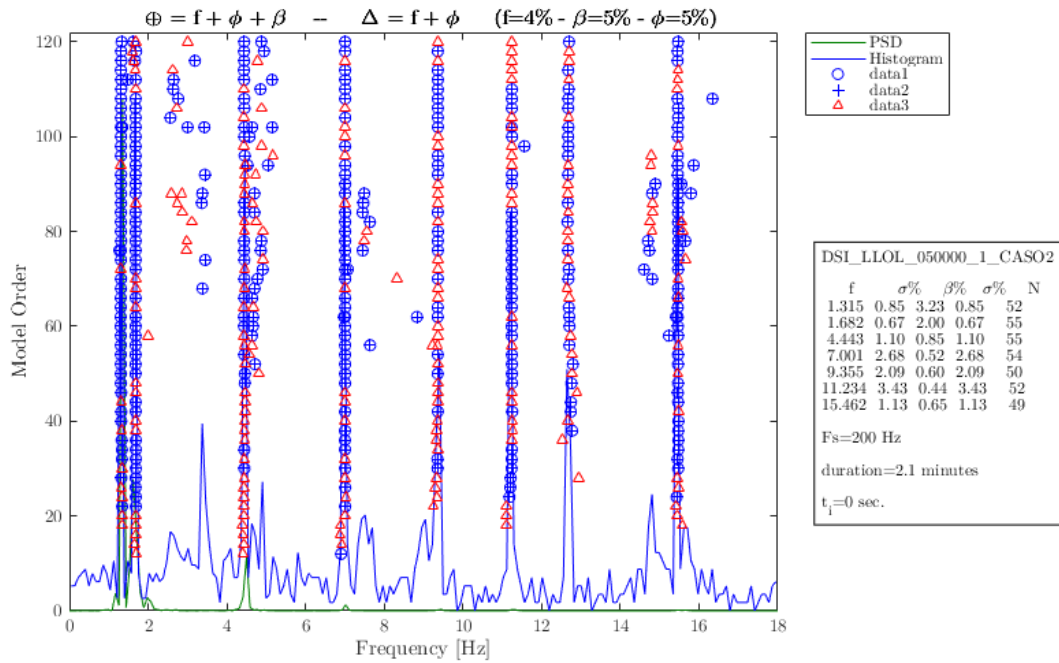


Figura 5-10: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050000_1” CASO2 (con DMS).

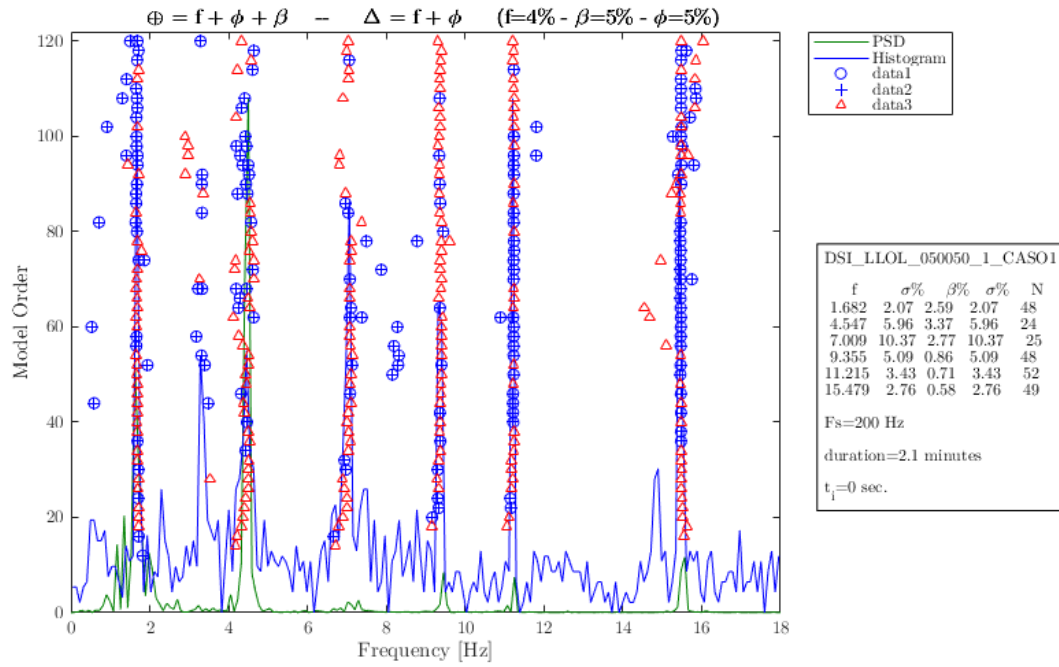


Figura 5-11: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050050_1” CASO1 (con DMS).

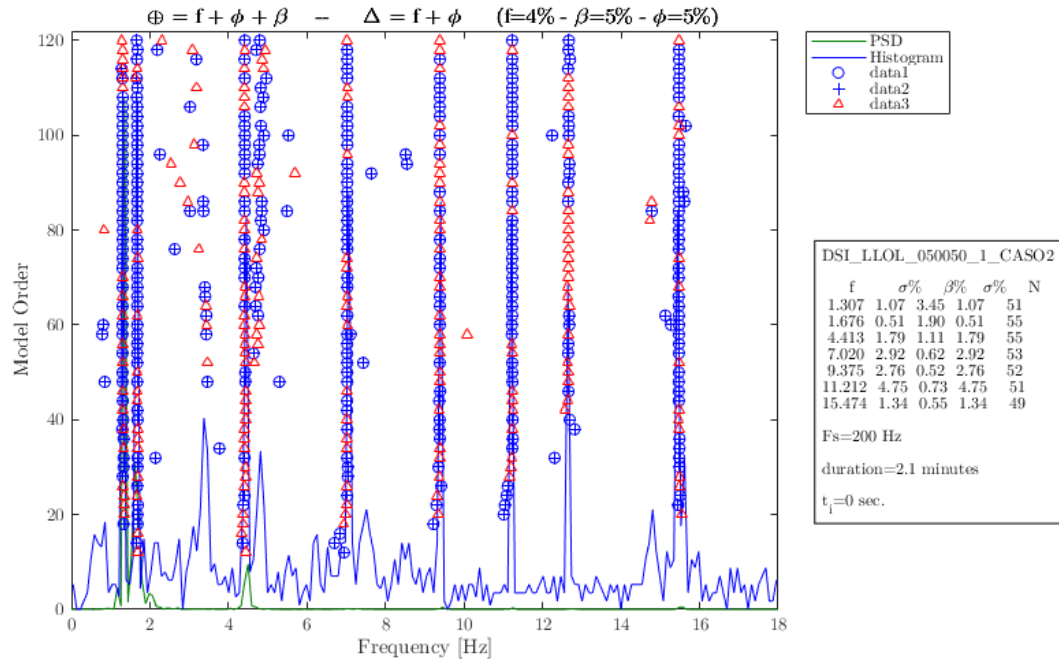


Figura 5-12: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050050_1” CASO2 (con DMS).

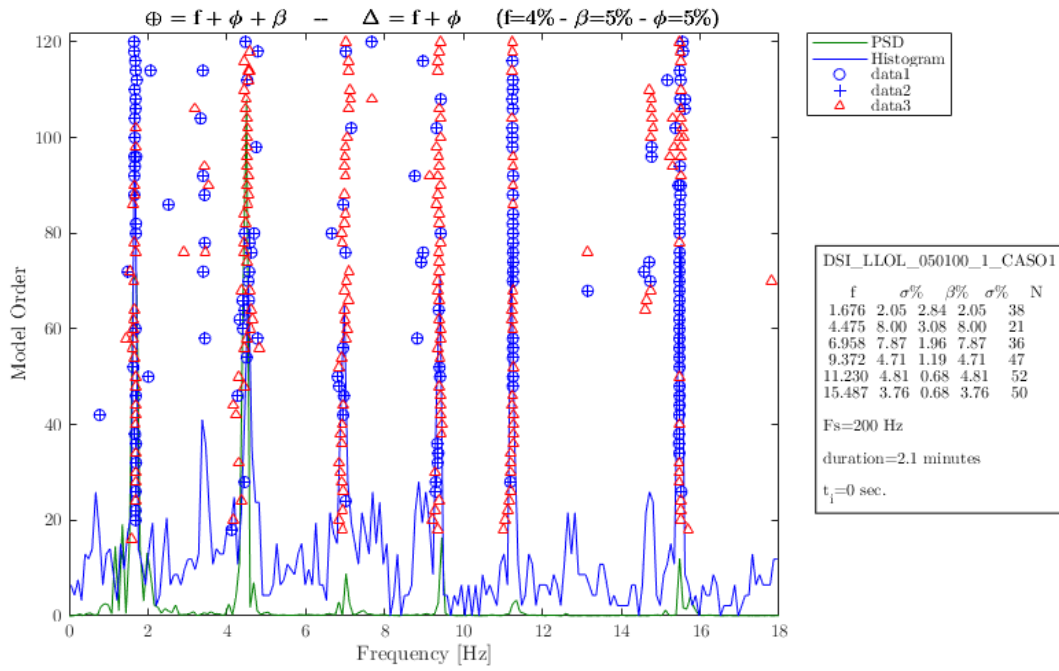


Figura 5-13: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050100_1” CASO1 (con DMS).

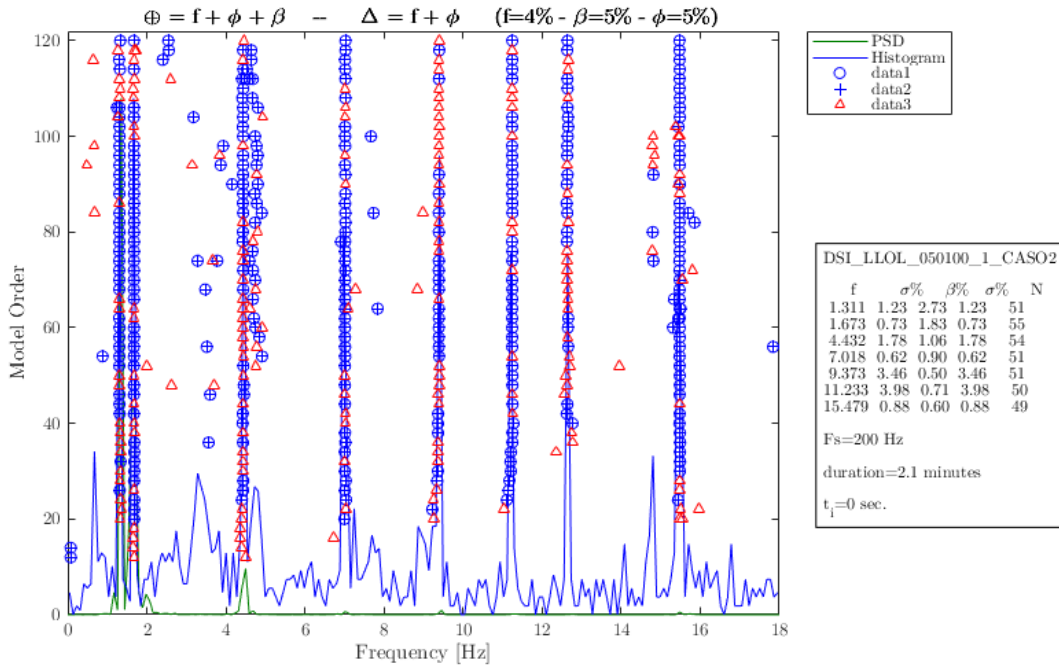


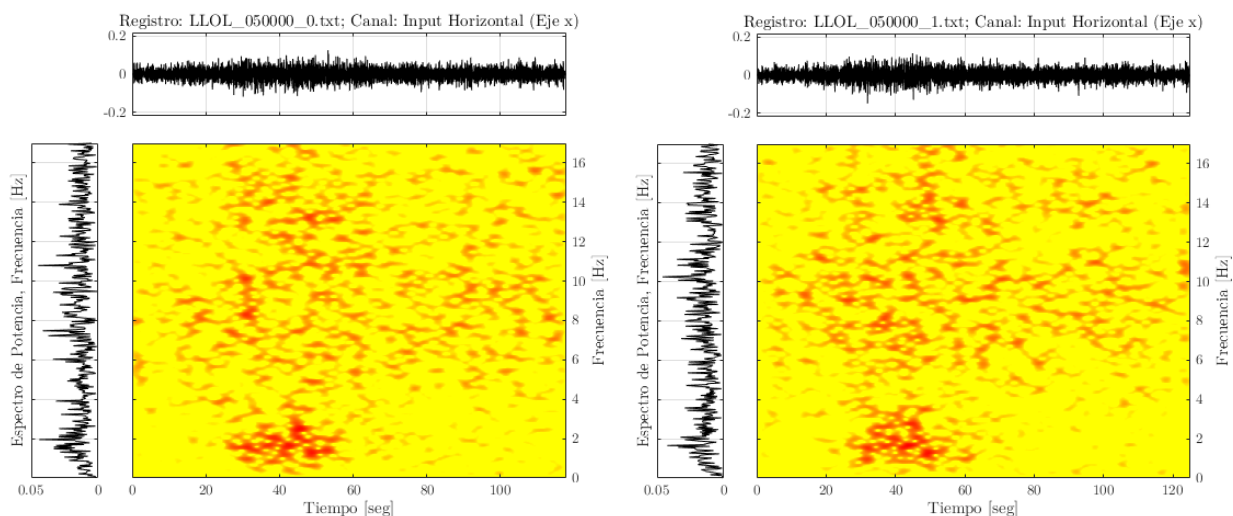
Figura 5-14: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050100_1” CASO2 (con DMS).

5.4 Espectrograma

Se presenta el espectrograma para cada configuración de ensayo. Estos se obtienen a partir de la aceleración medida por los sensores ubicados en la base de la mesa vibradora, para luego ser corregidos al ser filtrados. Si bien cada uno de los sismos considerados se caracteriza por poseer una tendencia a oscilar en un determinado rango de frecuencias, es posible observar alta energía a través de todo el espectro, esto debido a que la mesa vibradora MOOG presenta ruido en todo rango de frecuencias (donde se observa que la mayor parte de la energía se asocia a frecuencias menores a 5 Hz).

A partir de los registros que poseen únicamente aceleración horizontal (eje X) como lo es el caso de “LLOL_050000_0” y “LLOL_050000_1” se obtiene un único espectrograma, cuyo input es dicha aceleración. Mientras que de los registros que poseen además una aceleración vertical (eje Z) como lo es el caso de “LLOL_050050_1” y “LLOL_050100_1”, se obtienen dos espectrogramas, cada uno asociado a una componente del registro, siendo el input del espectro. Cada input es especificado en el apartado “Canal” de cada figura.

A continuación, se presenta el espectrograma para cada registro obtenido a partir del Terremoto del Maule (2010), Estación de Llolleo:



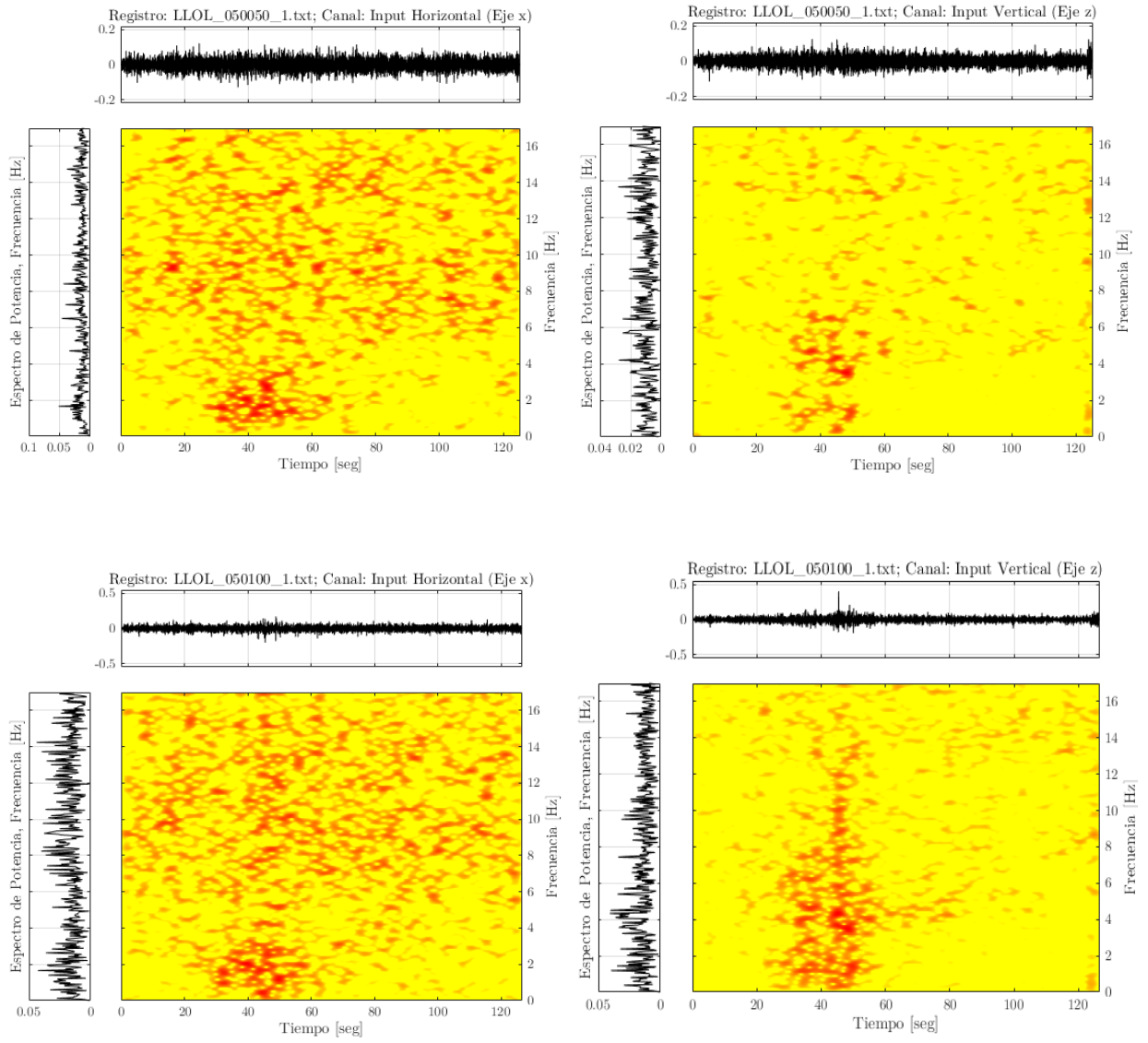


Figura 5-15: Espectrogramas para Registros Lolloe.

5.5 Fuerza horizontal ejercida por DMS

La fuerza horizontal se obtiene a través de la expresión (3.93)(3.93, definida por la aceleración, velocidad y desplazamiento angular que presenta el dispositivo. La aceleración angular ($\ddot{\theta}$) se obtiene partir de la respuesta experimental del dispositivo corregida mediante el Método Newton-Raphson (Tjalling, 1995). Mientras que la velocidad ($\dot{\theta}$) y el desplazamiento angular (θ), se obtienen a partir de la aceleración angular, utilizando el Método de Newmark (Newmark, 1959), basado en la variación de la aceleración angular. El proceso en detalle, junto con la explicación de métodos numéricos utilizados, es presentado en la sección 4.7.1.

A continuación, se presenta el vector de valores de la fuerza horizontal ejercida por el DMS, para cada registro obtenido a partir del Terremoto del Maule (2010), Estación de Llolle:

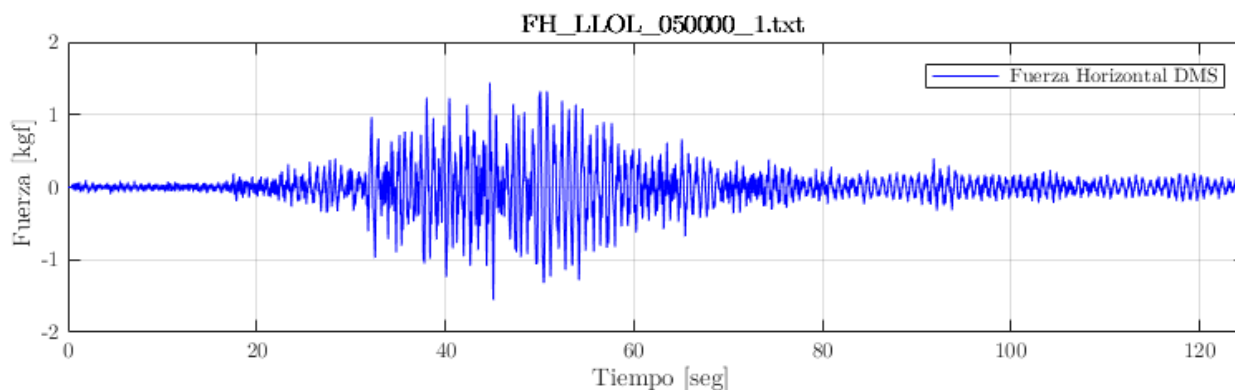


Figura 5-16: Archivo de vector de fuerzas “FH_LLOL_050000_1.txt”.

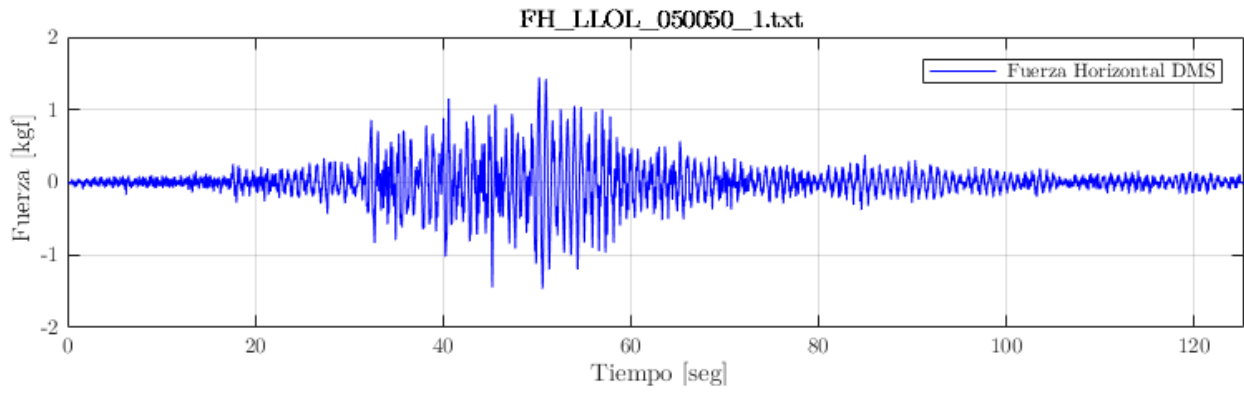


Figura 5-17: Archivo de vector de fuerzas “FH_LLOL_050050_1.txt”.

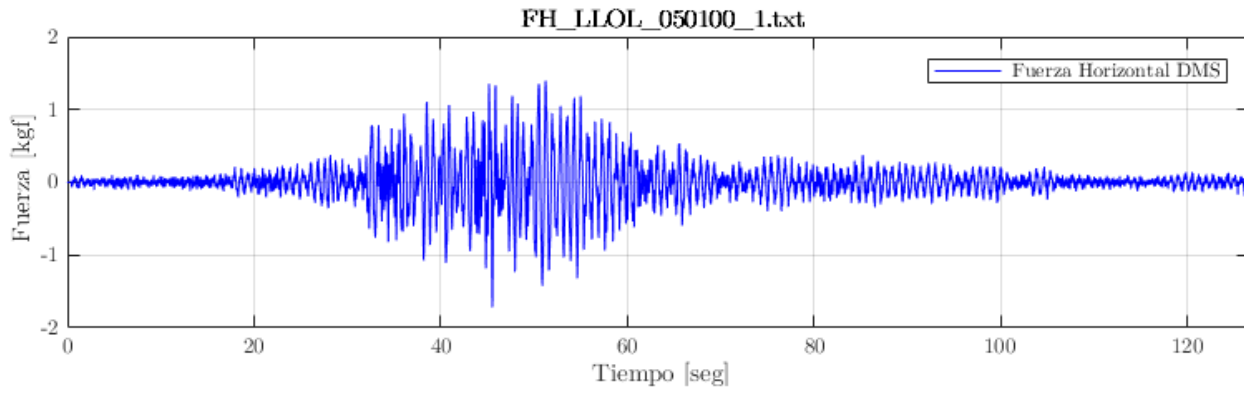


Figura 5-18: Archivo de vector de fuerzas “FH_LLOL_050100_1.txt”.

5.6 Desplazamiento entre niveles

Para obtener valor del desplazamiento relativo entre niveles, se utilizan los registros de aceleraciones presentados en la sección 5.2. A partir de estos registros es posible obtener el vector de velocidad y desplazamiento que posee cada nivel de la estructura durante el ensayo, mediante el uso de integración numérica trapezoidal acumulativa de la aceleración y la velocidad respectivamente.

Una vez obtenido el desplazamiento de cada nivel, el desplazamiento relativo se obtiene a partir de la diferencia de desplazamiento que posee un nivel con el siguiente.

A continuación, se presenta el desplazamiento entre niveles para cada registro obtenido a partir del Terremoto del Maule (2010), Estación de Llolleo. Donde en el recuadro ubicado en la esquina superior derecha de cada gráfico se señala el desplazamiento relativo máximo alcanzado.

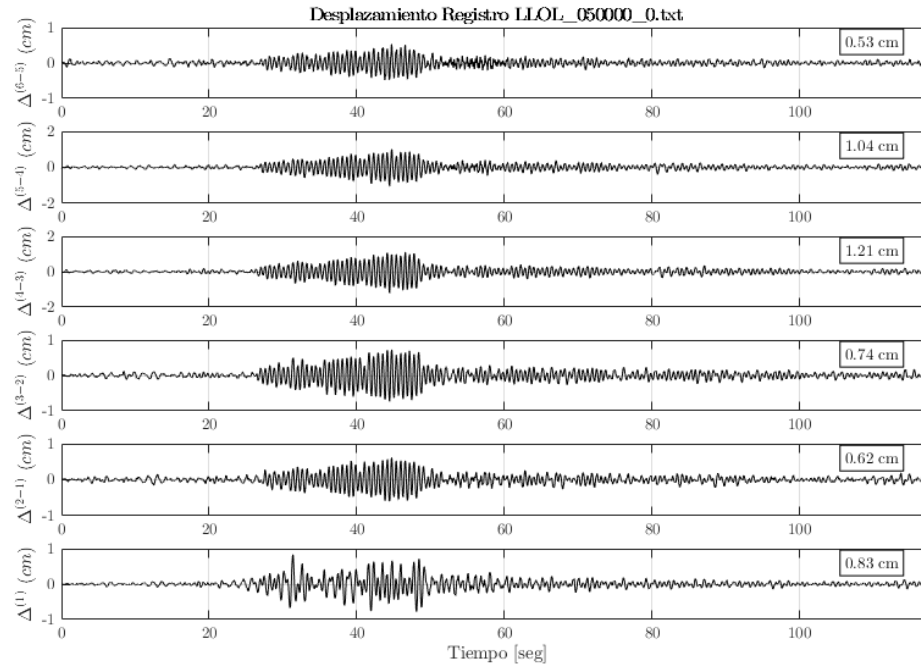


Figura 5-19: Desplazamiento entre niveles, Registro “LLOL_050000_0”.

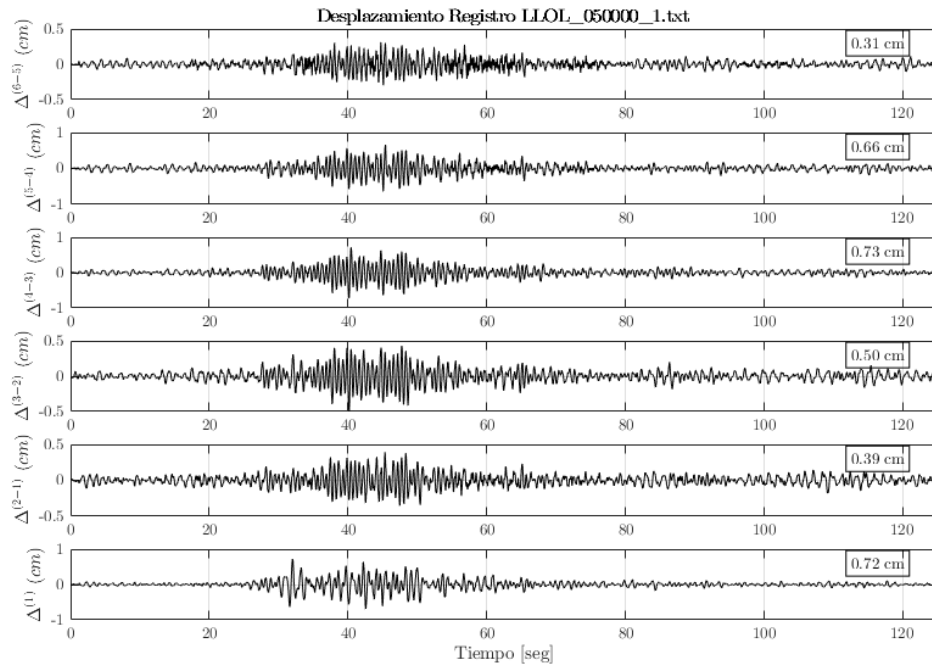


Figura 5-20: Desplazamiento entre niveles, Registro “LLOL_050000_1”.

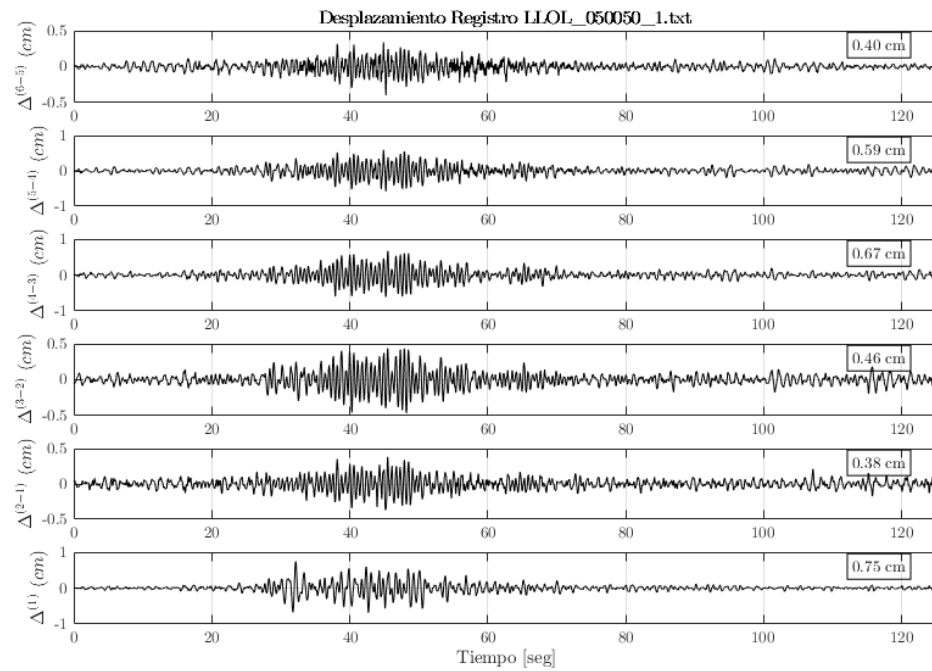


Figura 5-21: Desplazamiento entre niveles, Registro “LLOL_050050_1”.

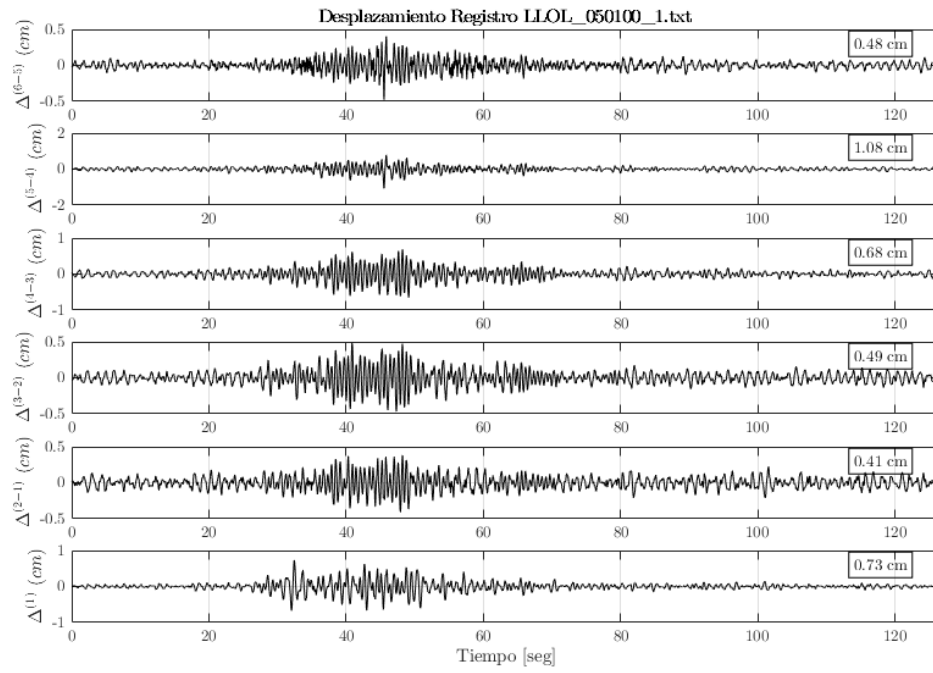


Figura 5-22: Desplazamiento entre niveles, Registro “LLOL_050100_1”.

5.7 Corte entre niveles

Para obtener el corte entre niveles, se considera la aceleración que presenta cada nivel de la estructura durante en ensayo, la masa de cada nivel de la estructura, y el vector de fuerza horizontal (sección 5.5).

Para obtener el corte de cada nivel se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_6 = M_6 \cdot Ac_6 + FH \quad (5.1)$$

$$Q_i = M_i \cdot Ac_i + Q_{i+1} \quad (5.2)$$

La expresión (5.1) es utilizada para obtener el corte en el sexto nivel de la estructura (Q_6), donde M_6 corresponde a la masa del sexto nivel (ver Tabla 4-2), Ac_6 corresponde a su vector de aceleraciones (sección 5.2), y FH corresponde al vector de valores de la fuerza horizontal ejercida por el DMS (sección 5.5).

La expresión (5.2) es utilizada para obtener el corte de los niveles restantes de la estructura, los cuales se deben calcular en orden descendiente. Donde Q_i corresponde al corte del nivel i de la estructura, M_i su masa, y Ac_i su vector de aceleraciones. Luego Q_{i+1} es el corte obtenido para el nivel superior al nivel a calcular.

A continuación, se presenta el corte entre niveles para cada registro obtenido a partir del Terremoto del Maule (2010), Estación de Llolleo. Donde en el recuadro ubicado en la esquina superior derecha de cada gráfico se señala el esfuerzo máximo alcanzado por el corte.

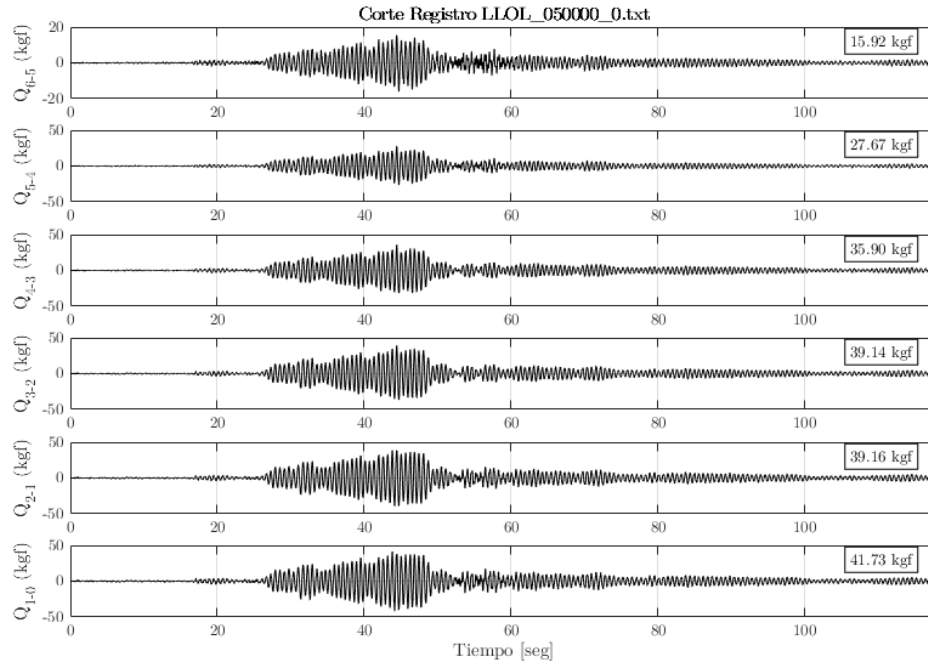


Figura 5-23: Corte entre niveles, Registro “LLOL_050000_0”.

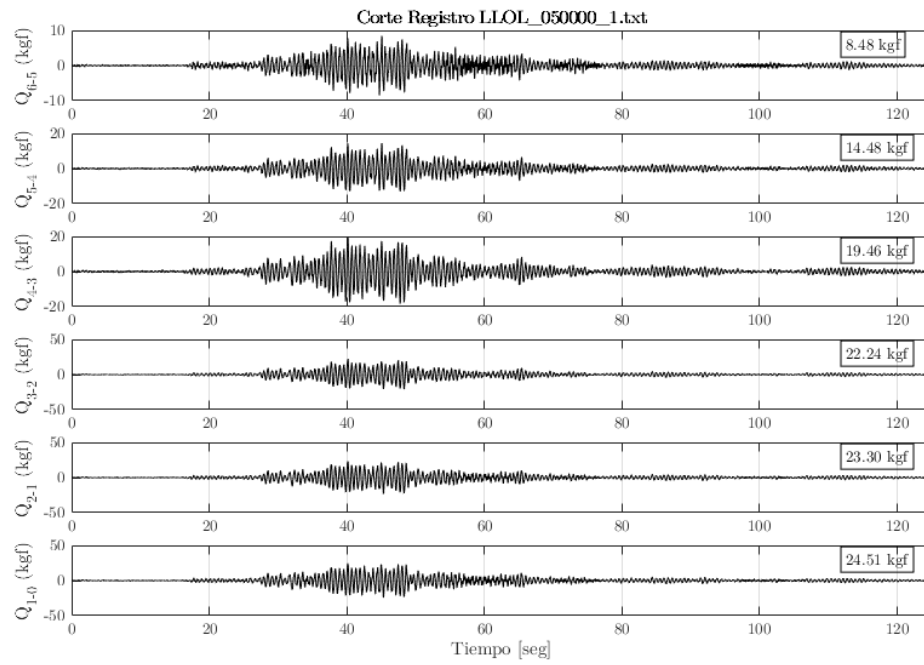


Figura 5-24: Corte entre niveles, Registro “LLOL_050000_1”.

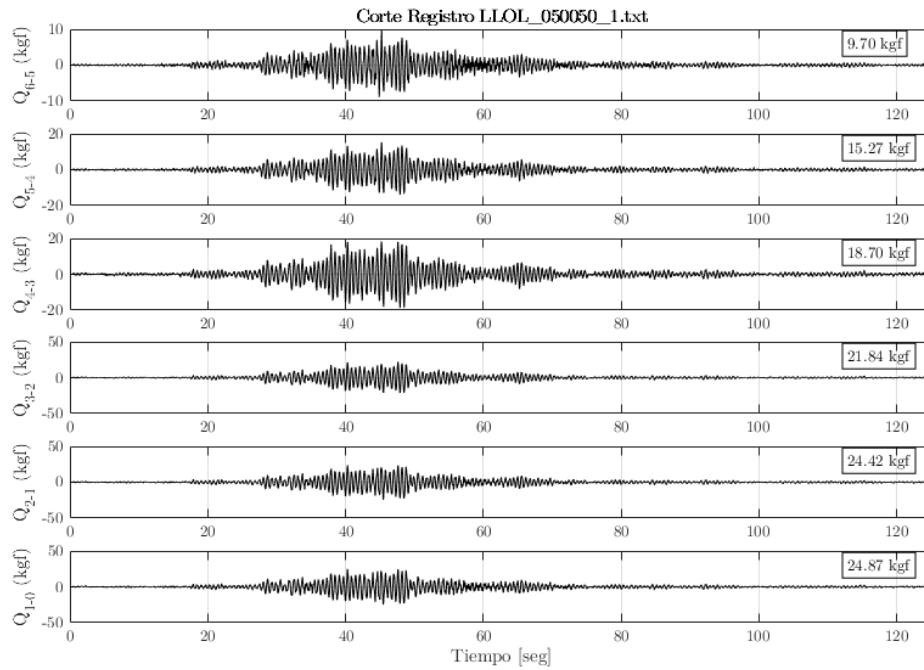


Figura 5-25: Corte entre niveles, Registro “LLOL_050050_1”.

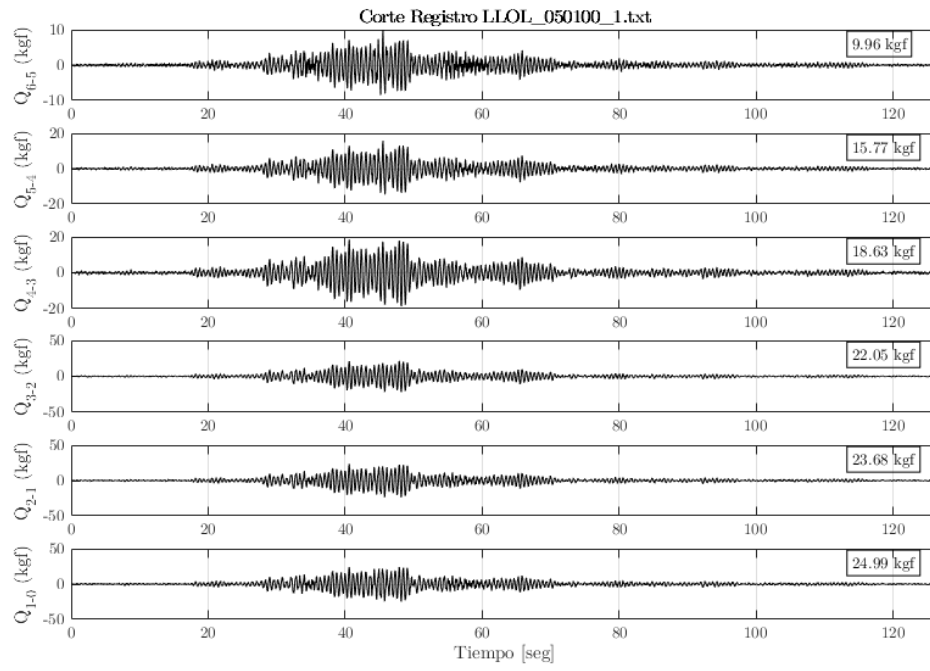


Figura 5-26: Corte entre niveles, Registro “LLOL_050100_1”.

5.8 Resumen respuesta experimental estructura

A continuación, se presenta el análisis comparativo resumen de la respuesta experimental de la estructura. Para esto, se analiza la aceleración máxima absoluta por nivel, el corte máximo entre nivel, y el desplazamiento relativo máximo absoluto entre niveles. La metodología implementada para determinarlos, junto con los valores obtenidos para cada uno de estos parámetros, se especifica en las secciones 5.2, 5.6 y 5.6 respectivamente.

Para determinar la Intensidad de Housner (Housner, 1952), se hace uso del espectro de pseudo-velocidad $S_v(T, \xi)$, el cuál según su postulado es posible utilizar para obtener una medida de la energía local del movimiento que provoca un sismo.

Housner propone como medida de la intensidad del registro, el área bajo la curva del espectro de pseudo-velocidad $S_v(T, \xi)$, en el rango de período de 0.1 a 2.5 seg, asociado a una tasa de amortiguamiento del 5%. De manera que la Intensidad de Housner se define a partir de la siguiente expresión:

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi = 5\%) dT \quad (5.3)$$

Donde el espectro de pseudo-velocidad $S_v(T, \xi)$ se construye a partir del registro de aceleraciones obtenido del ensayo, cuyo proceso es detallado en la sección 5.2. De esta manera, la obtención del espectro es a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{S_A}{\omega_n} = S_v = \omega_n \cdot S_d \quad (5.4)$$

Donde ω_n corresponde al período considerado, mientras que S_A y S_D corresponden al espectro de pseudo-aceleración y desplazamiento respectivamente.

La respuesta estructural experimental de aceleraciones máximas absolutas registradas para cada configuración de registro son las siguientes:

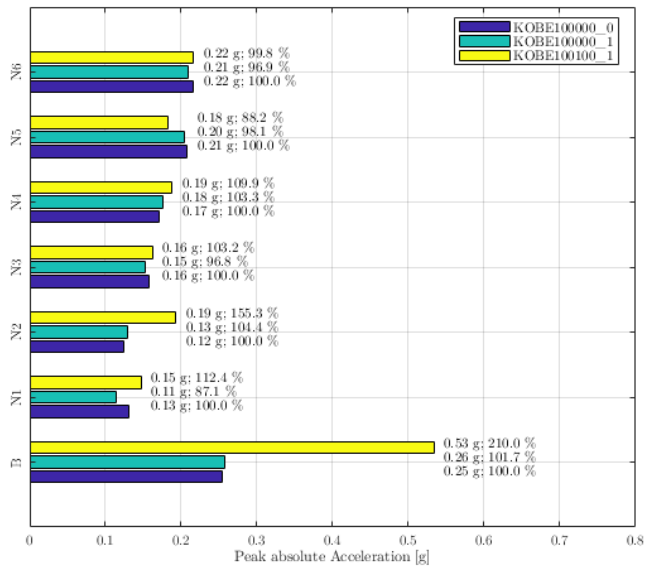


Figura 5-27: Gráfico de Aceleraciones Máximas absolutas, Registros 'KOBEL'.

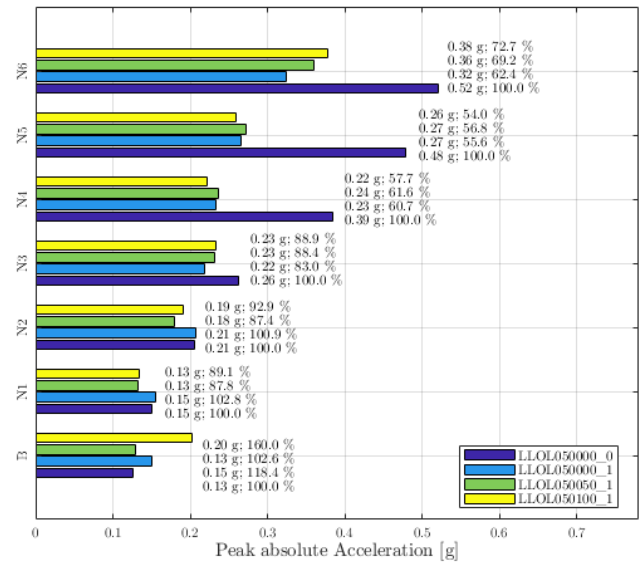


Figura 5-28: Gráfico de Aceleraciones Máximas absolutas, Registros 'LLOL'.

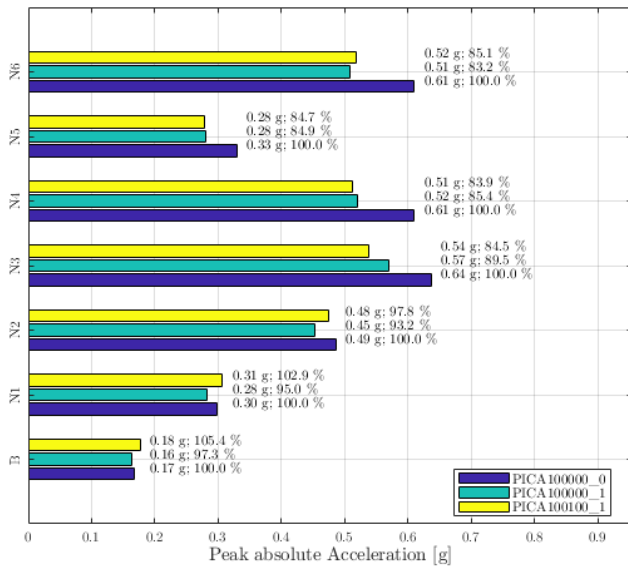


Figura 5-29: Gráfico de Aceleraciones Máximas absolutas, Registros 'PICA'.

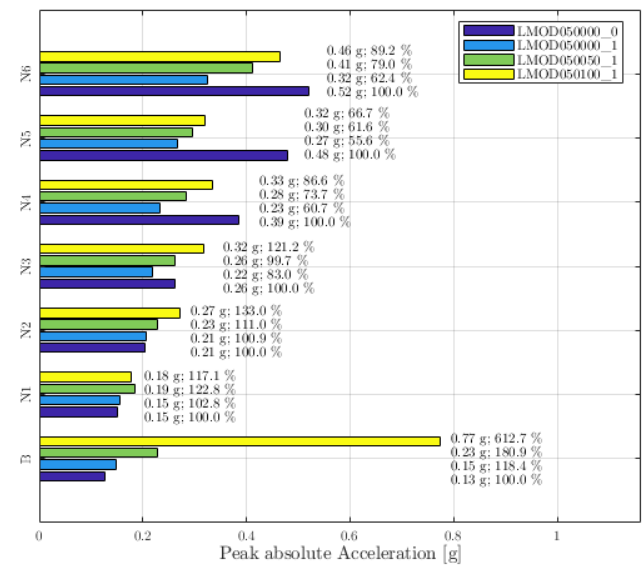


Figura 5-30: Gráfico de Aceleraciones Máximas absolutas, Registros 'LMOD'.

La respuesta estructural experimental del desplazamiento relativo máximo absoluto entre niveles, para cada configuración de registro son las siguientes:

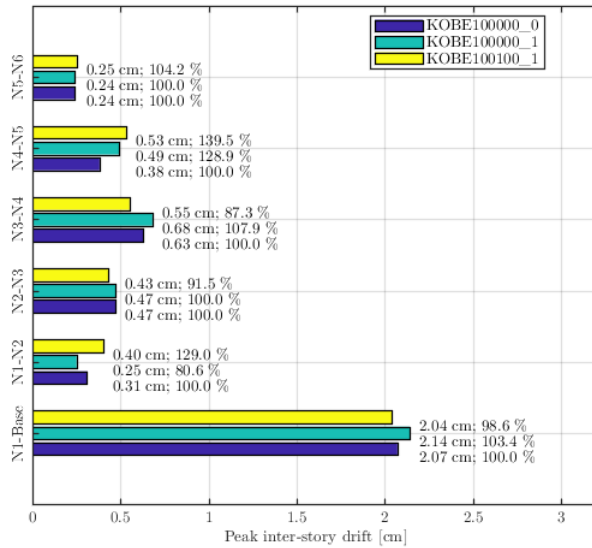


Figura 5-31: Gráfico de Desplazamiento Relativo Máximo, Registros ‘KOBE’.

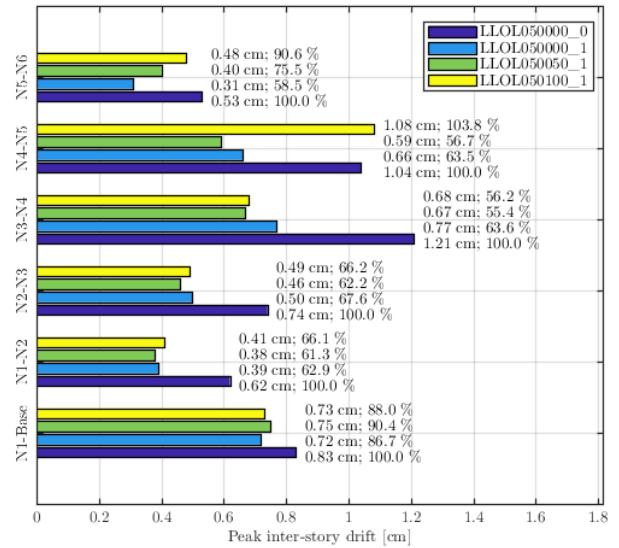


Figura 5-32: Gráfico de Desplazamiento Relativo Máximo, Registros ‘LLOL’.

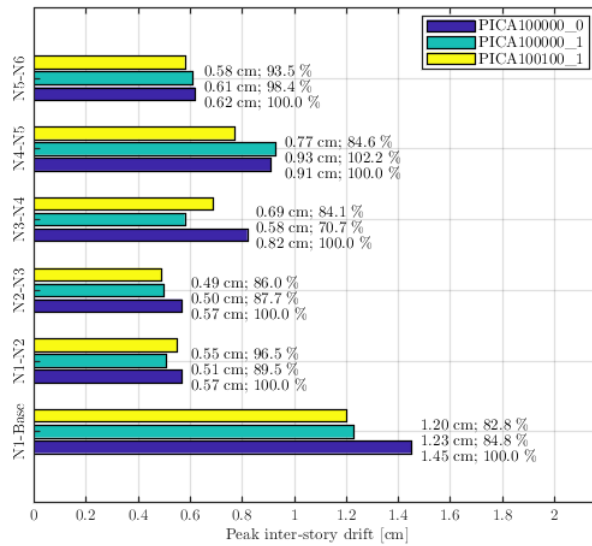


Figura 5-33: Gráfico de Desplazamiento Relativo Máximo, Registros ‘PICA’.

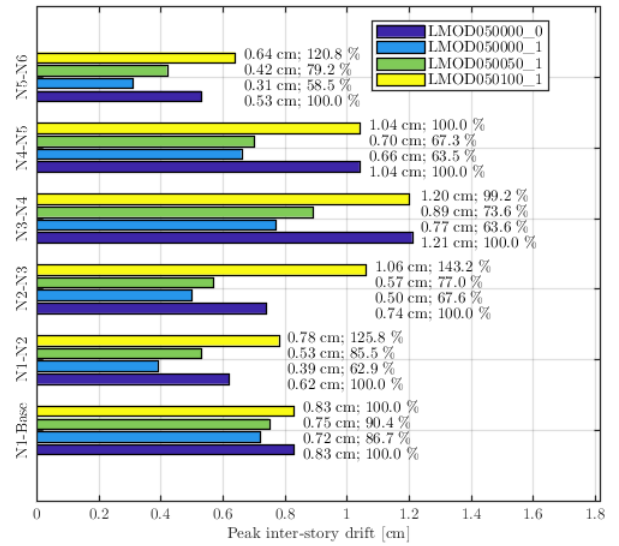


Figura 5-34: Gráfico de Desplazamiento Relativo Máximo, Registros ‘LMOD’.

La respuesta estructural experimental del corte máximo por nivel para cada configuración de registro son las siguientes:

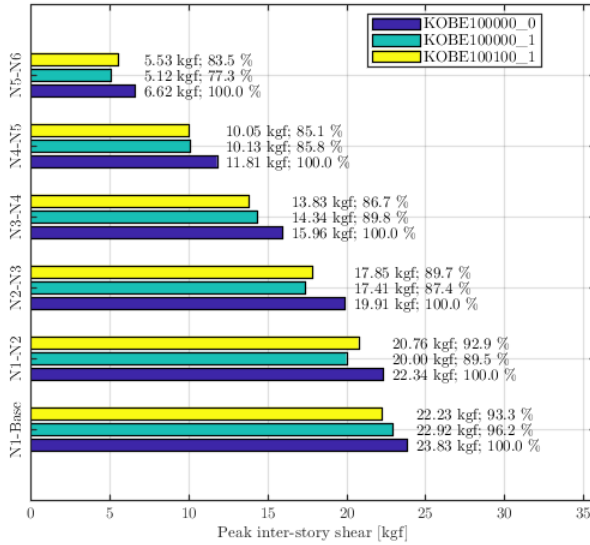


Figura 5-35: Gráfico de Corte Máximo por Nivel, Registros 'KOBE'.

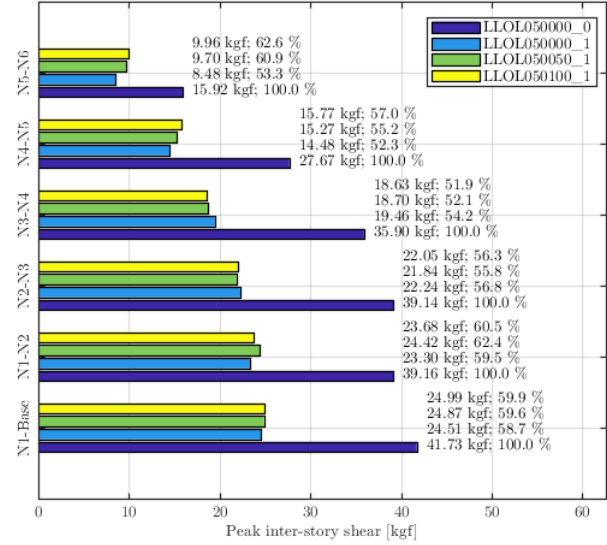


Figura 5-36: Gráfico de Corte Máximo por Nivel, Registros 'LLOL'.

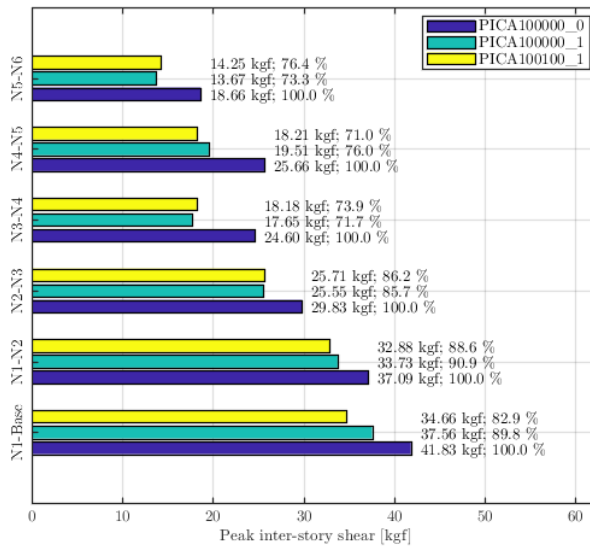


Figura 5-37: Gráfico de Corte Máximo por Nivel, Registros 'PICA'.

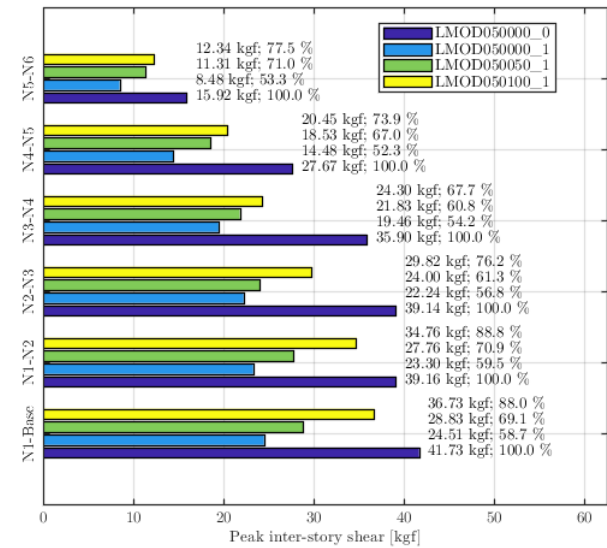


Figura 5-38: Gráfico de Corte Máximo por Nivel, Registros 'LMOD'.

La Intensidad de Housner para cada nivel y para cada configuración de registros son las siguientes:

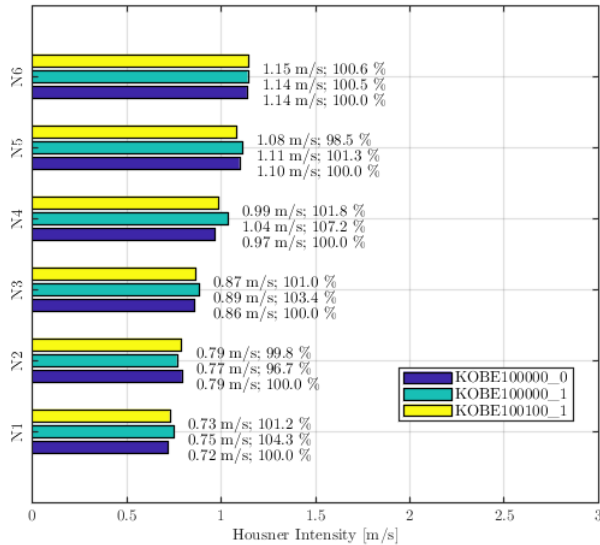


Figura 5-39: Gráfico de Intensidad de Housner por Nivel, Registros ‘KOBE’.

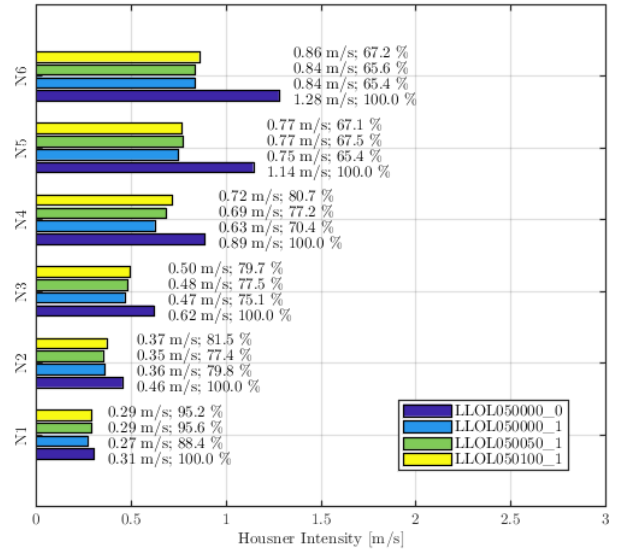


Figura 5-40: Gráfico de Intensidad de Housner por Nivel, Registros ‘LLOL’.

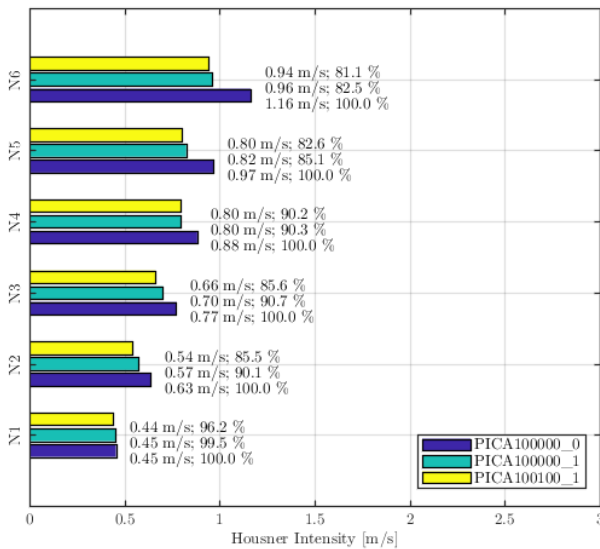


Figura 5-41: Gráfico de Intensidad de Housner por Nivel, Registros ‘PICA’.

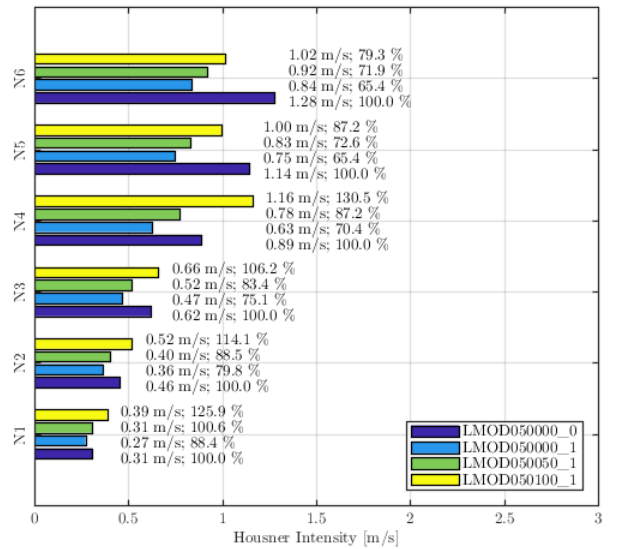


Figura 5-42: Gráfico de Intensidad de Housner por Nivel, Registros ‘LMOD’.

Capítulo 6

Modelo Estructura de 20 Niveles

6.1 Introducción

Con el fin de poder estudiar de manera teórica el comportamiento de una estructura con un periodo alto, se programa un modelo teórico que busca determinar la respuesta que tendría una estructura de 20 niveles frente a cada configuración de ensayo, concibiendo el modelo como un péndulo (en elevación) de 20 masas, que ahora al ser más alto posee un mayor brazo por lo que oscila más lentamente. Para esto, es necesario modelar la estructura en conjunto con el modelo que replica el comportamiento del DMS presentado en la sección 4.6.3, de esta manera ambos modelos interactúan entre sí en función de la aceleración que los solicitan.

El objetivo de esta tarea es poder estudiar el comportamiento y por lo tanto la pérdida de eficiencia del DMS al implementarse en una estructura de un periodo mayor, frente a registros que poseen una aceleración puramente horizontal y/o combinadas con sismo vertical.

6.2 Propiedades dinámicas del sistema

Para definir las propiedades dinámicas de la estructura, es necesario primeramente conocer su matriz de masa junto con su matriz de rigidez. La matriz de masa corresponde a la de un sistema de 20 grados de libertad, con una masa de valor unitario concentrada a la altura de cada nivel de la estructura (una matriz identidad de 20 filas y 20 columnas).

$$[M_p] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & & \\ 0 & 1 & 0 & & & \\ 0 & 0 & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 1 & 0 \\ & & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left[\text{kgf} \frac{\text{s}^2}{\text{m}} \right] \quad (6.1)$$

Por otra parte, la matriz de rigidez se determina en función del periodo que se le quiera otorgar a la estructura, resultando en la expresión:

$$[K_p] = 1.056 \cdot 10^4 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & & \\ -1 & 2 & -1 & & & \\ 0 & -1 & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & -1 & 0 \\ & & & & -1 & 2 & -1 \\ & & \dots & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (6.2)$$

A partir de las matrices de masa y de rigidez definidas, es posible obtener las propiedades dinámicas del modelo teórico. La frecuencia, periodo fundamental y tasa de amortiguamiento del modo fundamental de la estructura se presentan a continuación:

Tabla 6-1: Propiedades dinámicas del modelo estructura de 20 niveles.

ω_p [Hz]	T_p [seg]	ξ_p [%]
0.4	2.5	1.0

Para definir las propiedades dinámicas del DMS a implementar en esta estructura, se utilizan las expresiones presentadas en la sección 3.3.4, que determinan los valores óptimos de la razón de frecuencias entre el DMS y la estructura $f|_{OPT}$ (ecuación (3.44)), junto con la razón de amortiguamiento crítico del dispositivo $\xi_d|_{OPT}$ (ecuación (3.55)). Por otra parte, se le otorga al DMS una masa de $1 \text{ kgf} \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$, equivalente a un 5% de la masa total de la estructura.

Luego, el valor para $f|_{OPT}$, $\xi_d|_{OPT}$, junto con la frecuencia y periodo del DMS con los siguientes:

Tabla 6-2: Propiedades dinámicas DMS, estructura de 20 niveles.

$f _{OPT}$	ξ_d [%]	ω_d [Hz]	T_d [seg]
0.94	11.0	0.37	2.67

El dispositivo se modela como un péndulo simple, que posee una masa puntual ubicada en el extremo de una varilla inextensible de masa despreciable. Es decir, la masa puntual M ($1 \text{ kgf} \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$) corresponde a la masa total del dispositivo. Para determinar el radio de giro, se utiliza la ecuación (3.73) utilizando el valor del periodo óptimo del dispositivo (Tabla 6-2).

Para modelar la interacción entre los modelos de la estructura y del dispositivo, se calcula en cada intervalo de tiempo Δt (0.005 seg) la fuerza horizontal (en el eje X) que ejerce el DMS sobre el nivel superior de la estructura (sexto nivel), a partir de la ecuación (3.93) despreciando la masa de la varilla.

Para determinar la aceleración angular del dispositivo, se resuelve en forma numérica la ecuación de movimiento de la sección 3.4.3, obteniendo una solución mediante el Método Newton-Raphson especificado en la sección 4.7.1, considerando como entrada (tanto horizontal como vertical) el movimiento del sexto nivel de la estructura (posición donde se instala el DMS).

6.3 Ensayo del modelo

Para ensayar la estructura, se utilizan los registros definidos como Input en los ensayos realizados en laboratorio, presentados en la sección 5.2. Cada uno de estos registros fue obtenido a partir del sensor que registra la aceleración en la base de la estructura, al ingresar los registros presentados en la Tabla 4-7, asociados a los sismos presentados en la Tabla 4-6.

A continuación, se presenta la variación de aceleración del nivel superior de la estructura frente a tres escenarios: Sin DMS instalado, con DMS instalado frente a registro puramente horizontal, y con DMS instalado utilizando un registro que posee aceleración horizontal y vertical. Además, en el recuadro ubicado en la esquina superior derecha de cada gráfico se señala el valor máximo alcanzado para cada configuración.

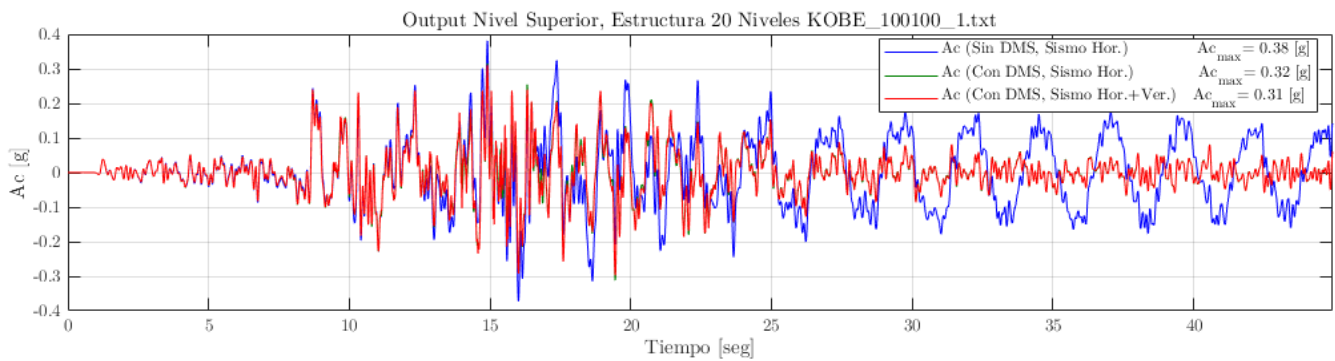


Figura 6-1: Output Nivel Superior, Estructura 20 Niveles KOBE_100100_1.

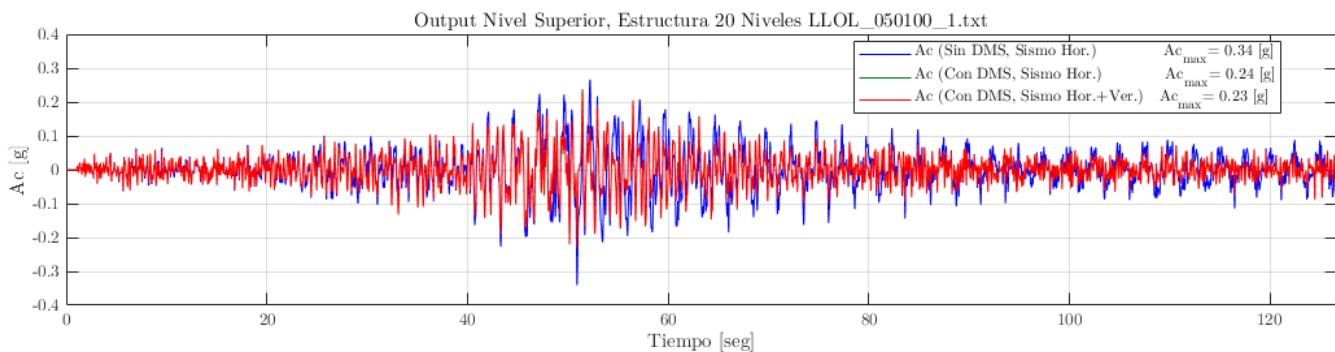


Figura 6-2: Output Nivel Superior, Estructura 20 Niveles LLOL_050100_1.

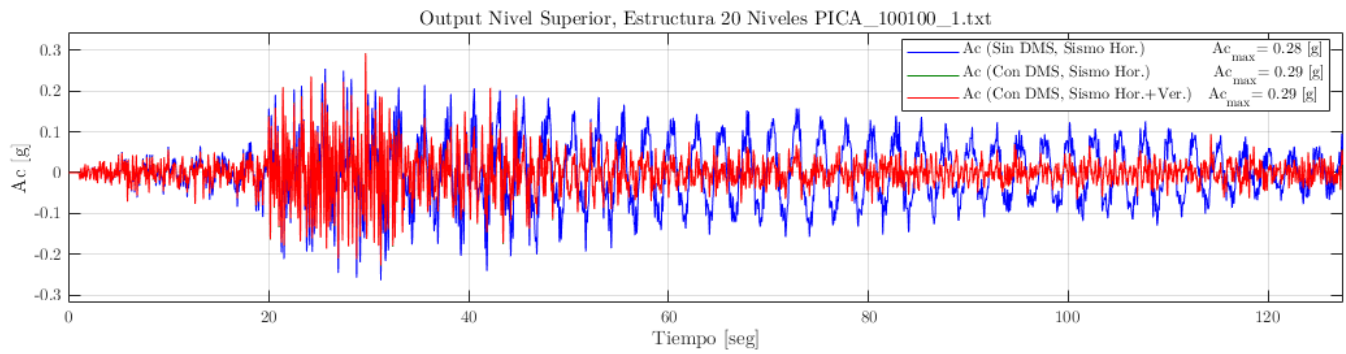


Figura 6-3: Output Nivel Superior, Estructura 20 Niveles PICA_100100_1.

A partir de los ensayos presentados anteriormente, se presenta el ángulo de giro del dispositivo frente a cada registro, considerando únicamente su componente horizontal, para luego incluir la componente vertical. Además, en el recuadro ubicado en la esquina superior derecha de cada gráfico se señala el valor máximo alcanzado para cada configuración.

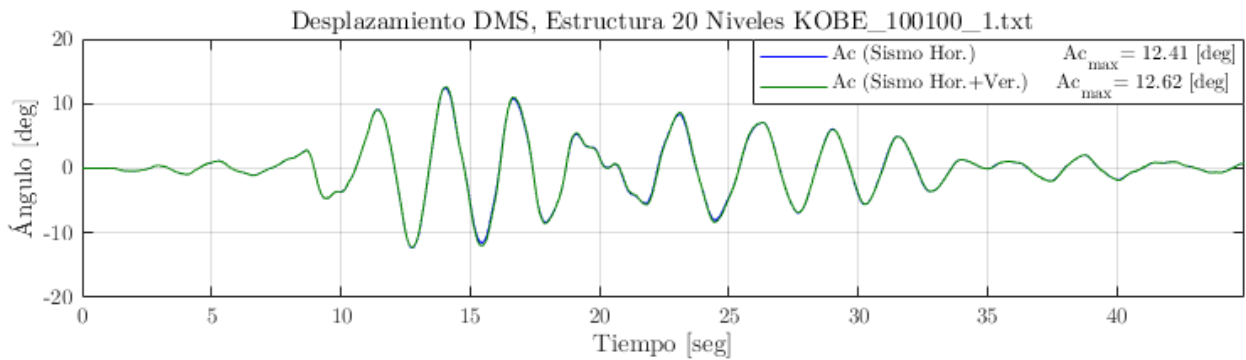


Figura 6-4: Desplazamiento DMS, Estructura 20 niveles KOBE_100100_1.

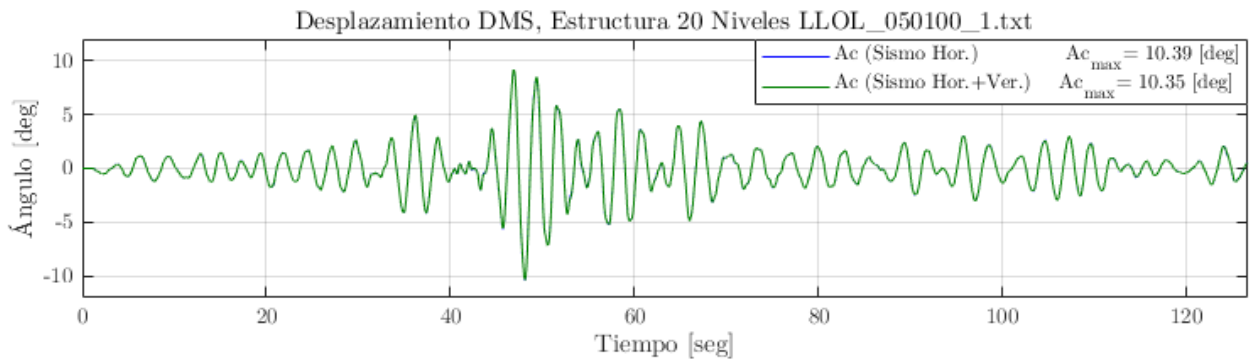


Figura 6-5: Desplazamiento DMS, Estructura 20 niveles LLOL_050100_1.

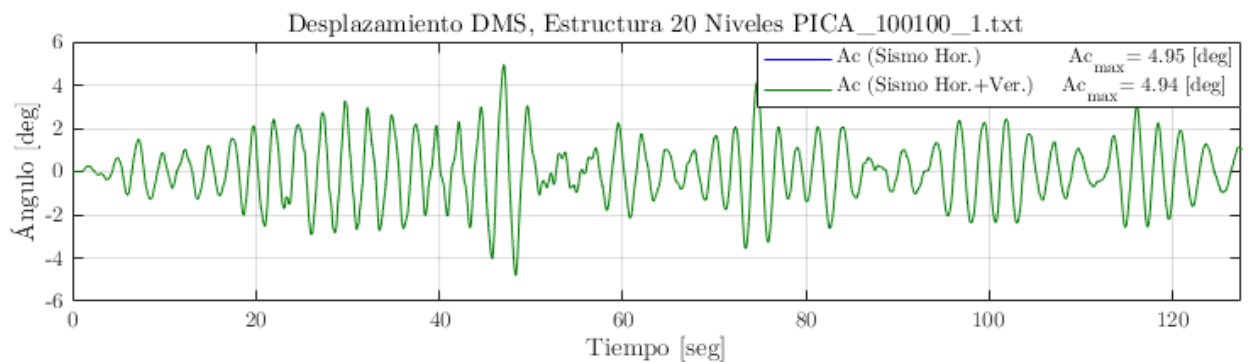


Figura 6-6: Desplazamiento DMS, Estructura 20 niveles PICA_100100_1.

Para estudiar la respuesta de distintas configuraciones del dispositivo al añadir la componente vertical del registro, se modela para diferentes tasas de amortiguamiento y periodo, los cuales varían en torno a los valores óptimos $T_d|_{OPT}$ y $\xi_d|_{OPT}$ calculados. Esto genera una matriz de ensayos para cada configuración de T_d y ξ_d , que se traduce en un gráfico 3D que define la zona en que el dispositivo trabaja de forma óptima reduciendo las demandas de la respuesta de la estructura.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de cada registro considerado (ver sección 4.5) donde en el plano x-y se obtiene la matriz para cada configuración de periodo y razón de amortiguamiento. Luego, la altura de cada punto de la figura (valor del eje Z) presenta la razón entre la aceleración máxima del nivel superior de la estructura al añadir la componente vertical del registro (Ac'), cuyas características quedan determinadas por su posición en el plano x-y, y la respuesta al utilizar únicamente la componente horizontal (Ac).

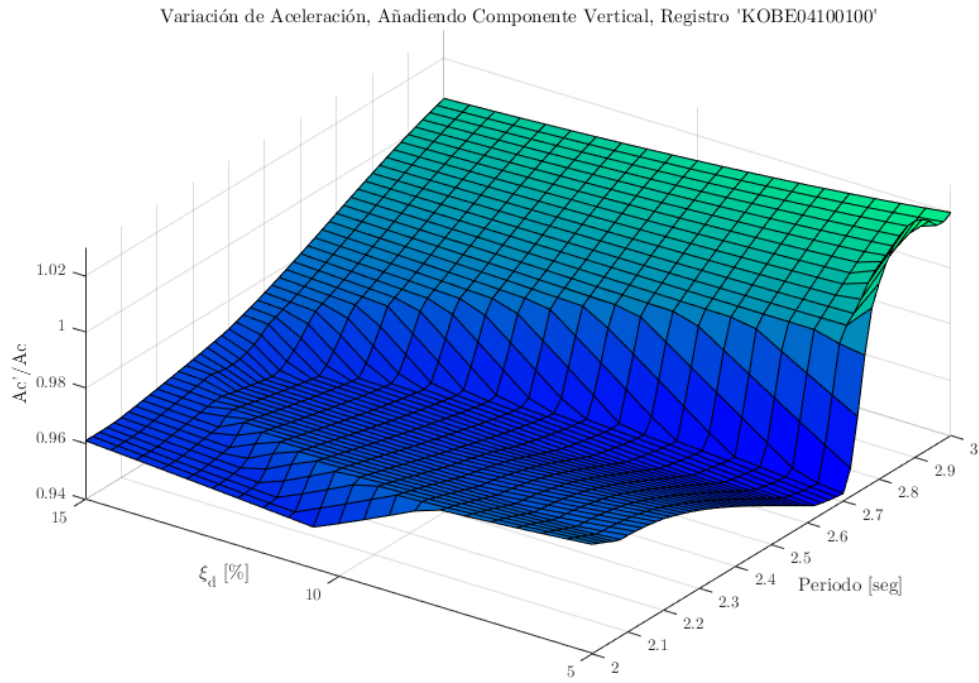


Figura 6-7: Variación de Aceleración, Añadiendo Componente Vertical,

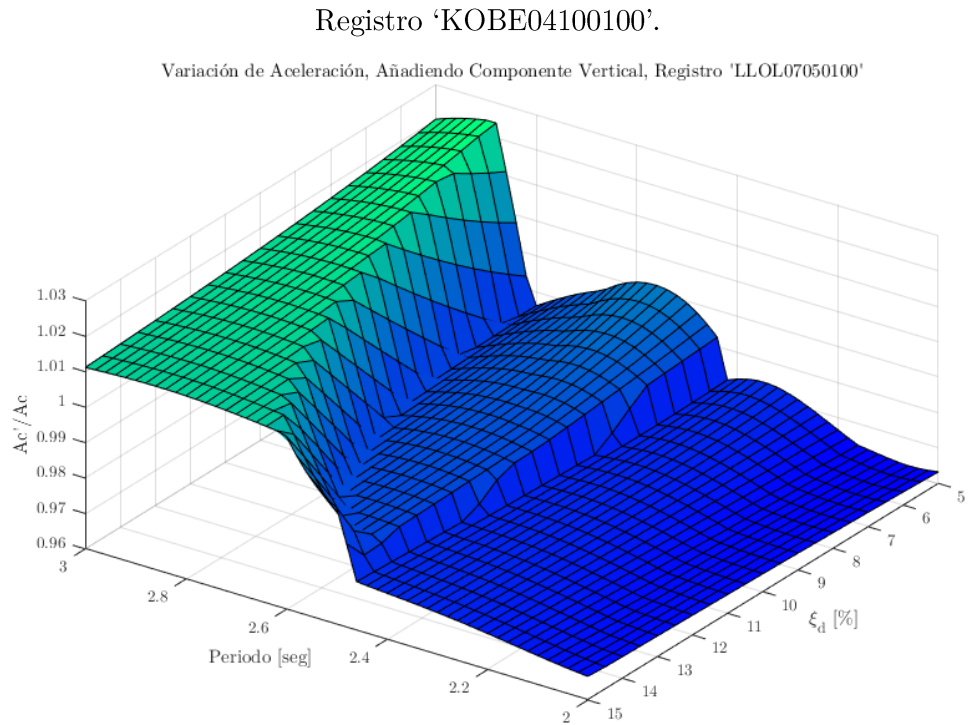


Figura 6-8: Variación de Aceleración, Añadiendo Componente Vertical,
Registro 'LLOL07050100'.

Variación de Aceleración, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'PICA06100100'

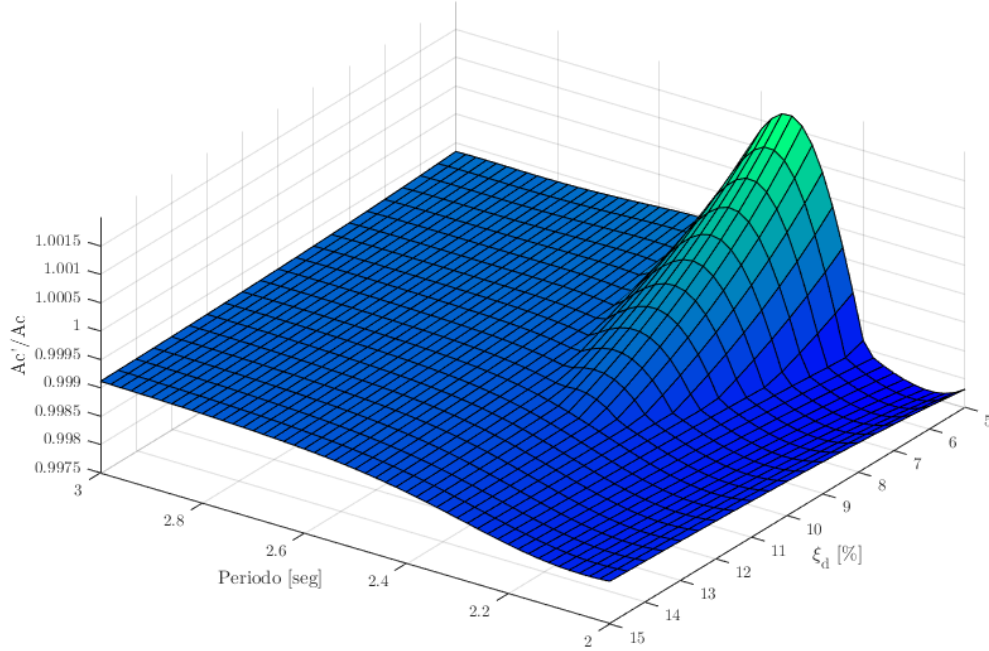


Figura 6-9: Variación de Aceleración, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'PICA06100100'.

De igual manera se obtienen los gráficos que representan la variación del corte basal de la estructura y del desplazamiento relativo del primer nivel, añadiendo o no la componente vertical del registro, frente a las distintas configuraciones de ensayo. Sin embargo, dichas figuras son añadidas en la sección Anexos.

A partir de los gráficos presentados, considerando un DMS con los parámetros óptimos de diseño, y comparando la respuesta frente al mismo registro (con aceleración horizontal únicamente), es posible observar una disminución de la aceleración máxima de la estructura para los casos de Kobe y Llolleo, donde la reducción fue de un 15.8% (Figura 6-1) y 29.4% (Figura 6-2) respectivamente. Sin embargo, en el caso de Pica, al implementar el DMS se produjo un aumento de la aceleración máxima de un 3.6% (Figura 6-3).

Comparando la respuesta de la estructura frente a un sismo puramente horizontal, y uno que posee aceleración en ambas direcciones (horizontal y vertical), es posible observar que, en el caso de Pica, no existe variación de la aceleración máxima de la estructura. Luego, en los casos de Kobe y Llolleo, la inclusión de una aceleración vertical del registro genera una disminución (aproximadamente un 4%) de la aceleración máxima en la respuesta de la estructura.

Luego, al analizar de manera general el efecto del sismo vertical en una estructura de estas características, implementando un DMS con diferentes propiedades dinámicas (configuraciones de T_d y ξ_d), es posible afirmar que en torno a los valores óptimos de diseño del dispositivo, la inclusión del sismo vertical no afecta considerablemente el desempeño de este y por lo tanto la respuesta de la estructura (variación de aceleración máxima del nivel superior). Esto ya que a partir de los registros donde el DMS era más eficiente la variación no es más de un $\pm 4\%$ (Figura 6-7, Figura 6-8 y Figura 6-9), mientras que en Pica la variación es prácticamente nula.

Capítulo 7

Análisis de Resultados y Conclusiones

7.1 Conclusiones

A partir de los análisis experimentales, las principales conclusiones se presentan resumidas en los siguientes puntos:

En cada uno de los casos ensayados es posible identificar una disminución de aceleración máxima al usar el DMS, obteniendo una aceleración máxima en la estructura menor con el dispositivo instalado que sin él. Se obtiene una reducción mínima en el caso de Kobe con un 3,1% dado que es un registro del tipo impulsivo (caracterizado por un pulso de excitación) (Figura 5-27) y una reducción de aceleración máxima considerable en el caso de Llolleo con un 37,6% (Figura 5-28).

En cada uno de los casos ensayados con DMS, es posible identificar un aumento de aceleración máxima al incrementar la componente vertical del sismo. Siendo considerable en el caso de Llolleo Modificado (señal vertical monofrecuencial), donde aumentó un 43% con respecto al sismo puramente horizontal. De esta manera es posible inferir que si la componente vertical tiene alta energía en los periodos fundamentales de la estructura puede afectar significativamente su respuesta y la del dispositivo. En otras palabras, el sismo vertical ocasiona que el dispositivo presente una respuesta filtrada de la entrada vertical (al ser susceptible a este movimiento) la cual puede generar una carga que se amplifica en la estructura si la componente vertical coincide con la frecuencia de la estructura.

Si bien en cada uno de los ensayos realizados es posible observar que la componente vertical del sismo afecta la eficiencia del DMS, de manera que aumenta la aceleración máxima de la estructura, esta aceleración no supera la medida en los ensayos donde no se ha implementado el DMS. Por lo que, en términos de aceleración, para cada uno de los casos analizados experimentalmente en este trabajo, la implementación del DMS es siempre favorable independiente del aumento de la componente vertical del registro a ensayar.

Para los sismos de Llolleo y Llolleo Modificado, es posible observar una disminución del desplazamiento relativo entre pisos al implementar el DMS (Figura 5-28 y Figura 5-30). Esto indicaría que en los sismos que no poseen una característica impulsiva, es decir una larga duración (porque no tienen energía significativa en el rango de frecuencias de la estructura en su componente vertical) no se observaría una reducción de la eficiencia del DMS. Luego, al incorporar una componente vertical del sismo, estos valores aumentan. En los sismos de Pica y Kobe, tanto al implementar el DMS como al aumentar la

componente vertical del sismo, no se observa una variación considerablemente o tendencia en el aumento de los desplazamientos relativos de entre piso de la estructura (Figura 5-31 y Figura 5-33).

Para los registros de Lolloe y Lolloe Modificado, la Intensidad de Housner disminuye considerablemente al implementar el DMS, para luego aumentar al intensificar la componente vertical del sismo (Figura 5-40 y Figura 5-42). Sin embargo, para el caso de Pica, el DMS genera una disminución, pero el sismo vertical no influye de manera considerable (Figura 5-41). Para Kobe, ni la implementación del DMS ni el aumento de la componente vertical del sismo genera una variación considerable (Figura 5-39).

Si bien en cada configuración de ensayo el dispositivo generó una disminución de la aceleración máxima registrada de la estructura, la diferencia entre los distintos registros es considerable. De esta manera es posible afirmar que el DMS pierde efectividad en casos donde estuvo sujeto a sismos de larga duración (como los inducidos por fuentes subductivas) y cuando los registros verticales tienen un contenido de frecuencia cercano al de la estructura o al del dispositivo (ya que modifican la respuesta del dispositivo). Por otra parte, queda en evidencia que el sistema de sujeción en que se encuentre un DMS puede jugar un rol relevante ya que puede amplificar o desamplificar las entradas sísmicas verticales del dispositivo, implicando que la respuesta de un DMS susceptible al movimiento vertical puede ver afectada significativamente su respuesta y eficiencia.

Al analizar la respuesta de un modelo teórico de 20 niveles, es posible observar que, al añadir la componente vertical del registro, la variación de la aceleración máxima de la estructura es prácticamente nula para los casos de Kobe y Lolloe, donde la reducción de aceleración máxima al implementar el DMS fue de un 15.8% y 29.4% respectivamente. Mientras que, en el caso de Pica, tanto la implementación del DMS como la aceleración vertical del registro no produjo variaciones considerables en la respuesta de la estructura.

Si bien el modelo del péndulo de la estructura de 20 niveles considera grandes deformaciones, al poseer un mayor periodo (por lo tanto, un mayor radio de giro) y una mayor tasa de amortiguamiento, el ángulo máximo alcanzado por el dispositivo disminuye. En este caso se tendrá que el efecto del sismo vertical pierde incidencia, y su efecto (considerando $\ddot{u}_v \text{ sen } \theta$) sería menor que el efecto del sismo horizontal ($\ddot{u}_h \text{ cos } \theta$). Adicionalmente, las componentes verticales están asociadas a movimientos de altas frecuencias y por tanto no tendría un efecto significativo en la respuesta ni del dispositivo ni de la estructura. Por otra parte, la componente horizontal se ve amplificada por la respuesta estructural, implicando que para el DMS no habría un efecto importante de la componente vertical.

A continuación, se presentan observaciones acerca de la metodología utilizada y recomendaciones respecto futuros estudios del tema:

Si bien la estructura utilizada fue modificada para amplificar su periodo, sería útil realizar un trabajo experimental donde se analice el comportamiento de una estructura con un periodo mayor, como por ejemplo una estructura más alta. Si en este escenario se utilizaran registros verticales con un contenido de frecuencia cercano al de la estructura o al del dispositivo, se esperaría observar una mayor pérdida de eficiencia de éste. De esta manera, el objetivo de dicho trabajo sería verificar esta afirmación. Por otra parte, trabajar con registros de baja frecuencia permite una reproducción más precisa por parte de la mesa vibradora MOOG, presentando un menor nivel de ruido.

Al configurar el DMS para frecuencias altas, esto es, calibrar el radio de giro de la masa en torno a un valor pequeño determinado, el error porcentual aumenta, debido al nivel de precisión que requiere el mecanismo para obtener dicha distancia (en otras palabras, pequeños errores al ajustar el radio de giro implican variaciones considerables en la frecuencia del DMS). De esta manera, si se requiere implementar un dispositivo de estas características con una frecuencia más baja, y por lo tanto más preciso, es necesario controlar una estructura cuyo periodo fundamental sea mayor. Por otra parte, simplificaría el proceso de obtención de datos un mecanismo capaz de obtener directamente la fuerza que ejerce el dispositivo sobre la estructura, al implementar en laboratorio un sensor de fuerza tracción-compresión.

La disipación de energía producto del amortiguamiento viscoelástico o por el arrastre con el aire se ve altamente modificado a través del tiempo, ya sea por una característica aleatoria y también por la respuesta misma de la estructura. Es por esto que es recomendable diseñar un sistema capaz de ajustar de manea precisa la tasa de amortiguamiento que posee el DMS, de manera de definir con mayor precisión su comportamiento y por lo tanto la eficiencia con la que trabaja. De esta manera sería posible identificar y definir con mayor precisión la región óptima de parámetros del DMS de acuerdo con el modelo y las figuras presentadas en la sección 4.6.3.

Bibliografía

- Torres Petronas - Ficha, Fotos y Planos - WikiArquitectura. (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2020, de <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/torres-petronas/>
- Akashi Kaikyo Bridge | Roads & Bridges. (s. f.). Recuperado 20 de marzo de 2020, de <https://www.roadsbridges.com/akashi-kaikyo-bridge>
- Boroschek, R., Comte, D., Soto, P., & Leon, R. (2006). Registros del Terremoto de Tarapacá. *Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería civil*.
- Brock, E. J. (1946). A Note on the Damped Vibration Absorber. *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 13(4), A-284.
- Chapple, P. C. (2008). Edificio Parque Araucano Gigante Tecnológico.
- COSMOS: Data Plot Port Island, Japan Kobe. (s. f.). Recuperado 22 de marzo de 2020, de <https://strongmotioncenter.org/vdc/scripts/plot.plx?stn=4047&evt=1098>
- Crandall, S. H. & Mark, W. D. (1973). Random Vibration in Mechanical Systems. (*Academic P*). New York.
- CTBUH | CTBUH HEIGHT CRITERIA. (s. f.). Recuperado 8 de julio de 2020, de <https://www.ctbuh.org/resource/height>
- Den Hartog, J. P. (1956). Mechanical vibrations. *Ney York: McGraw-Hill*.
- Díaz, P. A. (2018). *Análisis de Estructuras Aisladas con el Método de Múltiples Sub-*

Estructuras. Universidad de Chile.

Frahm, H. (1909). Devices for Damping vibrations of bodies.

Garrido, B. (2016). *Amortiguadores de masa sintonizada en edificios sometidos a registros sísmicos en Chile*. Universidad de Chile.

Guan-Cheng Lin, T., & Hsiang-Chuan. (1993). Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.

Hernández, F. J. (2009). Análisis de métodos de identificación de variación de propiedades dinámicas. *Tesis.Uchile.Cl. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil*.

Housner, G. W. (1952). Spectrum Intensities of Strong-Motion Earthquakes. *Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures*, 20–36.

Ibrahim, & R., S. (1977). A method for the direct identification of vibration parameter from the free responses. *Shock and Vibration Bulletin*, 47(4).

Japan Guide | Kobe Travel: Akashi Kaikyo Bridge. (s. f.). Recuperado 17 de julio de 2020, de <https://www.japan-guide.com/e/e3559.html>

Joshi, A. S., & Jangid, R. S. (1997). Optimum parameters of multiple tuned mass dampers for base-excited damped systems. *Journal of Sound and Vibration*.

Kistler Instruments Corporation. (s. f.). 8310A K-Beam ® Capacitive Accelerometers, 1–2. Recuperado de www.kistler.com

KOBE EARTHQUAKE OF 1995 | Facts and Details. (s. f.). Recuperado 22 de marzo de 2020, de <http://factsanddetails.com/japan/cat26/sub160/item863.html>

Lewis, R. (2017). Taipei 101 | building, Taipei, Taiwan | Britannica. Recuperado 9 de julio de 2020, de <https://www.britannica.com/place/Taipei-101>

Lim, Y. (1994). Problems and Solutions on Mechanics. *World Scientific*.

MITSUI FUDOSAN | Corporate Information | News Releases. (2013). Recuperado 20 de marzo de 2020, de <https://www.mitsuifudosan.co.jp/english/corporate/news/2013/0729/index.html>

- Moog Inc. (2008). 6DOF2000E Motion System User's Manual.
- Murudi, M. M., & Mane, S. M. (2004). Seismic Effectiveness of Tuned Mass Damper (TMD) for Different Ground Motion Parameters. *13 th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, (2), 1–8.
- National Instruments. (2020). ¿Qué es la adquisición de datos? Recuperado 23 de marzo de 2020, de <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- Newmark, N. M. (1959). A Method of Computation for Structural Dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 85(3), 67–94.
- Nishitani, A. (2019). Structural control: Then and now. *Japan Architectural Review*, 2(3), 217–218. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12097>
- Ordaz, M., Miranda, E., & Reinoso, E. (2000). Seismic loss estimation model for Mexico City. *12 World Conferences on Earthquake Engineering (WCEE)*, 12, 1–8. <https://doi.org/10.1021/la303796r>
- Ormondroyd, J., & Den Hartog, J. P. (1928). The Theory of the Dynamic Vibration Absorber. *Trans., ASME, Applied Mechanics*, 50, 9–22.
- Pastor, M., Binda, M., & Harčarik, T. (2012). Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48, 543–548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>
- Pastor Villalpando, P. (2019). *Identificación Experimental de Daño en Estructuras a través del Principio de Máxima Entropía e Información Mutua*. Universidad de Chile.
- Petronas Twin Towers > ENGINEERING.com. (s. f.). Recuperado 20 de marzo de 2020, de <https://www.engineering.com/Blogs/tabid/3207/ArticleID/72/Petronas-Twin-Towers.aspx>
- Revista EMB Construcción - PROTECCIÓN SÍSMICA DE ESTRUCTURAS: Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. (2012). Recuperado 6 de mayo de 2020, de <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=2495&ni=proteccion-sismica-de-estructuras-sistemas-de-aislacion-sismica-y-disipacion-de-energia>
- Root of nonlinear function - MATLAB fzero. (s. f.). Recuperado 16 de mayo de 2020, de <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fzero.html>
- Rozas, L. (2009). *Reducción De La Respuesta Estructural Por Medio Del Uso De*

Disipadores De Masa Sintonizada Y Disipadores De Columna Líquida Sintonizada.

Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. W., & Chung, R. M. (1997). A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.

Shinjuku Park Tower, Tokyo | 104943 | EMPORIS. (s. f.). Recuperado 17 de julio de 2020, de <https://www.emporis.com/buildings/104943/shinjuku-park-tower-tokyo-japan>

SHINJUKU PARK TOWER | SHINJUKU PARK TOWER : ABOUT. (s. f.). Recuperado 20 de marzo de 2020, de <https://www.shinjukuparktower.com/en/about/spt.html>

The International Appraiser: Objective valuation advice on international real estate: Mitsui Fudosan and Shuwa Investments: Then and Now. (2012). Recuperado 17 de julio de 2020, de <https://www.internationalappraiser.com/2012/11/mitsui-fudosan-then-and-now.html>

The mechanism and applications of a Tuned Mass Damper (TMD) | Brewer Smith Brewer Group. (2017). Recuperado 20 de marzo de 2020, de <https://bsbgroup.com/blog/the-mechanism-and-applications-of-tuned-mass-damper-tmd>

The Tower of Taipei 101 | Civil Engineering Forum. (s. f.). Recuperado 17 de julio de 2020, de <http://www.civilengineeringforum.me/the-tower-of-taipei-101/>

Tjalling, J. (1995). Historical development of the newton-raphson. *SIAM Review*, 37(4), 531–551.

Tuned Mass Damper of Taipei 101 – Taipei, Taiwan - Atlas Obscura. (s. f.). Recuperado 20 de marzo de 2020, de <https://www.atlasobscura.com/places/tuned-mass-damper-of-taipei-101>

Van Overschee, P., & Do Moor, B. (1996). *Subspace Identification for Linear Systems*. Katholieke Universiteit Leuven.

Warburton, G. B. (1982). Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.

Zuo, L., & Nayfeh, S. A. (2004). Minimax optimization of multi-degree-of-freedom tuned-mass dampers. *Journal of Sound and Vibration*.

Anexos

A.1 Modelo Estructura de 20 Niveles

A.1.1 Razón de Variación, Drift Primer Nivel

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de cada registro considerado (ver sección 4.5), donde altura de cada punto de la figura (valor del eje Z) presenta la razón entre el desplazamiento relativo del primer nivel de la estructura al añadir la componente vertical del registro (Drift') (cuyas características T_d y ξ_d quedan determinadas por su posición en el plano x-y), y la respuesta al utilizar únicamente su componente horizontal (Drift).

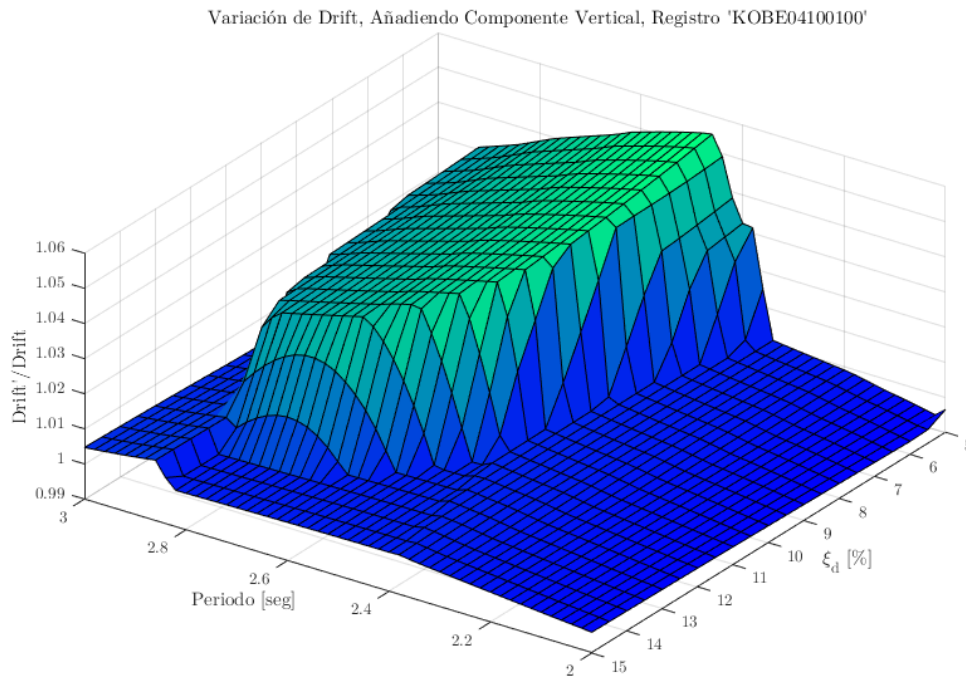


Figura 0-1: Variación de Drift, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'KOBEO4100100'.

Variación de Drift, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'LLOL07050100'

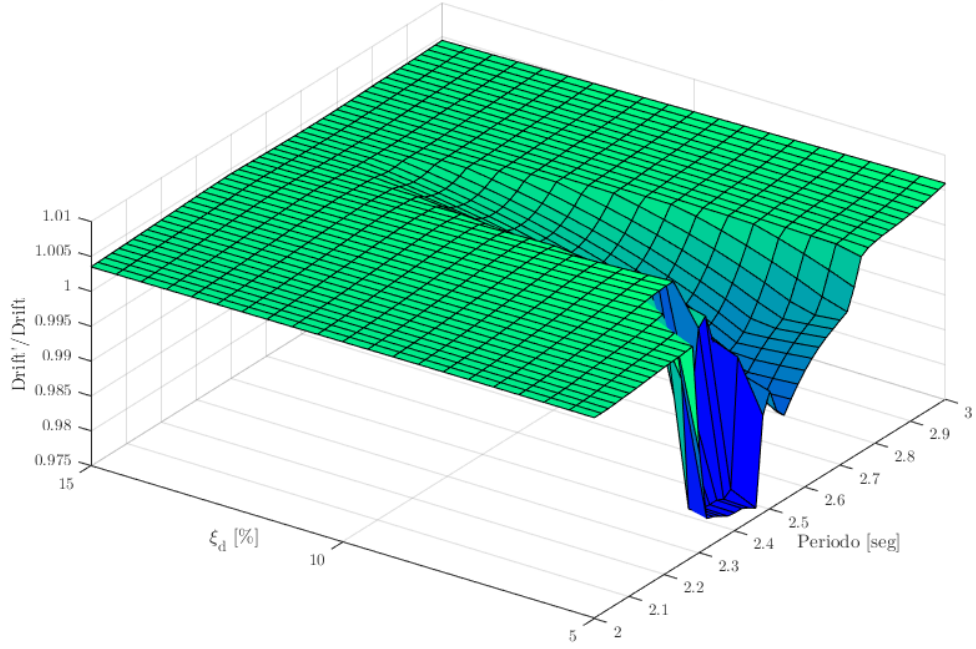


Figura 0-2: Variación de Drift, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'LLOL07050100'.

Variación de Drift, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'PICA06100100'

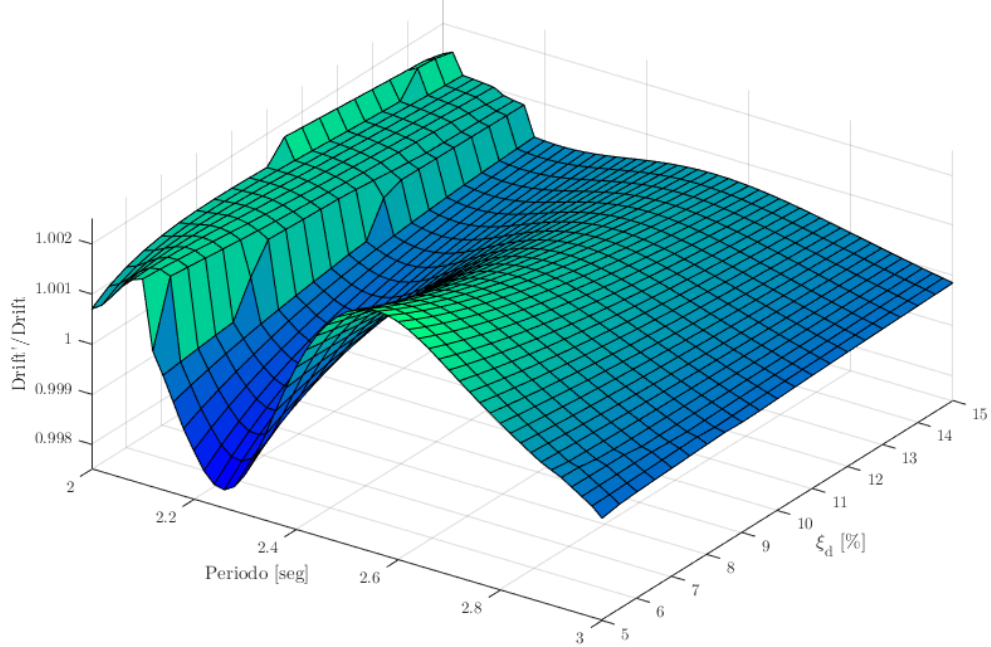


Figura 0-3: Variación de Drift, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'PICA06100100'.

A.1.2 Razón de Variación, Corte Basal

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de cada registro considerado (ver sección 4.5), donde altura de cada punto de la figura (valor del eje Z) presenta la razón entre el corte basal de la estructura al añadir la componente vertical del registro (Q_b') (cuyas características T_d y ξ_d quedan determinadas por su posición en el plano x-y), y la respuesta al utilizar únicamente su componente horizontal (Q_b).

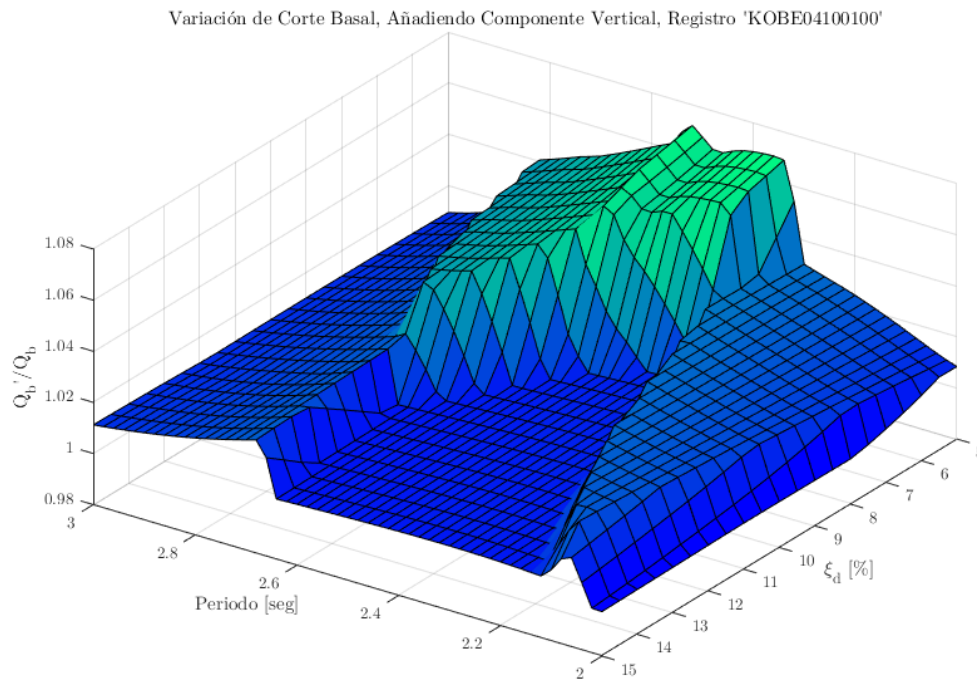


Figura 0-4: Variación de Corte Basal, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'KOBEO4100100'.

Variación de Corte Basal, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'LLOL07050100'

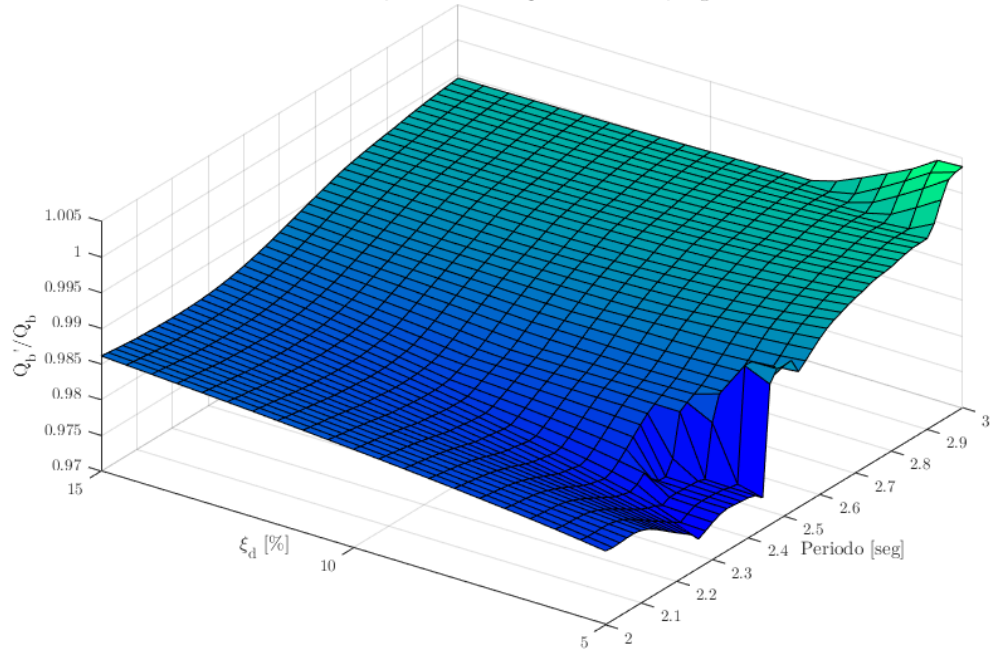


Figura 0-5: Variación de Corte Basal, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'LLOL07050100'.

Variación de Corte Basal, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'PICA06100100'

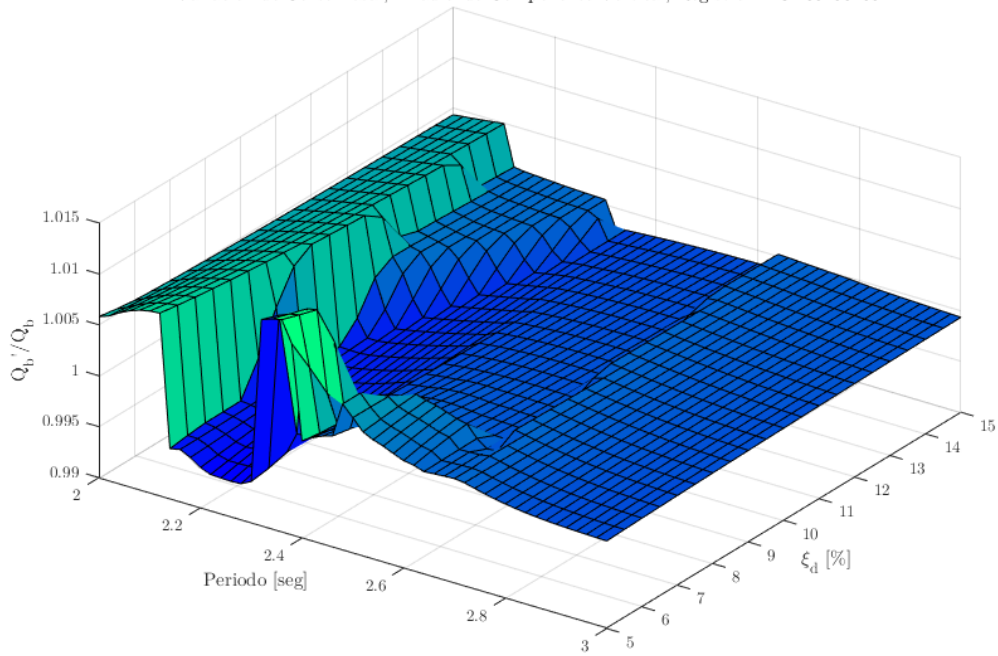


Figura 0-6: Variación de Corte Basal, Añadiendo Componente Vertical, Registro 'PICA06100100'.

A.2 Razón de reducción por configuración de parámetros del DMS

A.2.1 Razón de Reducción, Registros 'KOBE'

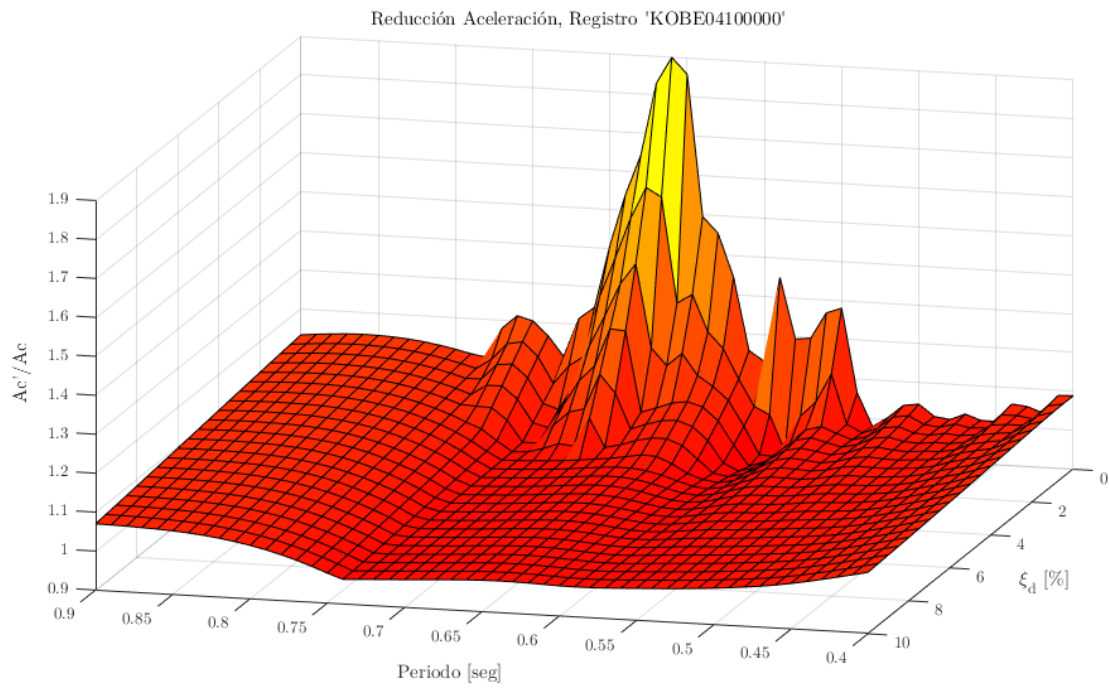


Figura 0-7: Razón de Reducción de Aceleración, Registro 'KOBE04100000'.

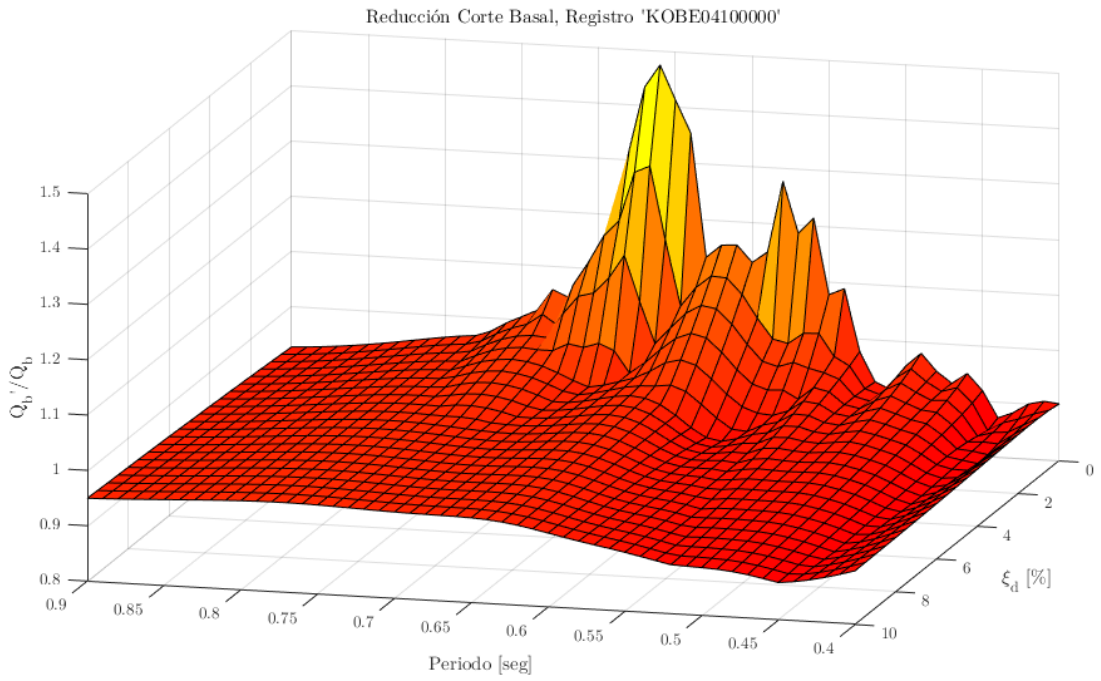


Figura 0-8: Razón de Reducción de Corte Basal, Registro 'KOBEO4100000'.

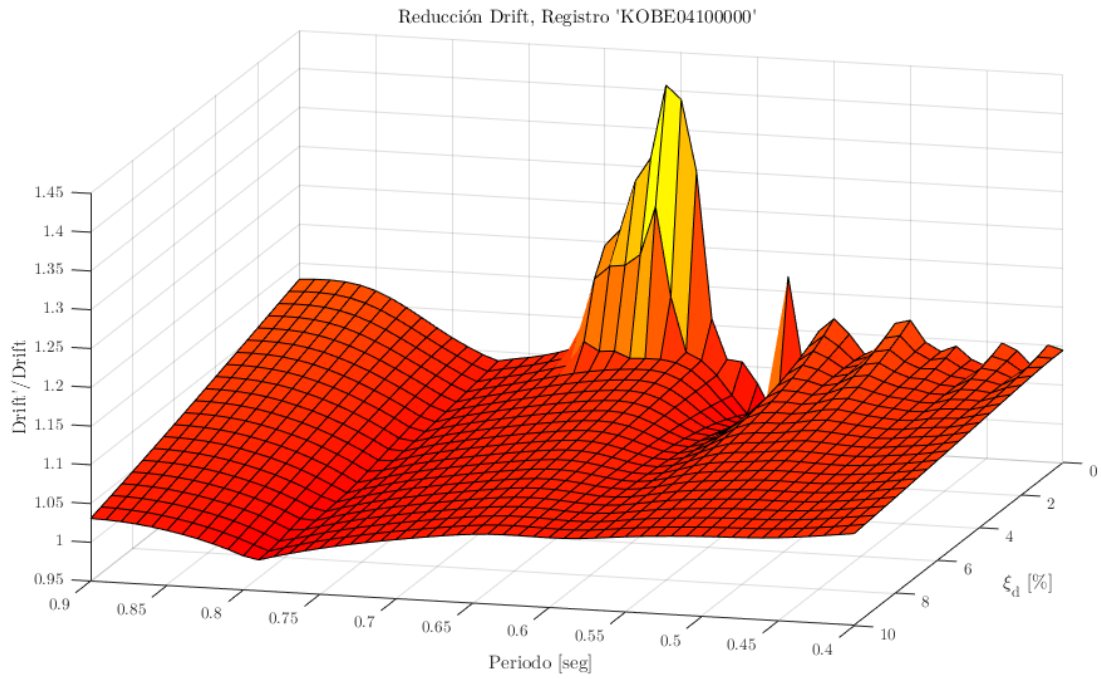


Figura 0-9: Razón de Reducción de Desplazamiento, Registro 'KOBEO4100000'.

A.2.2 Razón de Reducción, Registros 'PICA'

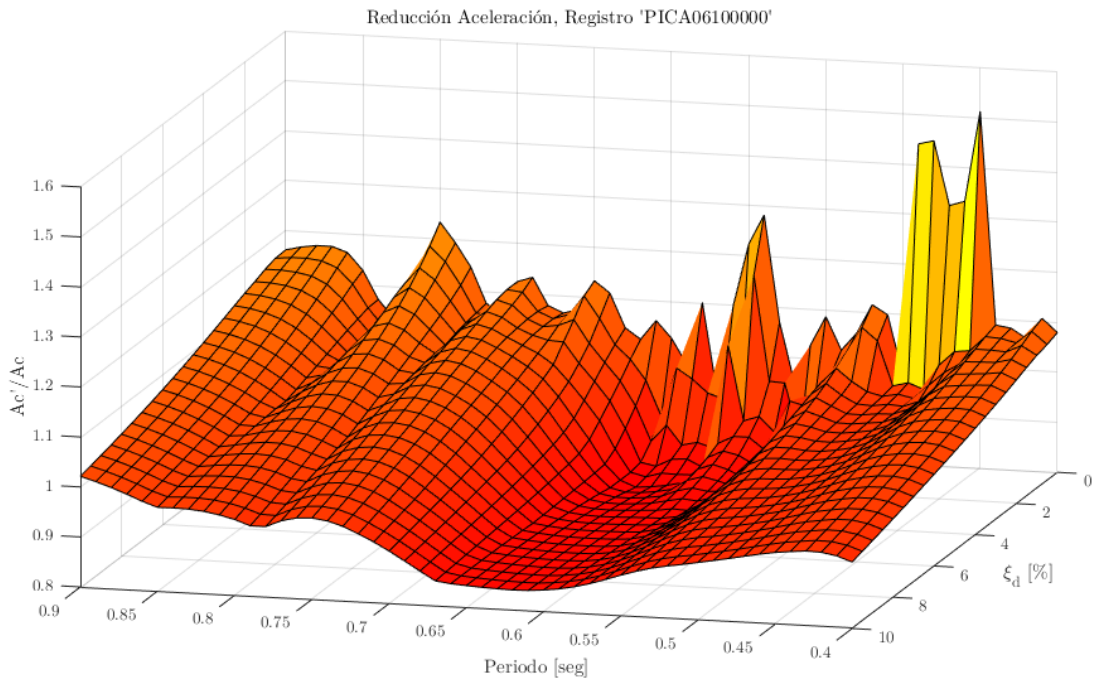


Figura 0-10: Razón de Reducción de Aceleración, Registro 'PICA06100000'.

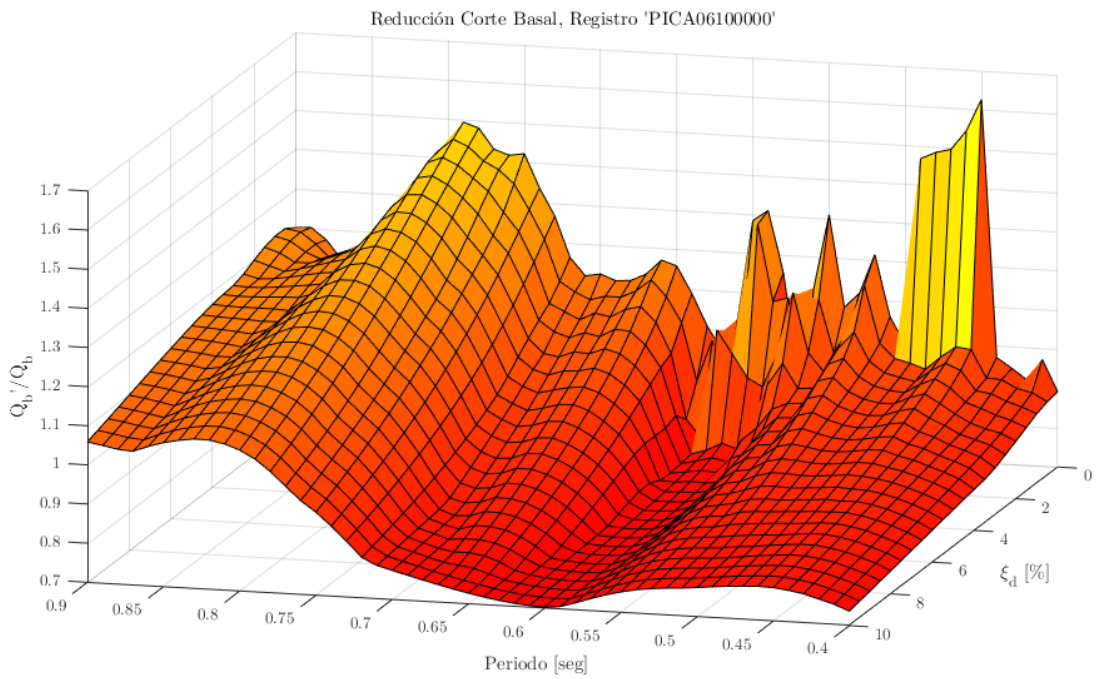


Figura 0-11: Razón de Reducción de Corte Basal, Registro 'PICA06100000'.

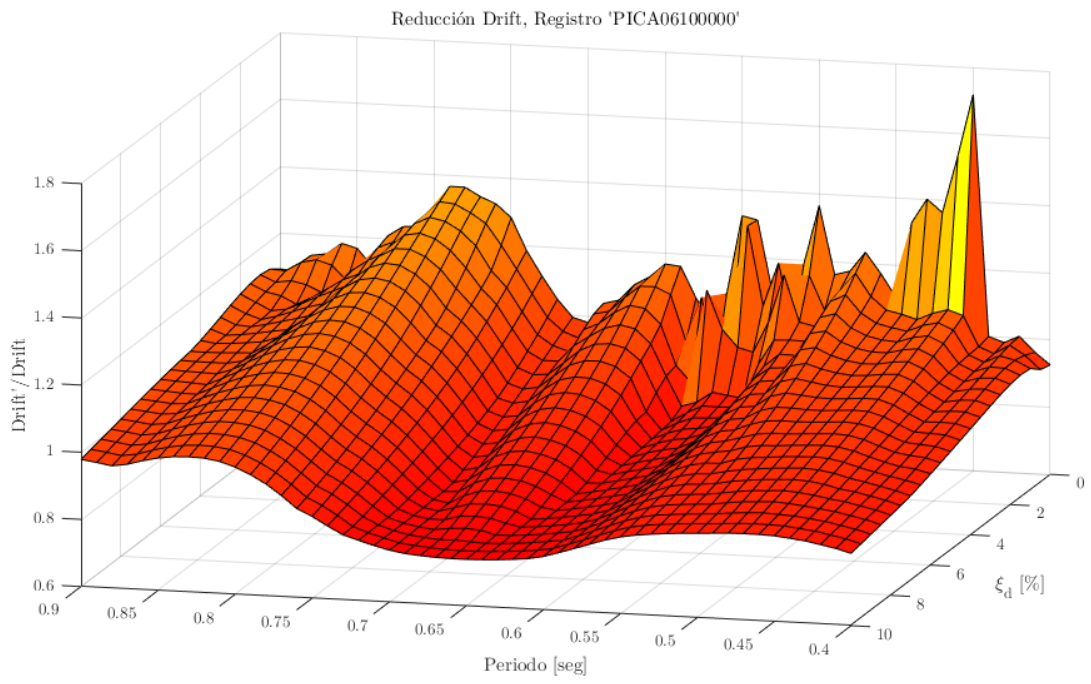


Figura 0-12: Razón de Reducción de Desplazamiento, Registro 'PICA06100000'.

A.3 Output e Input, Ensayo Experimental

A.3.1 Output e Input, Registros 'KOBE'

Respuesta del sistema para Registro 'KOBE', Componente Horizontal al 100%, Componente Vertical al 0%. Sin DMS:

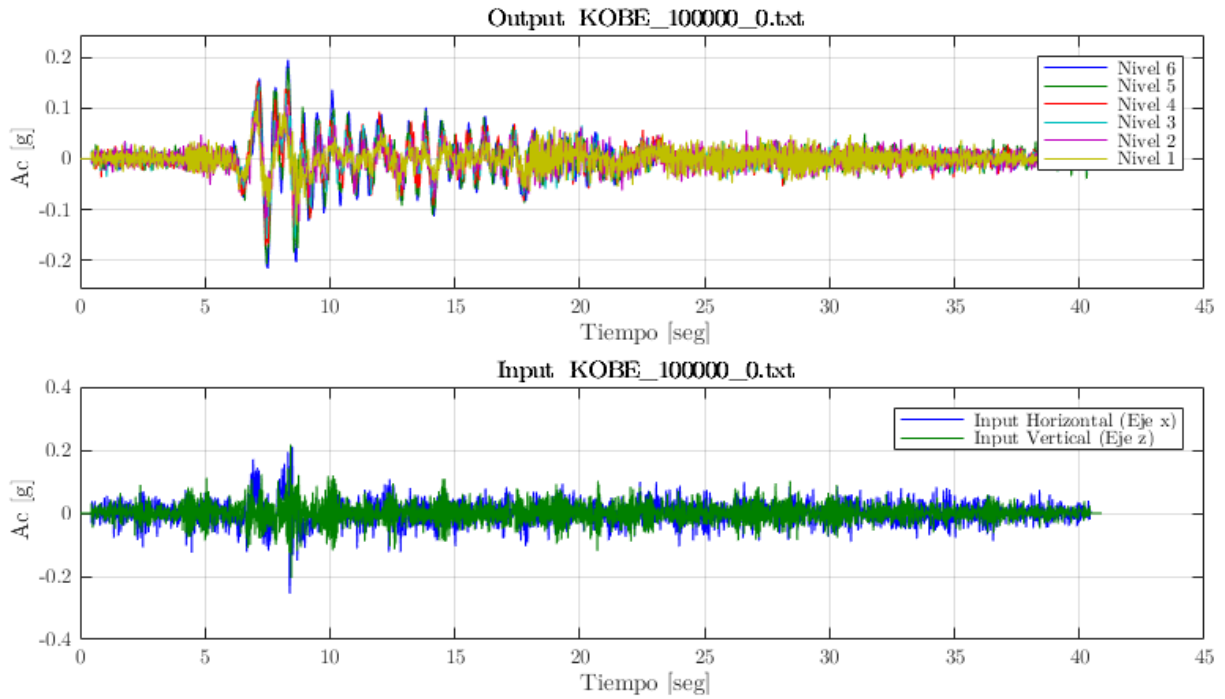


Figura 0-13: Output e Input, Registro 'KOBE_100000_0'.

Respuesta del sistema para Registro 'KOBÉ', Componente Horizontal al 100%, Componente Vertical al 0%. DMS instalado:

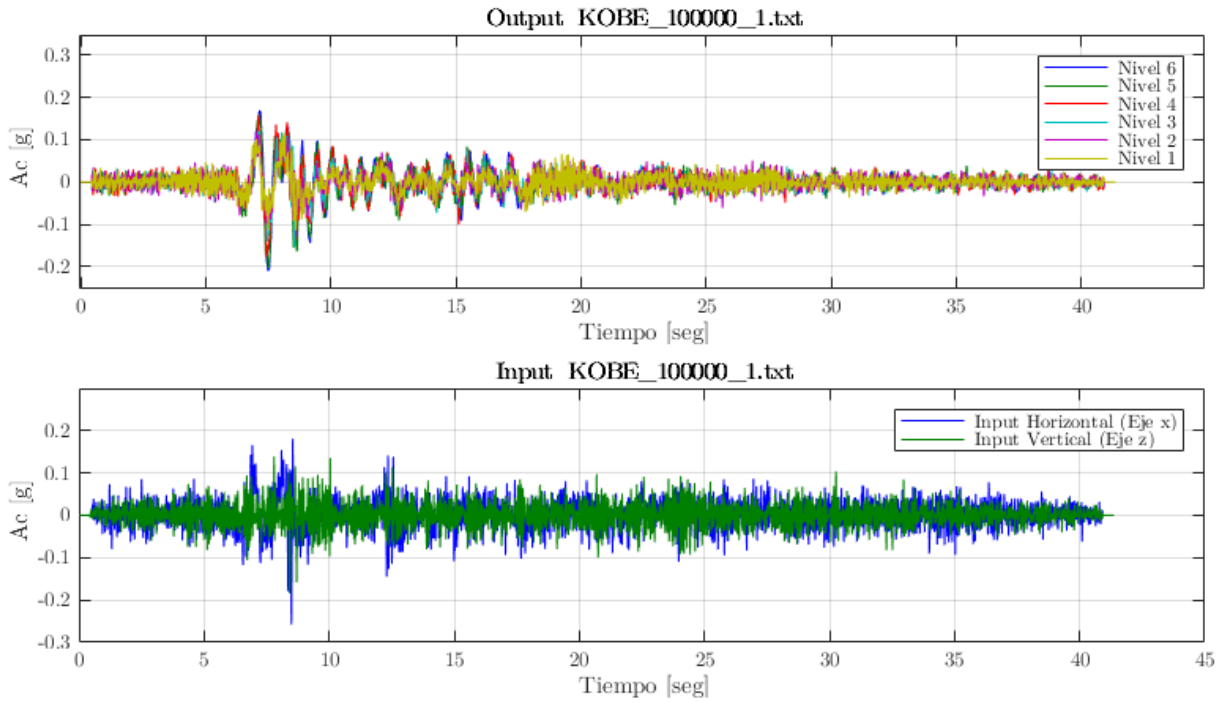


Figura 0-14: Output e Input, Registro 'KOBÉ_100000_1'.

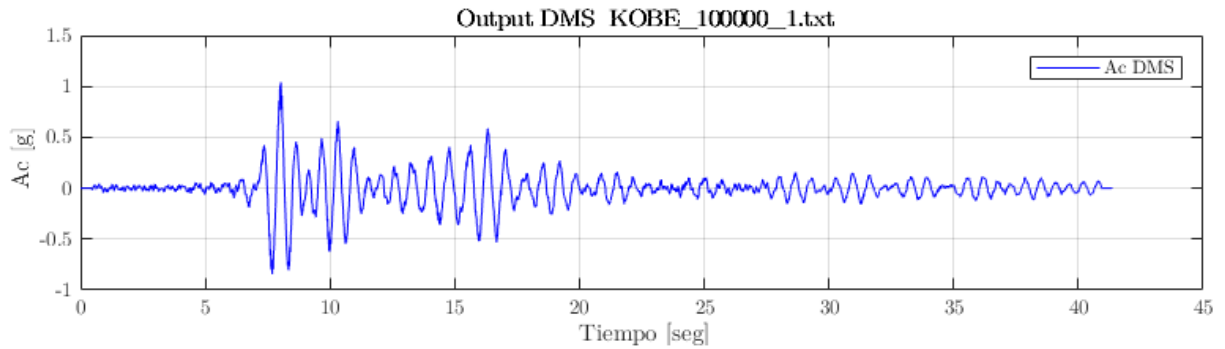


Figura 0-15: Output DMS, Registro 'KOBÉ_100000_1'.

Respuesta del sistema para Registro 'KOBE', Componente Horizontal al 100%, Componente Vertical al 100%. DMS instalado:

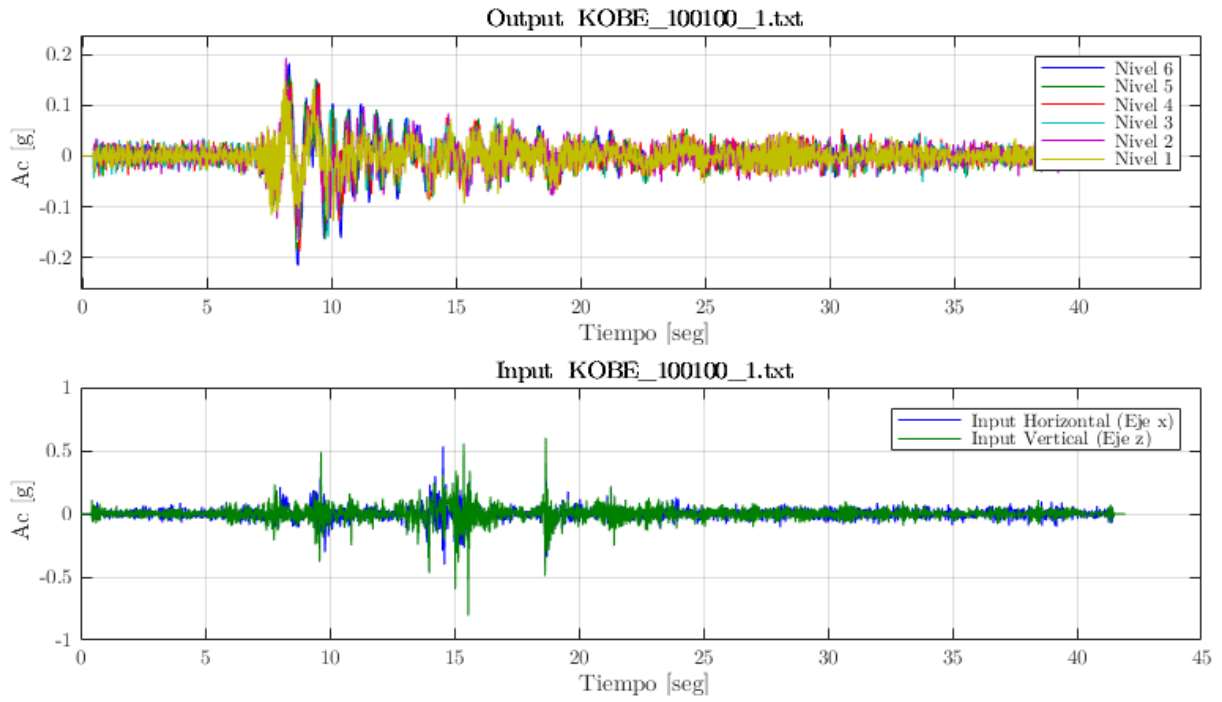


Figura 0-16: Output e Input, Registro 'KOBE_100100_1'.

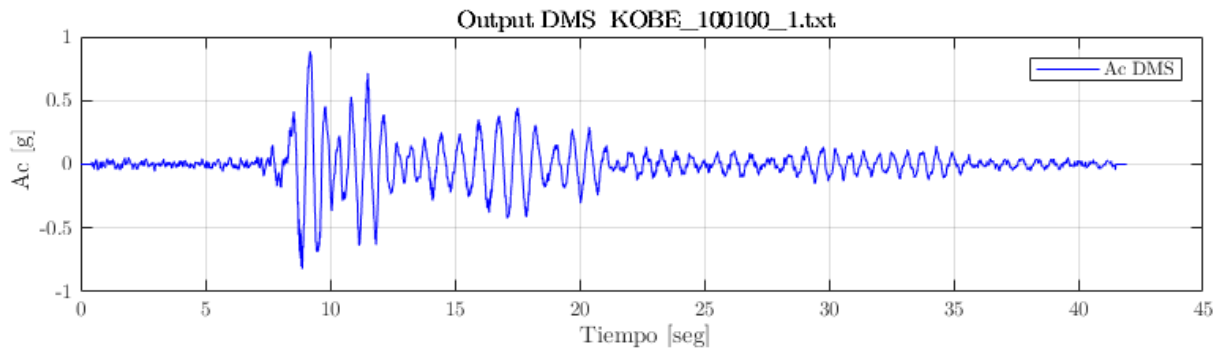


Figura 0-17: Output DMS, Registro 'KOBE_100100_1'.

A.3.2 Output e Input, Registros ‘LLOL’

Respuesta del sistema para Registro Llole, Componente Horizontal al 50%, Componente Vertical al 0%. Sin DMS:

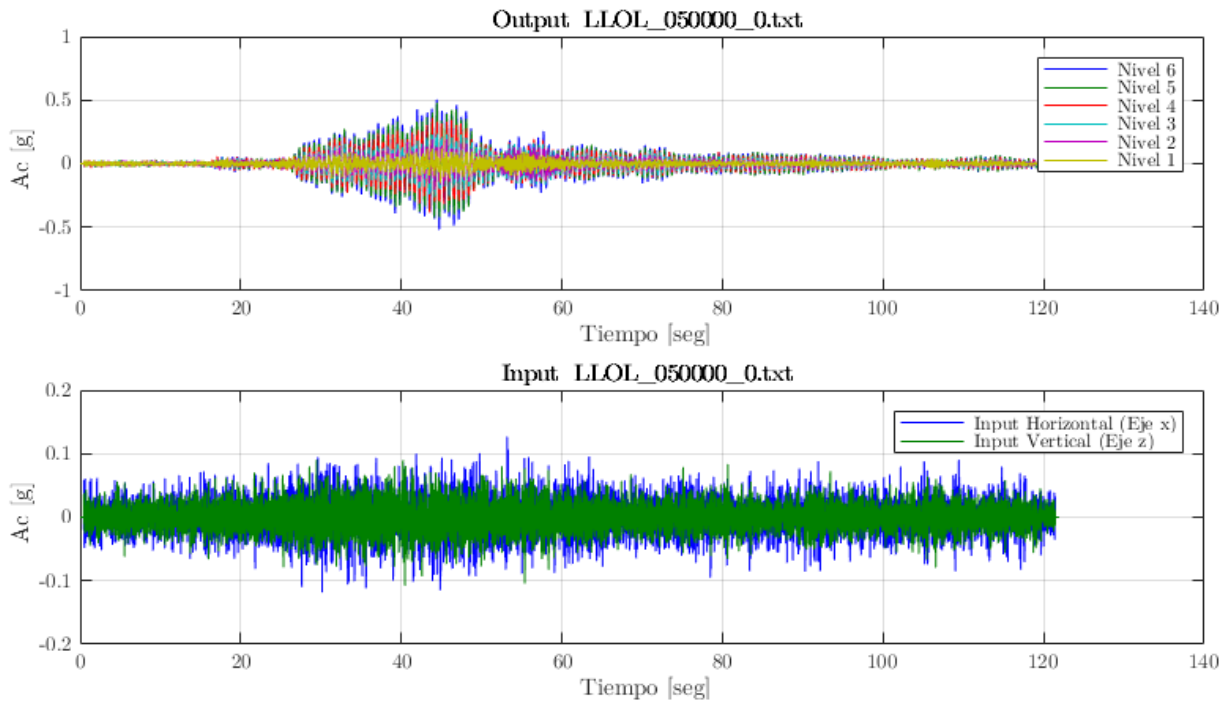


Figura 0-18: Output e Input, Registro ‘LLOL_050000_0’.

Respuesta del sistema para Registro Lolloo, Componente Horizontal al 50%, Componente Vertical al 0%. DMS instalado:

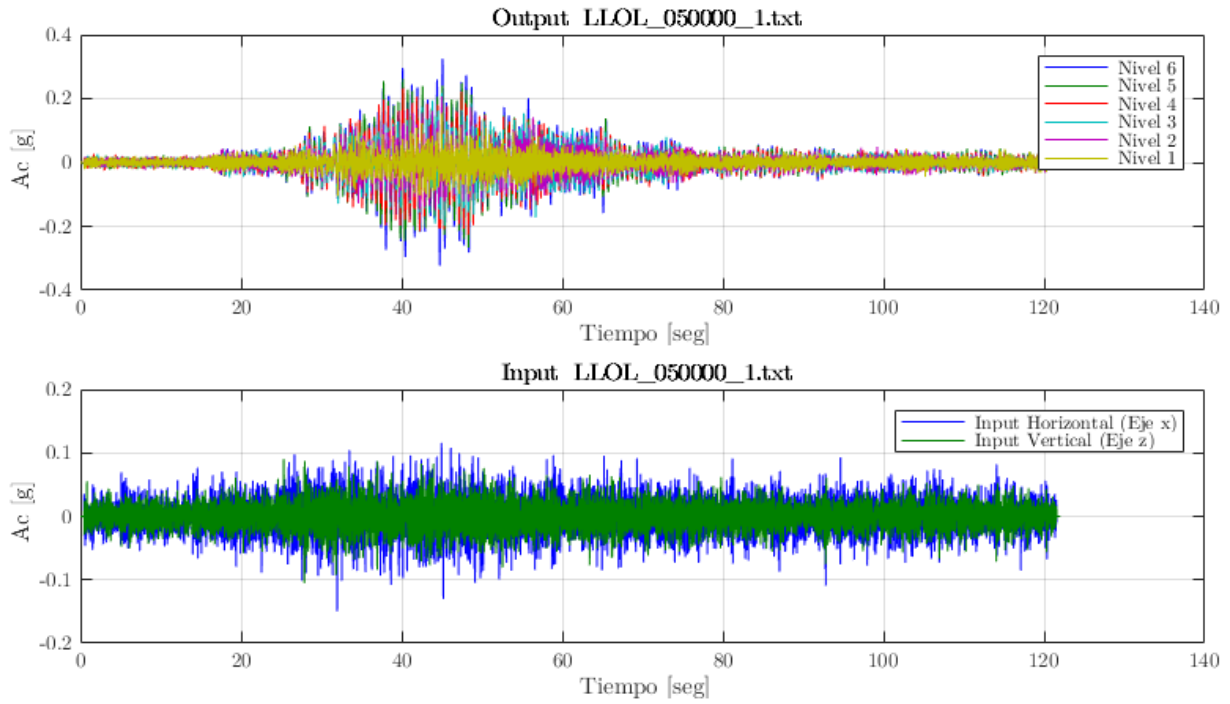


Figura 0-19: Output e Input, Registro 'LLOL_050000_1'.

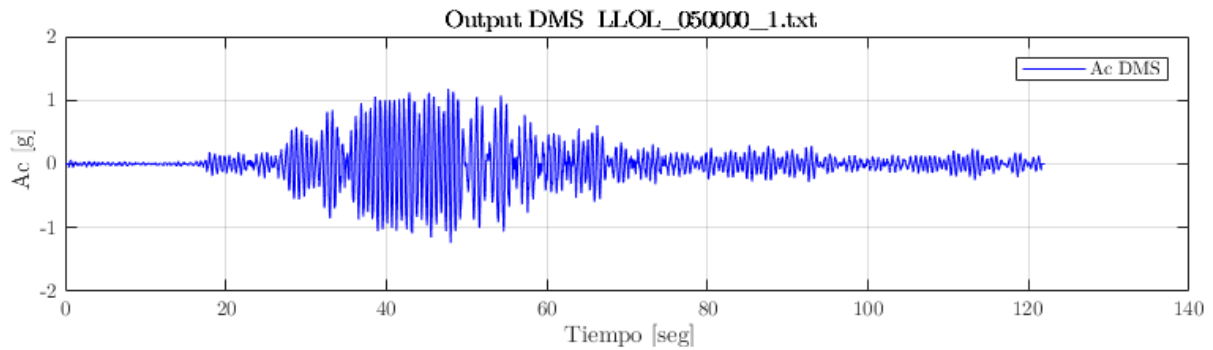


Figura 0-20: Output DMS, Registro 'LLOL_050000_1'.

Respuesta del sistema para Registro Lolloo, Componente Horizontal al 50%,
Componente Vertical al 50%. DMS instalado:

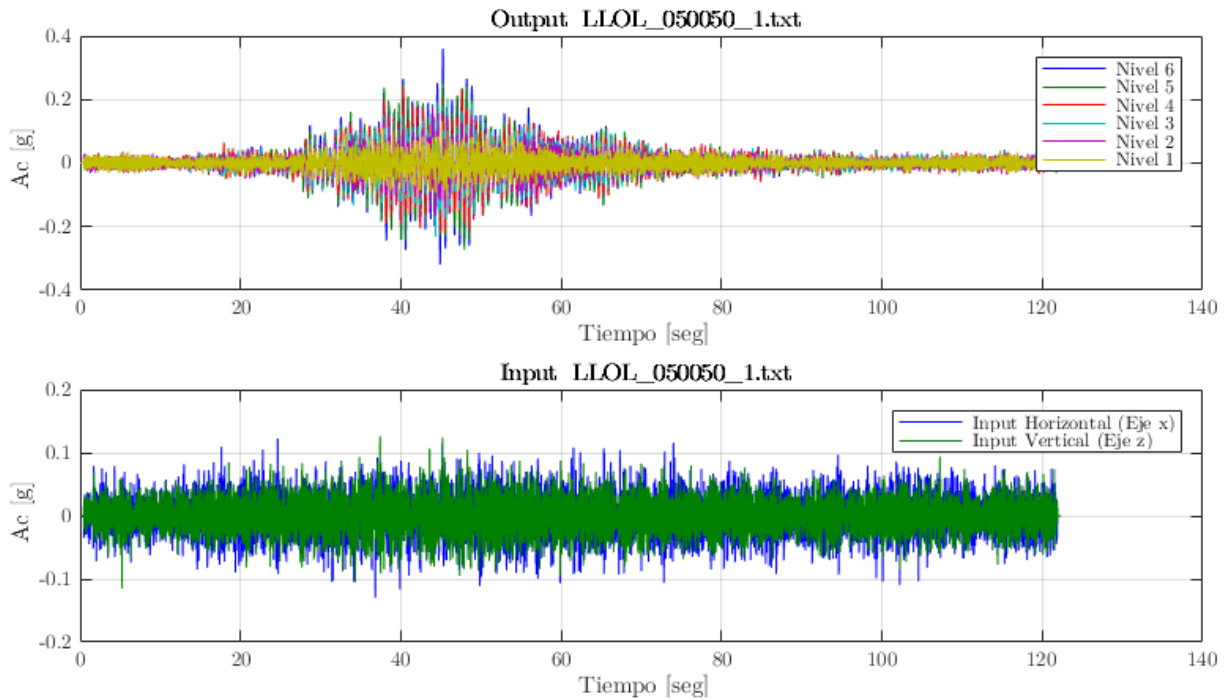


Figura 0-21: Output e Input, Registro 'LLOL_050050_1'.

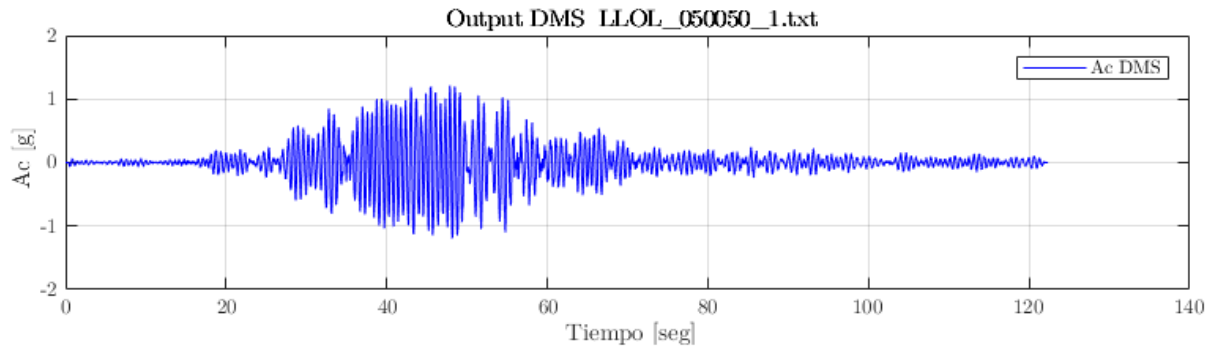


Figura 0-22: Output DMS, Registro 'LLOL_050050_1'.

Respuesta del sistema para Registro Lolloe, Componente Horizontal al 50%, Componente Vertical al 100%. DMS instalado:

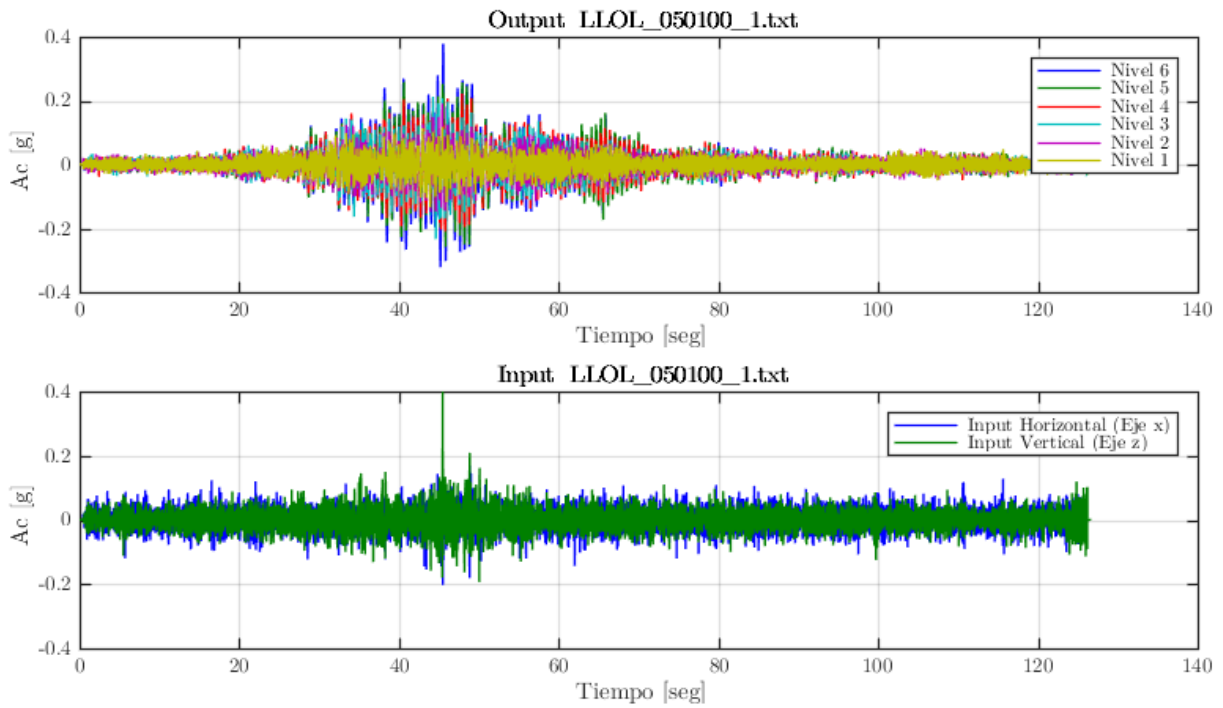


Figura 0-23: Output e Input, Registro 'LLOL_050100_1'.

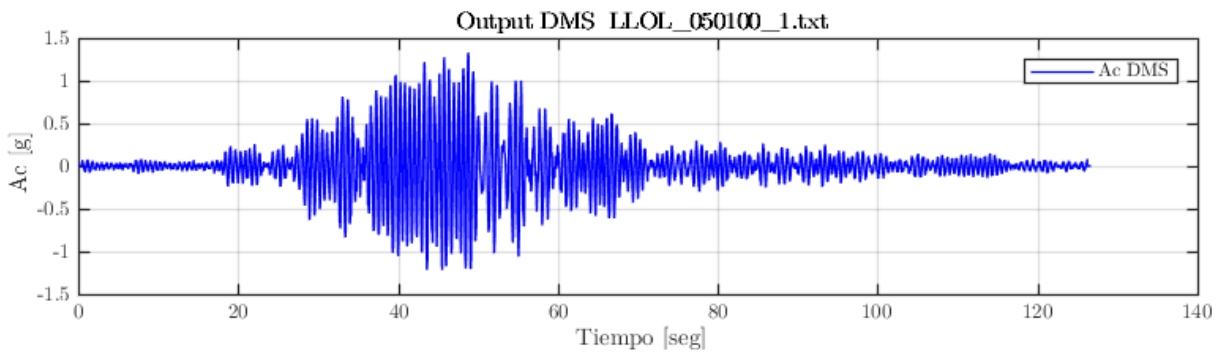


Figura 0-24: Output DMS, Registro 'LLOL_050100_1'.

A.3.3 Output e Input, Registros ‘PICA’

Respuesta del sistema para Registro ‘PICA’, Componente Horizontal al 100%, Componente Vertical al 0%. Sin DMS:

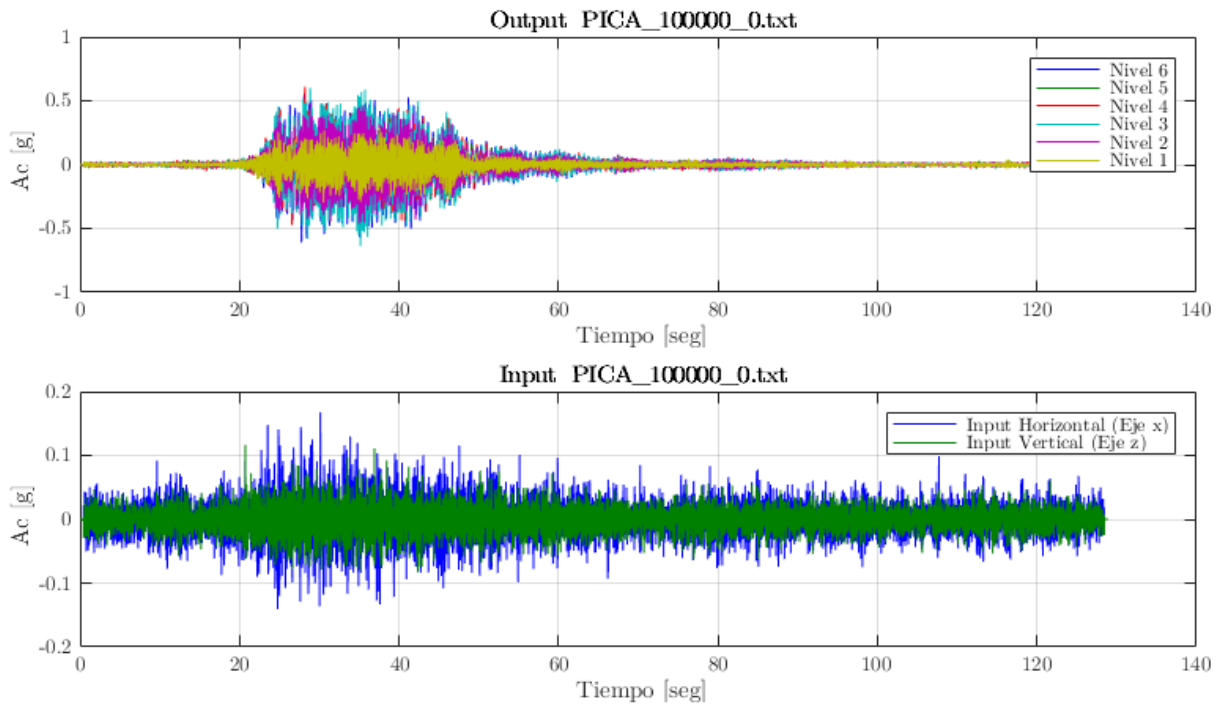


Figura 0-25: Output e Input, Registro ‘PICA_100000_0’.

Respuesta del sistema para Registro 'PICA', Componente Horizontal al 100%, Componente Vertical al 0%. DMS instalado:

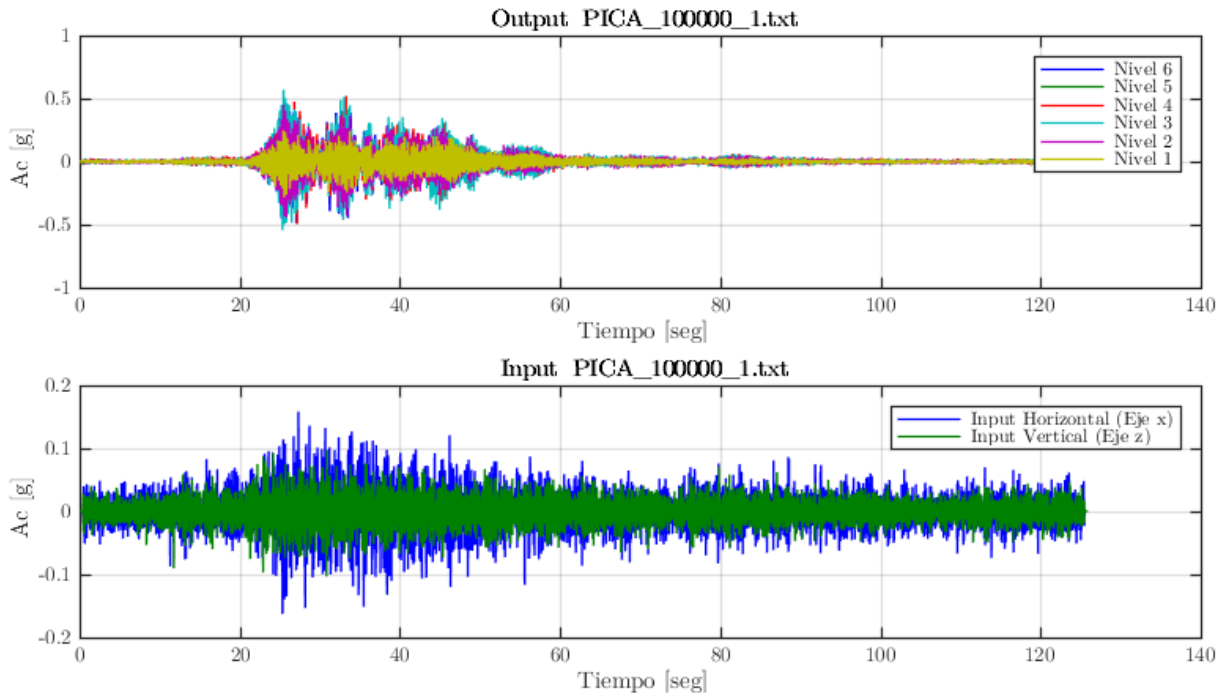


Figura 0-26: Output e Input, Registro 'PICA_100000_1'.

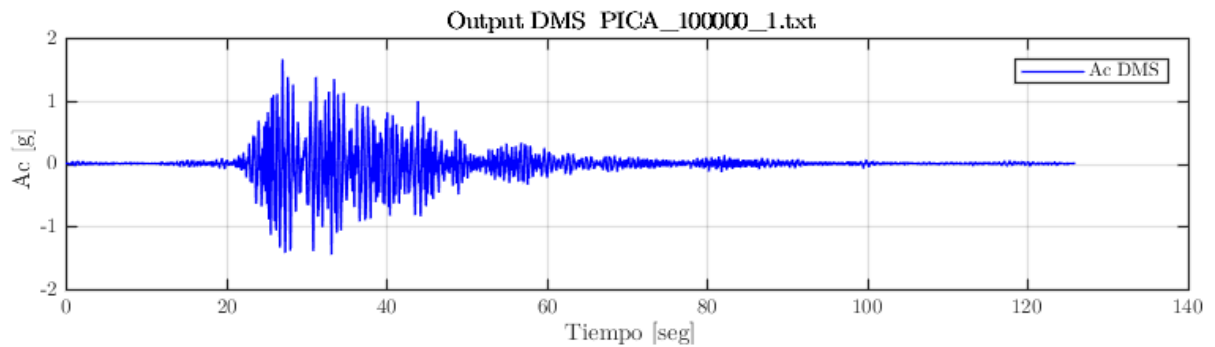


Figura 0-27: Output DMS, Registro 'PICA_100000_1'.

Respuesta del sistema para Registro 'PICA', Componente Horizontal al 100%, Componente Vertical al 100%. DMS instalado:

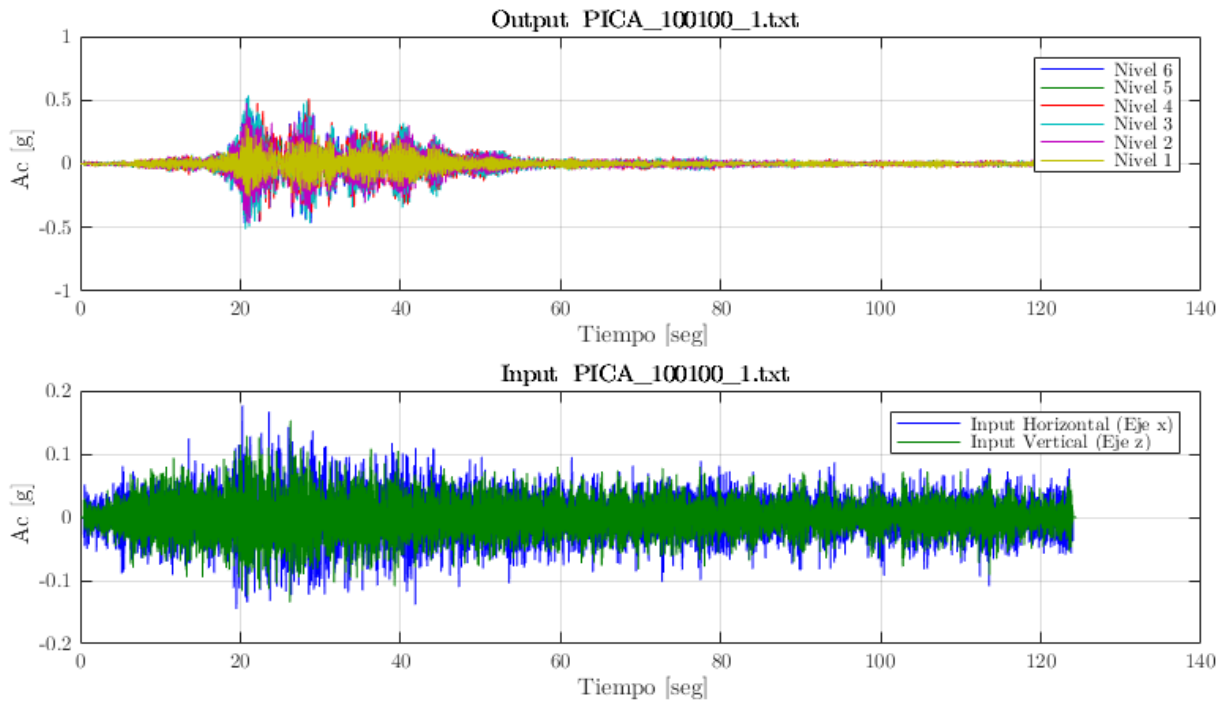


Figura 0-28: Output e Input, Registro 'PICA_100100_1'.

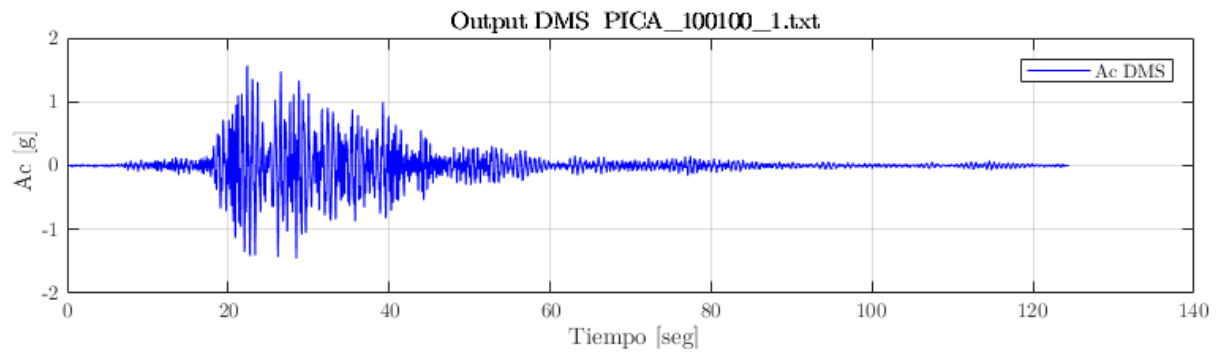


Figura 0-29: Output DMS, Registro 'PICA_100100_1'.

A.3.4 Output e Input, Registros ‘LMOD’

Respuesta del sistema para Registro ‘LMOD’, Componente Horizontal al 50%, Componente Vertical al 50%. DMS instalado:

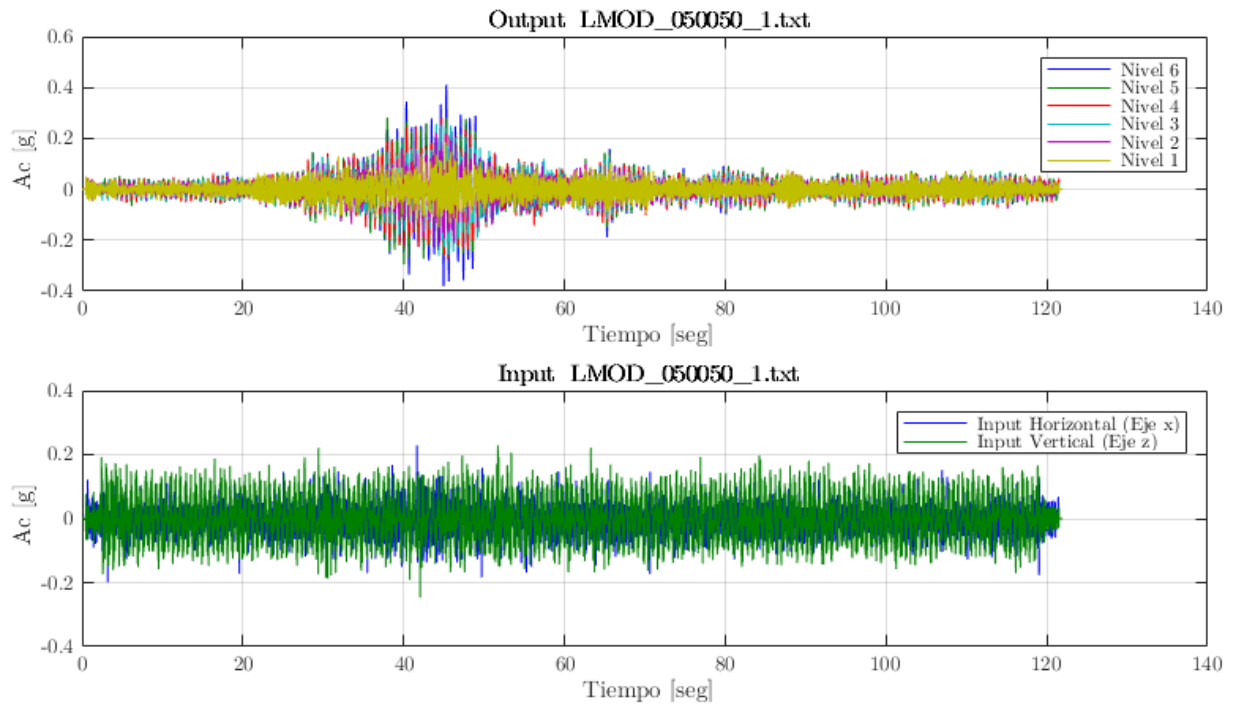


Figura 0-30: Output e Input, Registro ‘LMOD_050050_1’.

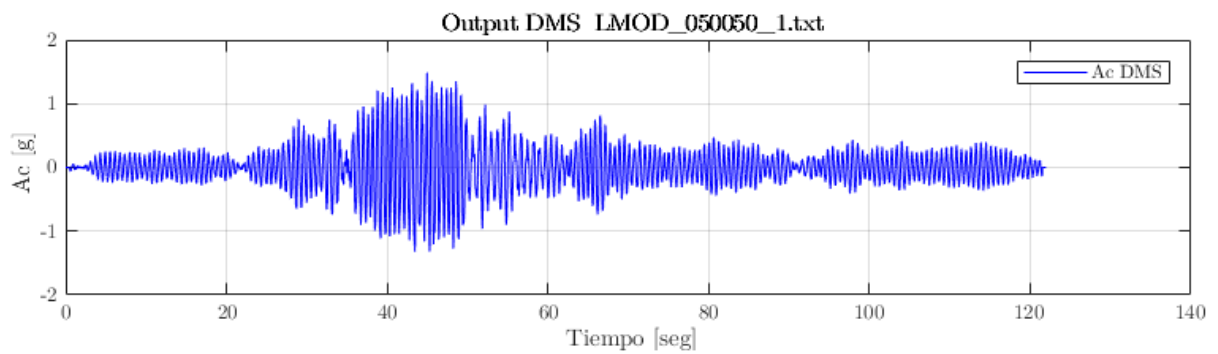


Figura 0-31: Output DMS, Registro ‘LMOD_050050_1’.

Respuesta del sistema para Registro 'LMOD', Componente Horizontal al 50%, Componente Vertical al 100%. DMS instalado:

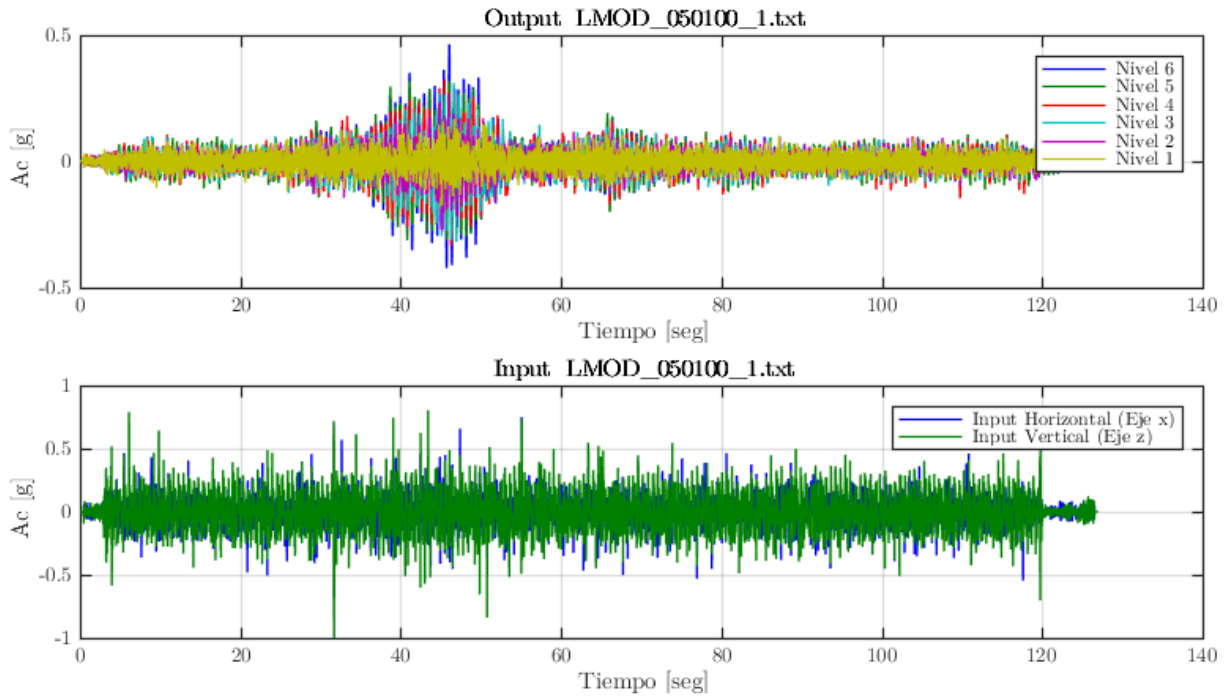


Figura 0-32: Output e Input, Registro 'LMOD_050100_1'.

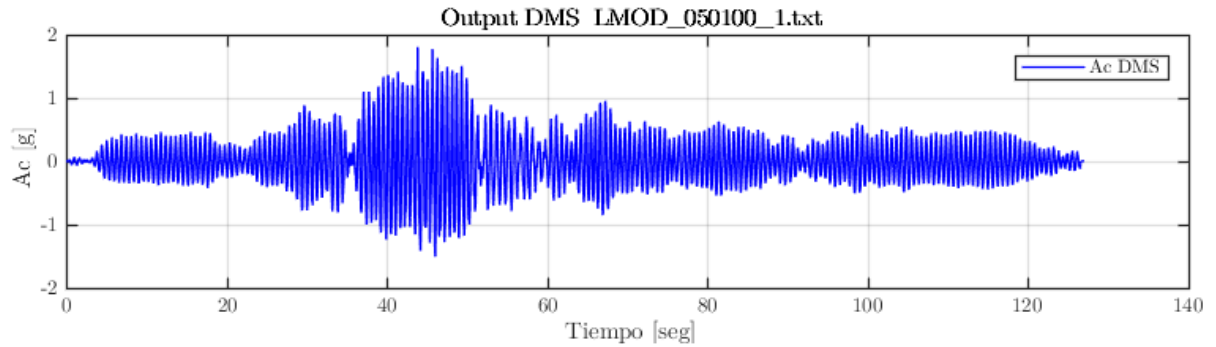


Figura 0-33: Output DMS, Registro 'LMOD_050100_1'.

A.4 Cuadro de respuesta, método DSI

A.4.1 Cuadro DSI, Registros ‘KOBE’

Resultados DSI para cada configuración de ensayo de registros ‘KOBE’:

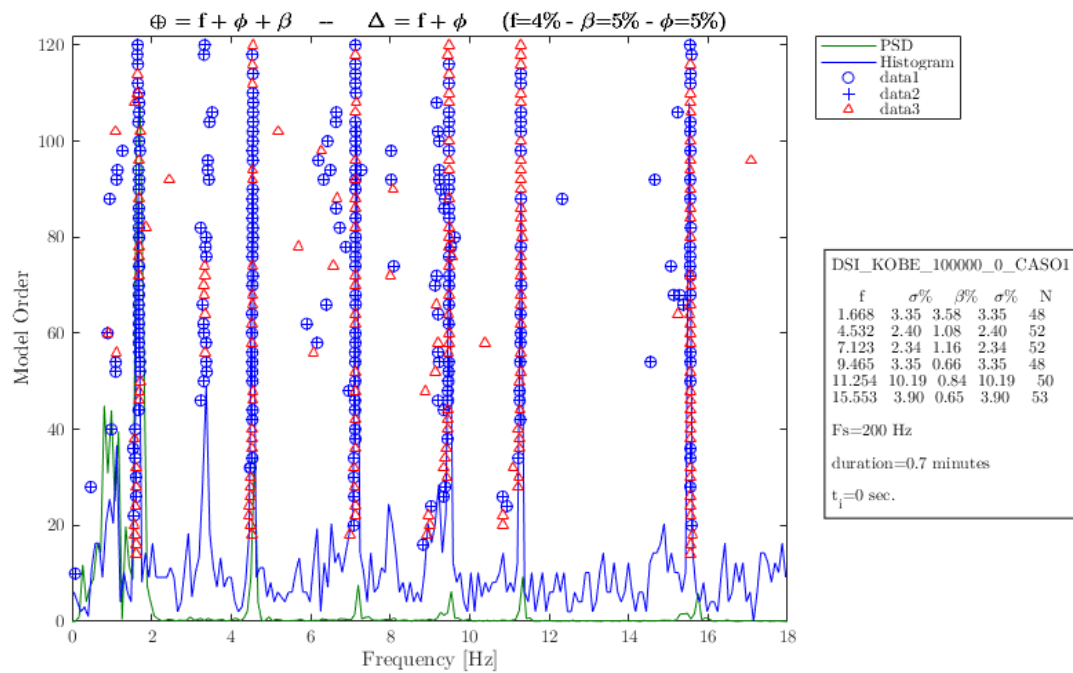


Figura 0-34: Cuadro DSI, Registro “KOBE_100000_0” CASO1.

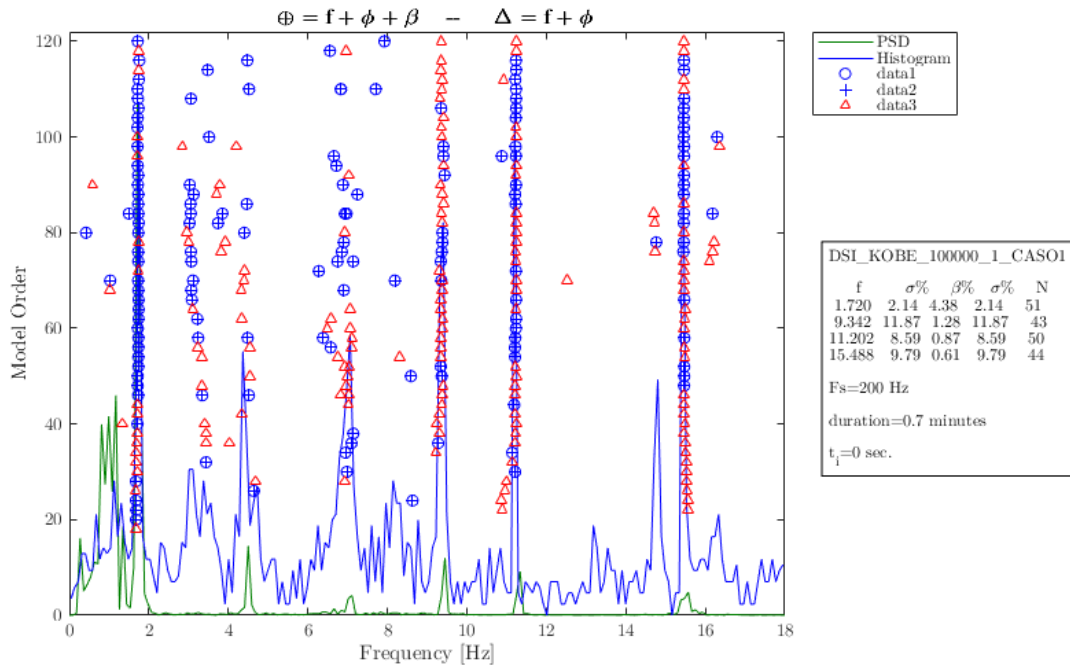


Figura 0-35: Cuadro DSI, Registro “KOBE_100000_1” CASO1.

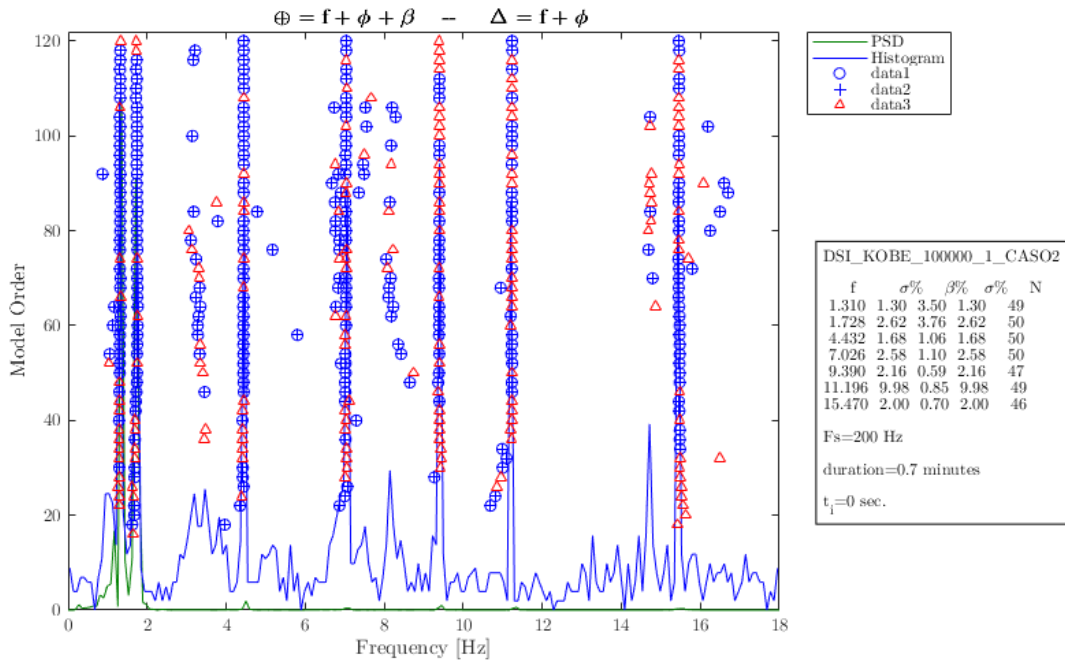


Figura 0-36: Cuadro DSI, Registro “KOBE_100000_1” CASO2.

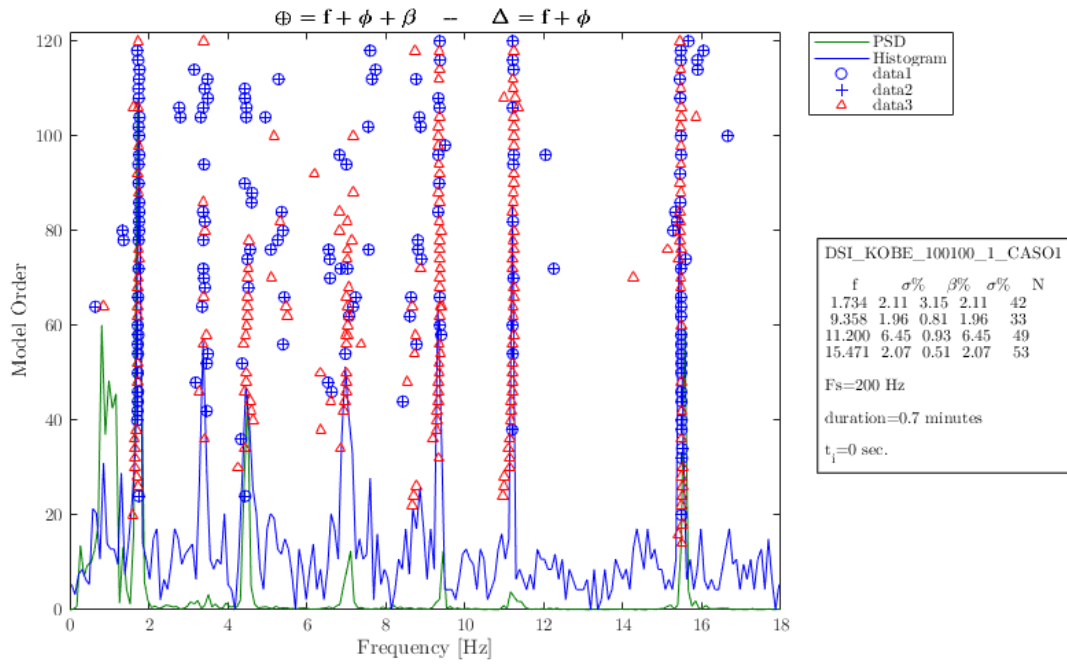


Figura 0-37: Cuadro DSI, Registro “KOBÉ_100100_1” CASO1.

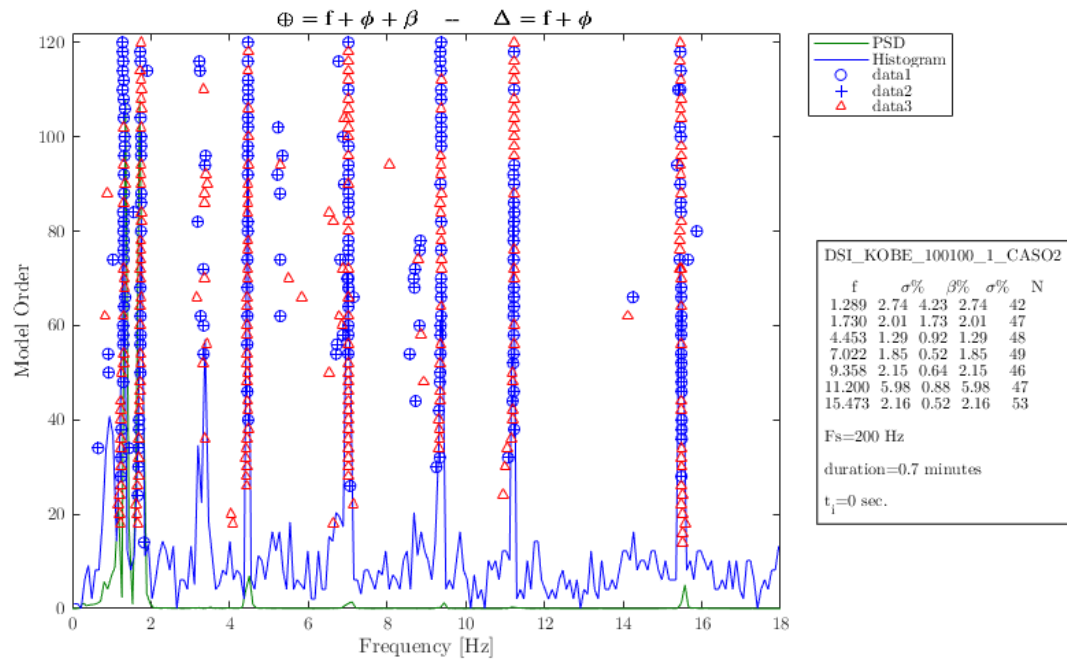


Figura 0-38: Cuadro DSI, Registro “KOBÉ_100100_1” CASO2.

A.4.2 Cuadro DSI, Registros ‘LLOL’

Resultados DSI para cada configuración de ensayo de registros ‘LLOL’:

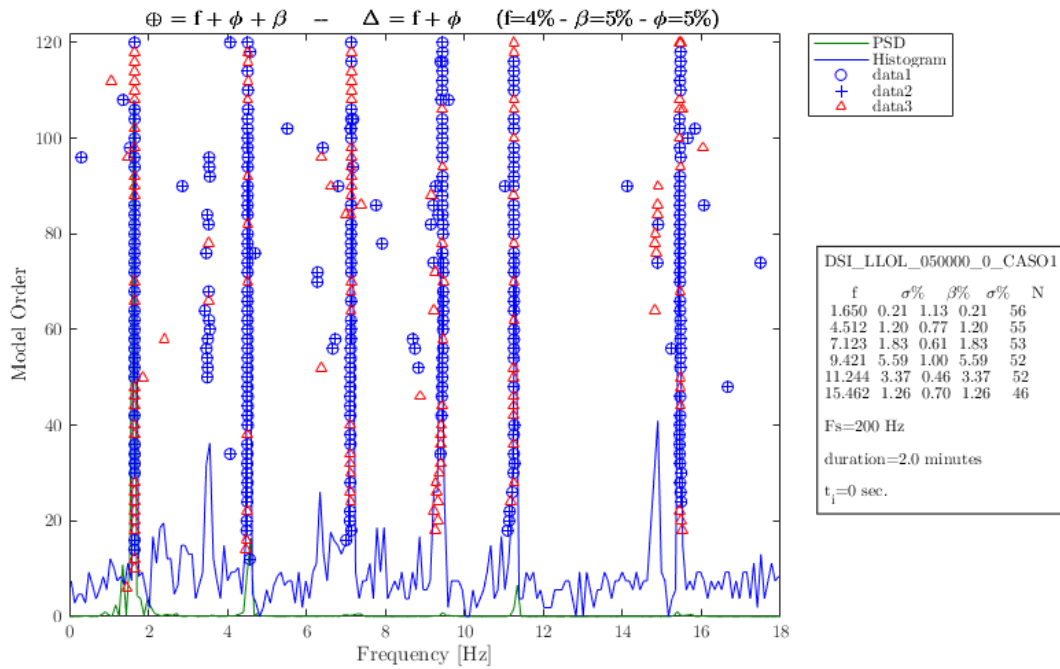


Figura 0-39: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050000_0” CASO1.

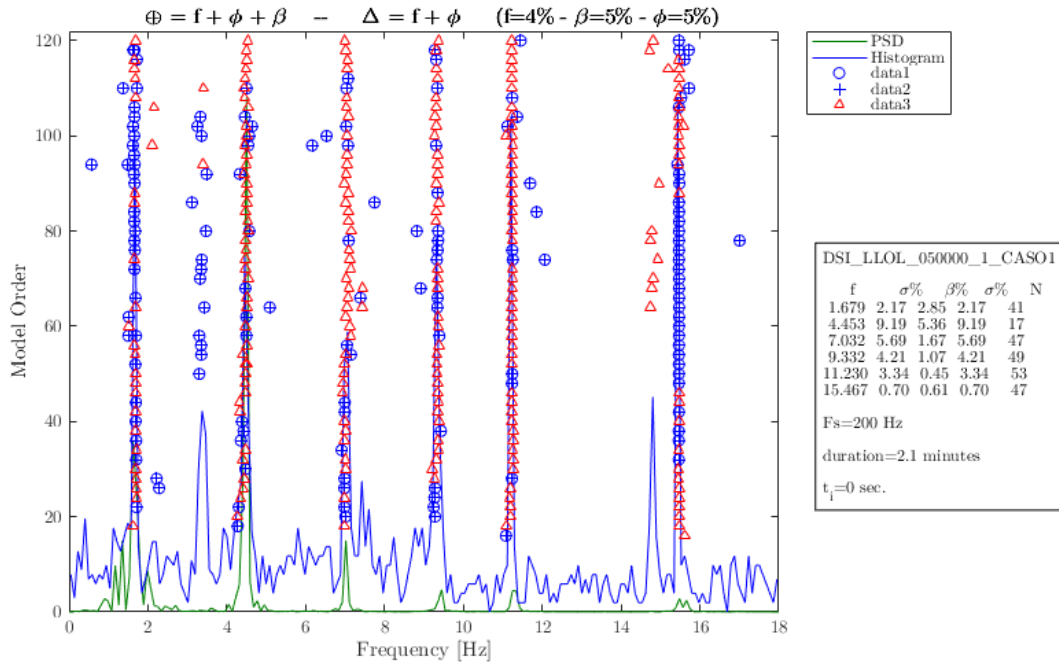


Figura 0-40: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050000_1” CASO1.

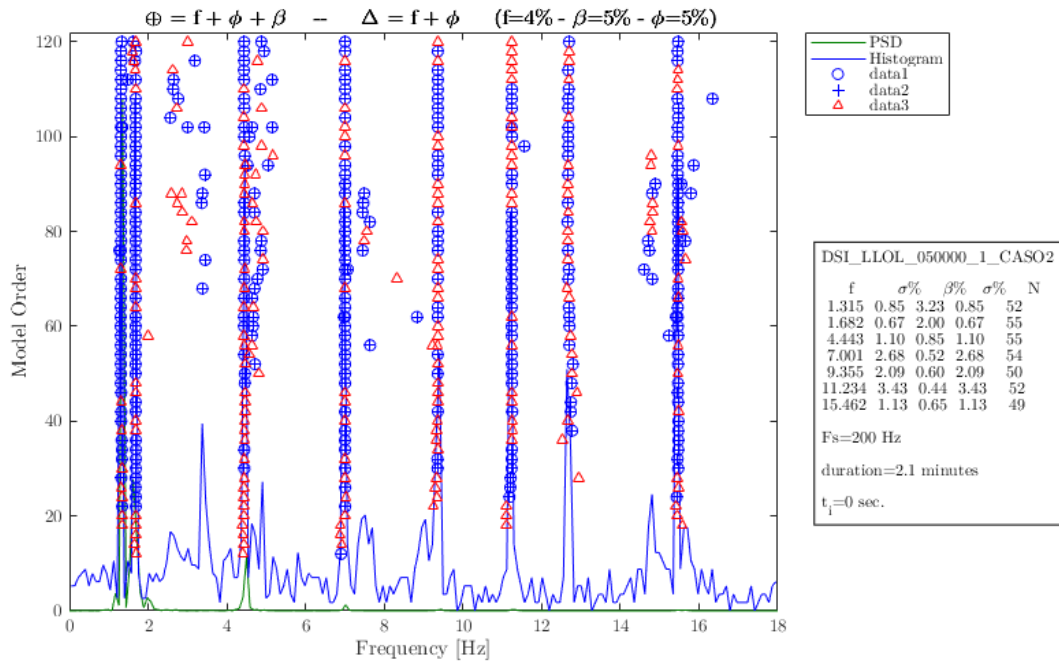


Figura 0-41: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050000_1” CASO2.

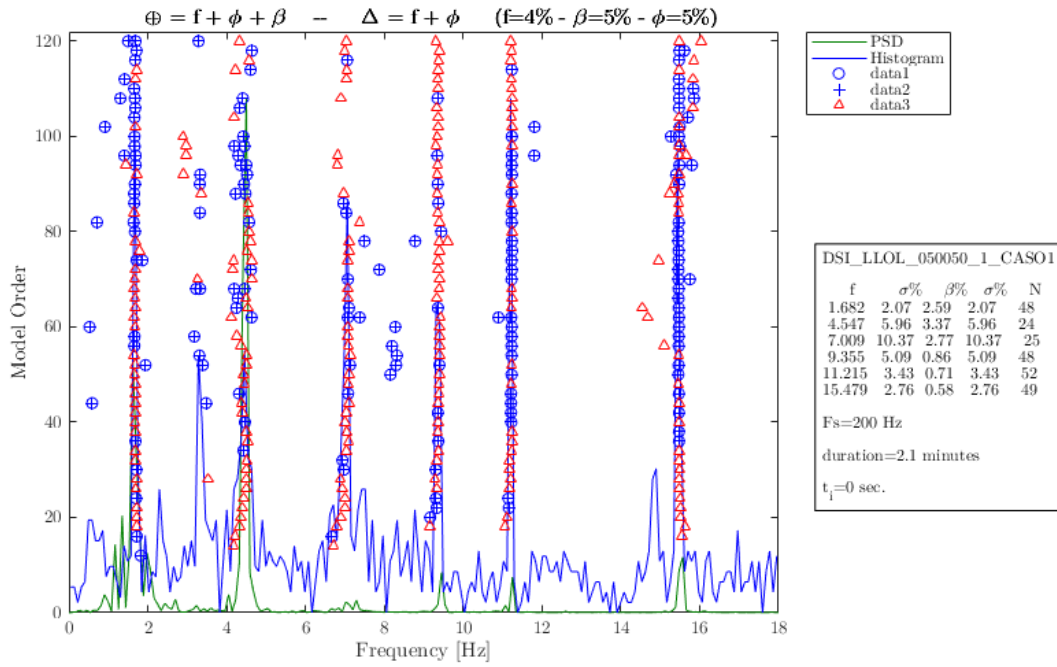


Figura 0-42: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050050_1” CASO1.

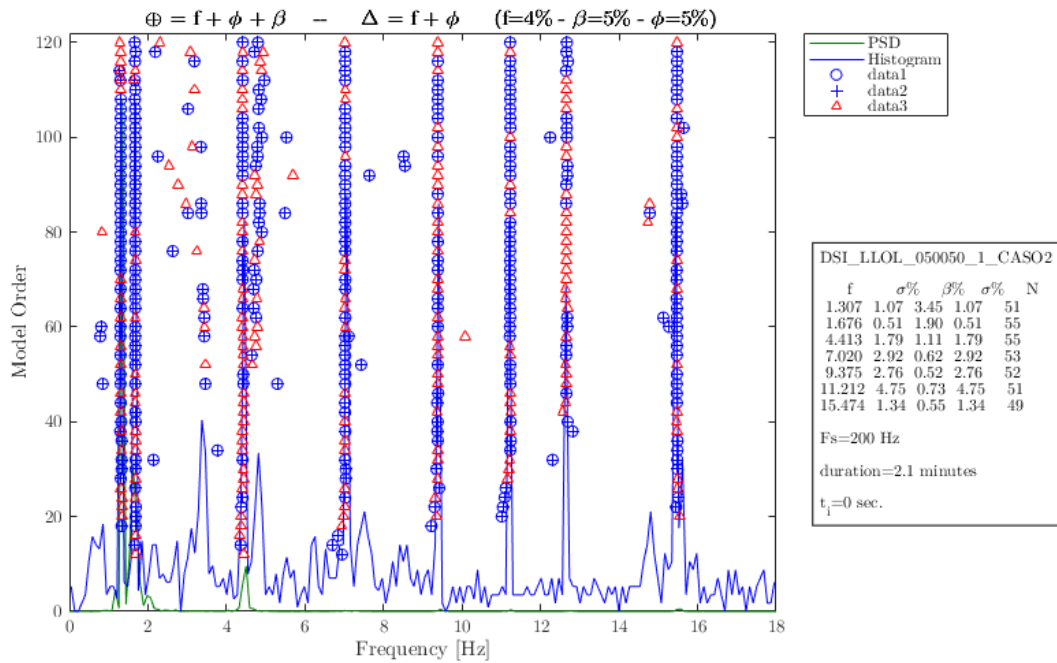


Figura 0-43: Cuadro DSI, Registro “LLOL_050050_1” CASO2.

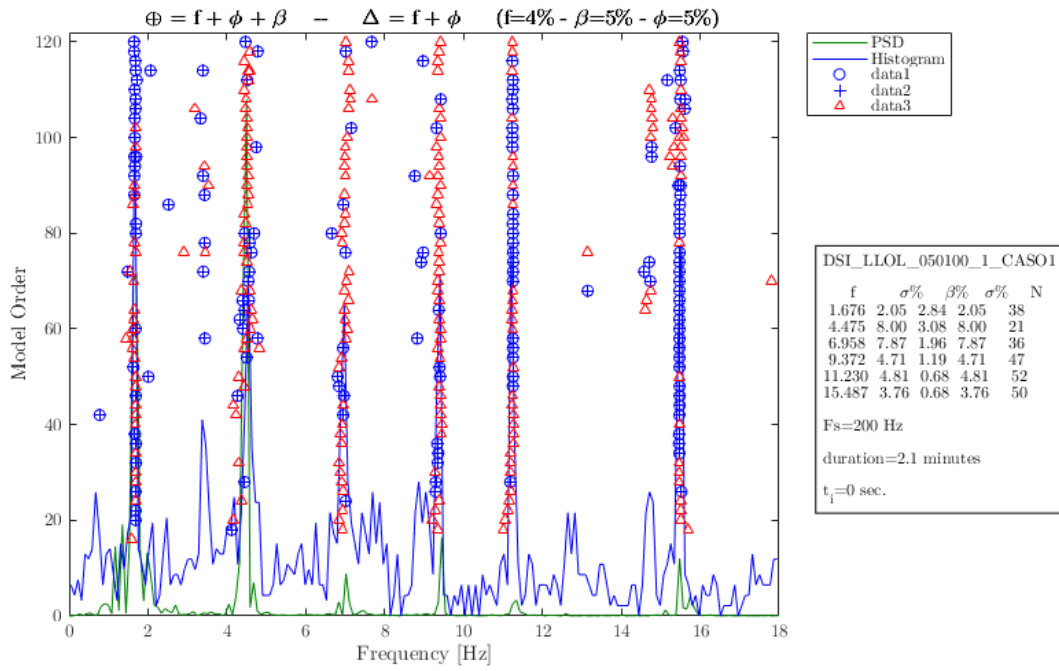


Figura 0-44: Cuadro DSI, Registro "LLOL_050100_1" CASO1.

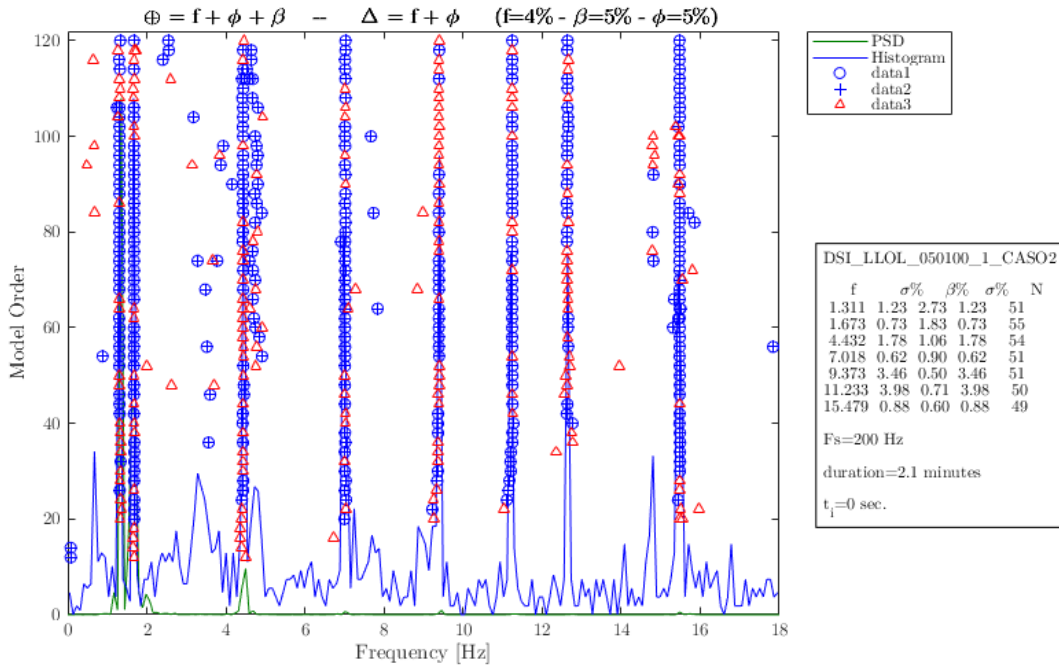


Figura 0-45: Cuadro DSI, Registro "LLOL_050100_1" CASO2.

A.4.3 Cuadro DSI, Registros ‘PICA’

Resultados DSI para cada configuración de ensayo de registros ‘PICA’:

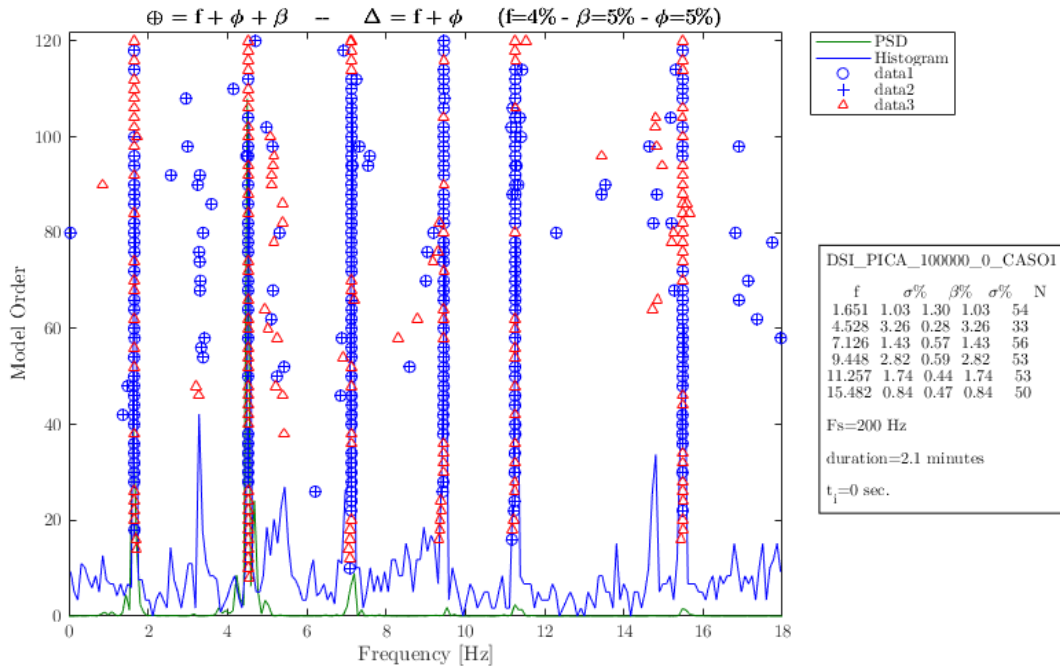


Figura 0-46: Cuadro DSI, Registro “PICA_100000_0” CASO1.

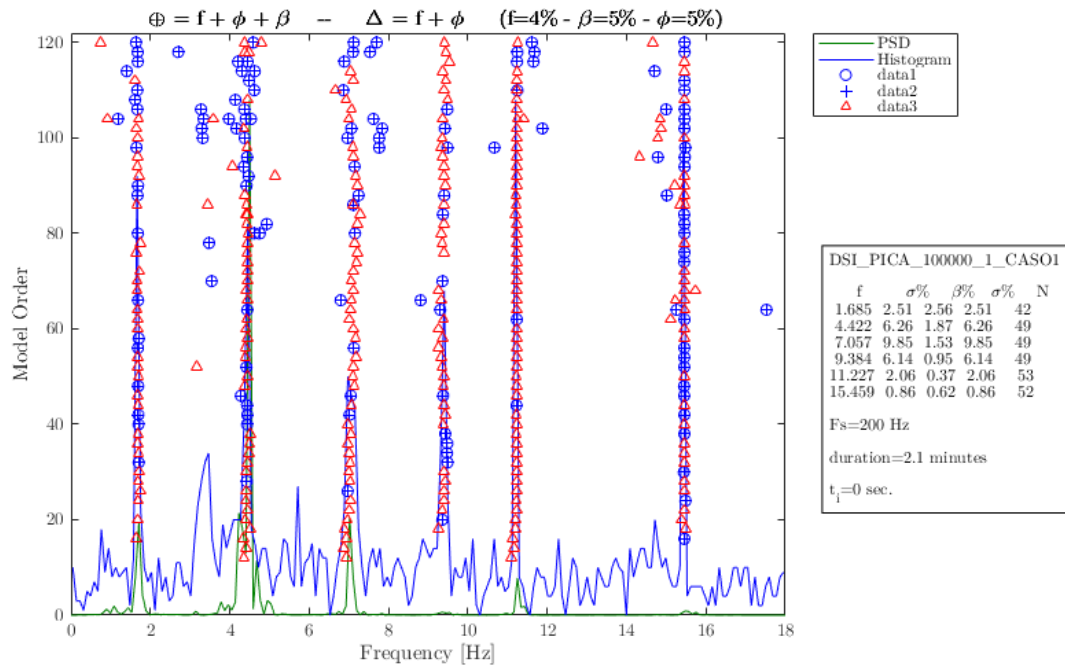


Figura 0-47: Cuadro DSI, Registro “PICA_100000_1” CASO1.

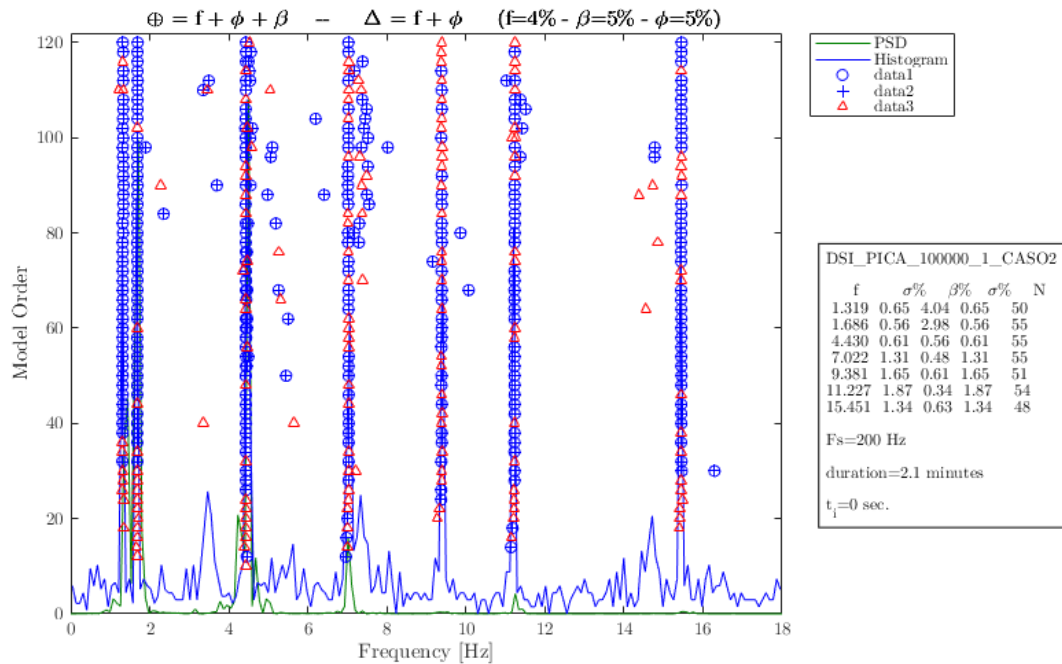


Figura 0-48: Cuadro DSI, Registro “PICA_100000_1” CASO2.

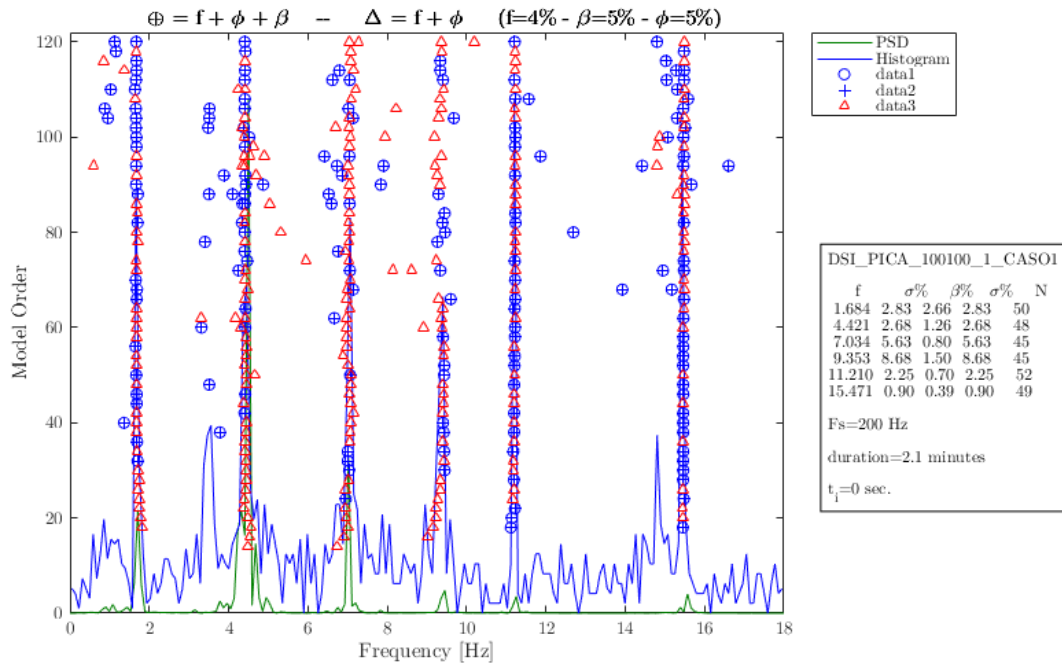


Figura 0-49: Cuadro DSI, Registro "PICA_100100_1" CASO1.

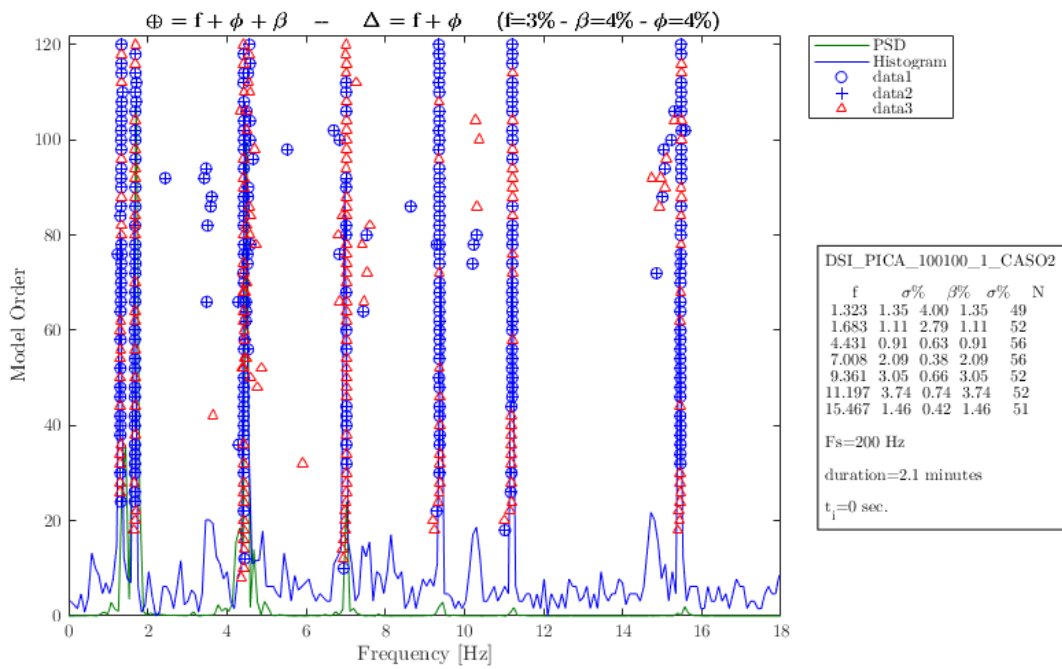


Figura 0-50: Cuadro DSI, Registro "PICA_100100_1" CASO2.

A.4.4 Cuadro DSI, Registros ‘LMOD’

Resultados DSI para cada configuración de ensayo de registros ‘LMOD’:

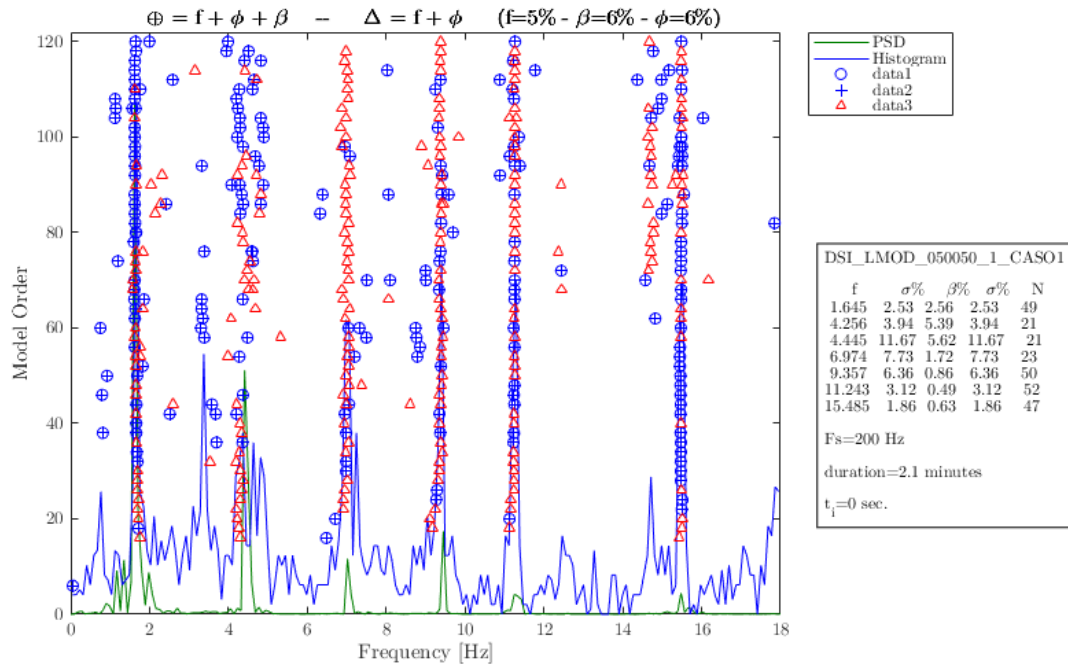


Figura 0-51: Cuadro DSI, Registro “LMOD_050050_1” CASO1.

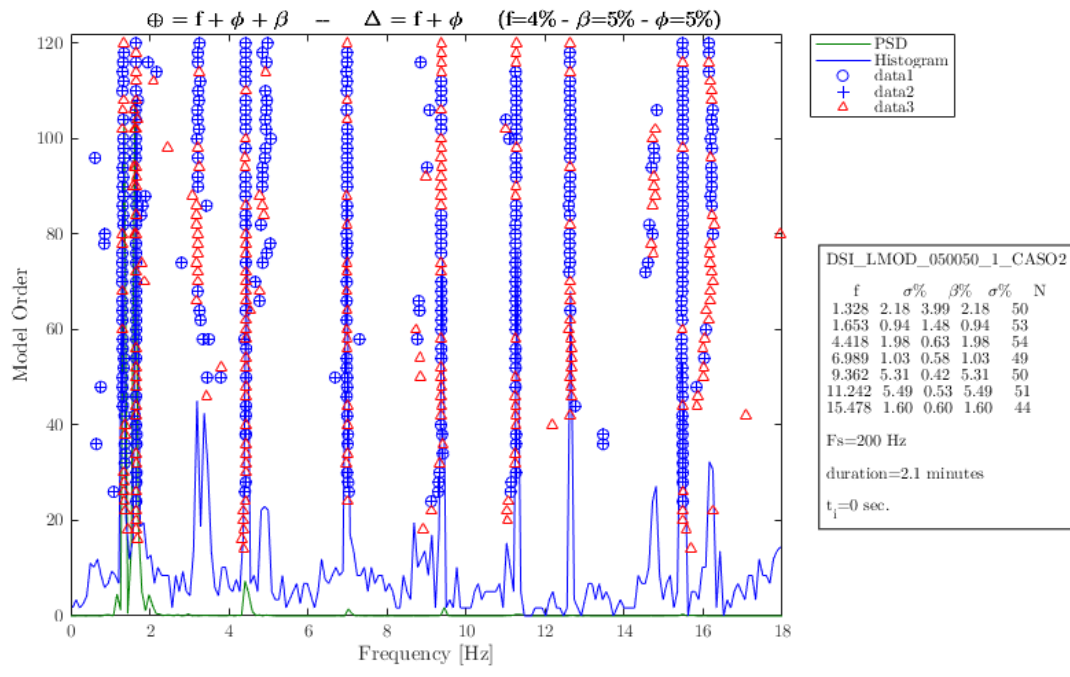


Figura 0-52: DSI “LMOD_050050_1” CASO2.

A.5 Espectrogramas

A.1.1 Espectrogramas, Registro 'KOBE'

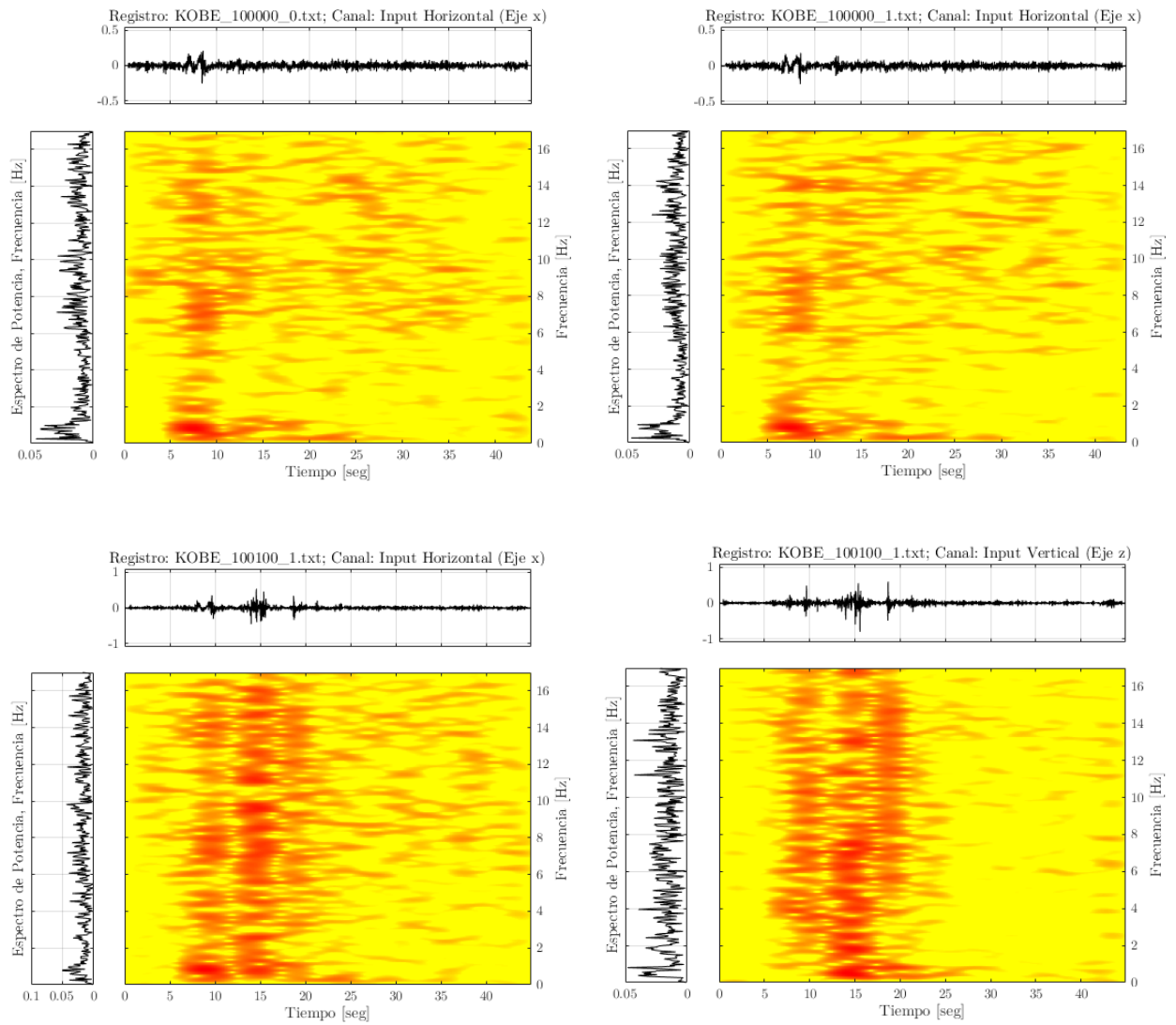
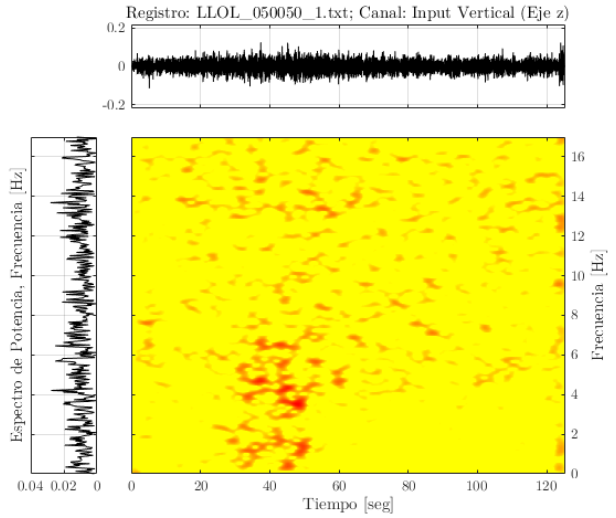
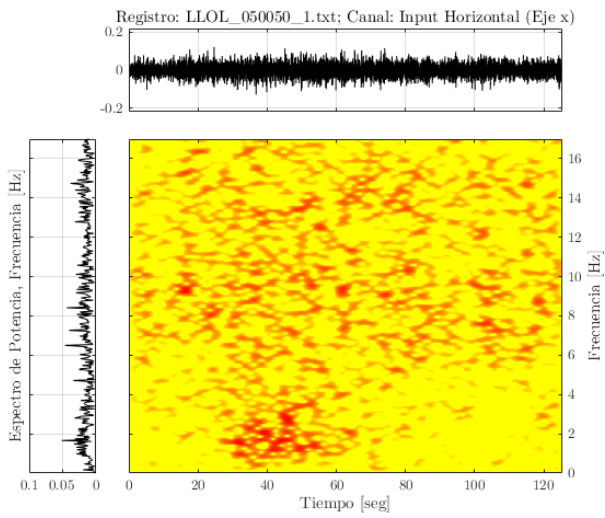
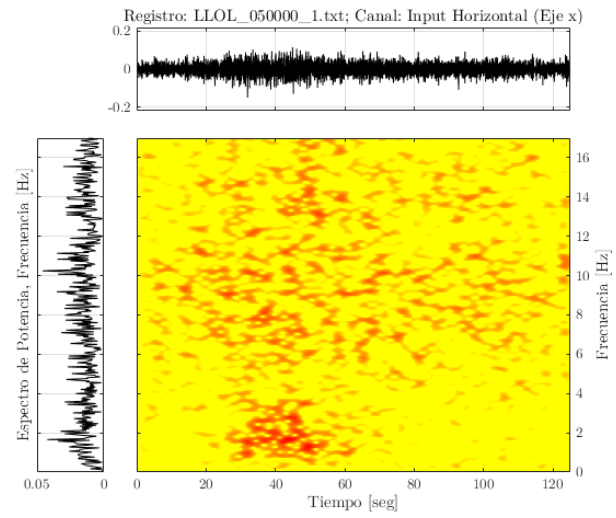
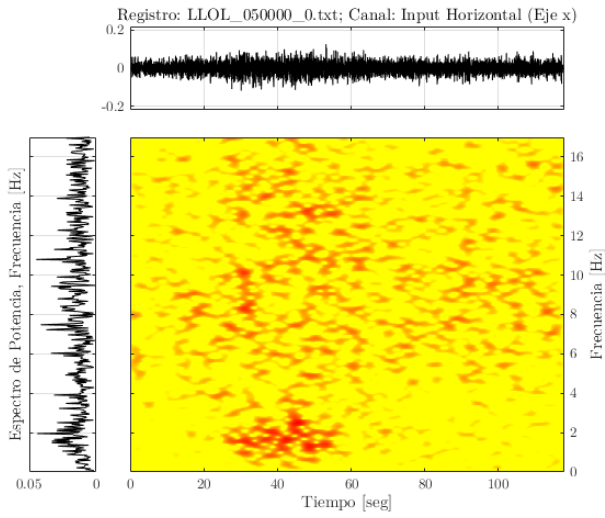


Figura 0-53: Espectrogramas para Registros 'KOBE'.

A.1.2 Espectrogramas, Registro 'LLOL'



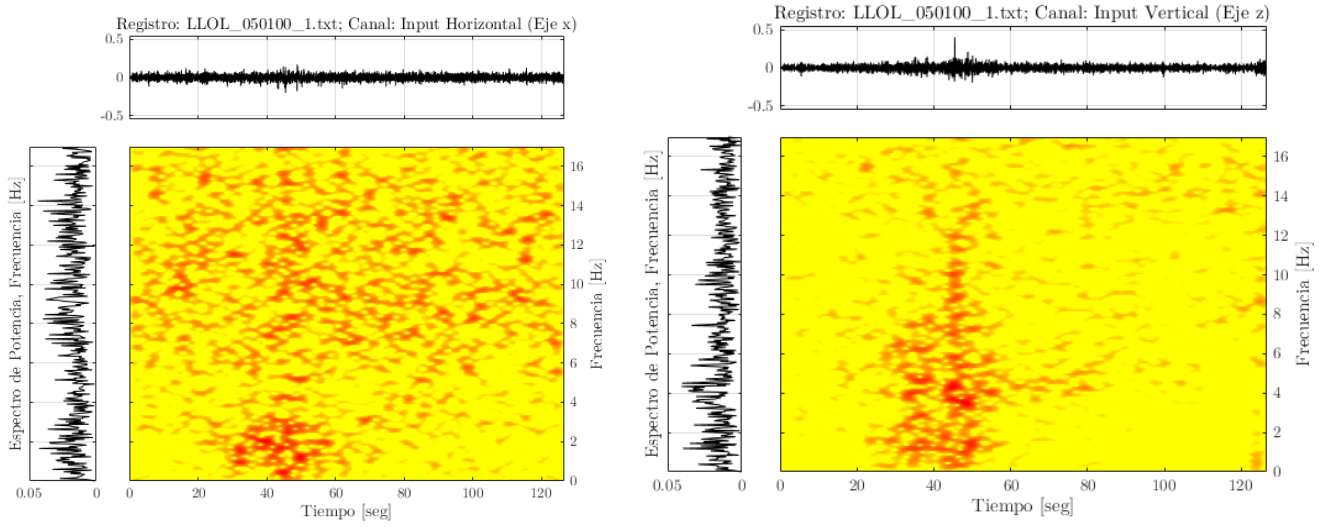


Figura 0-54: Espectrogramas para Registros 'LLOL'.

A.1.3 Espectrogramas, Registro ‘PICA’

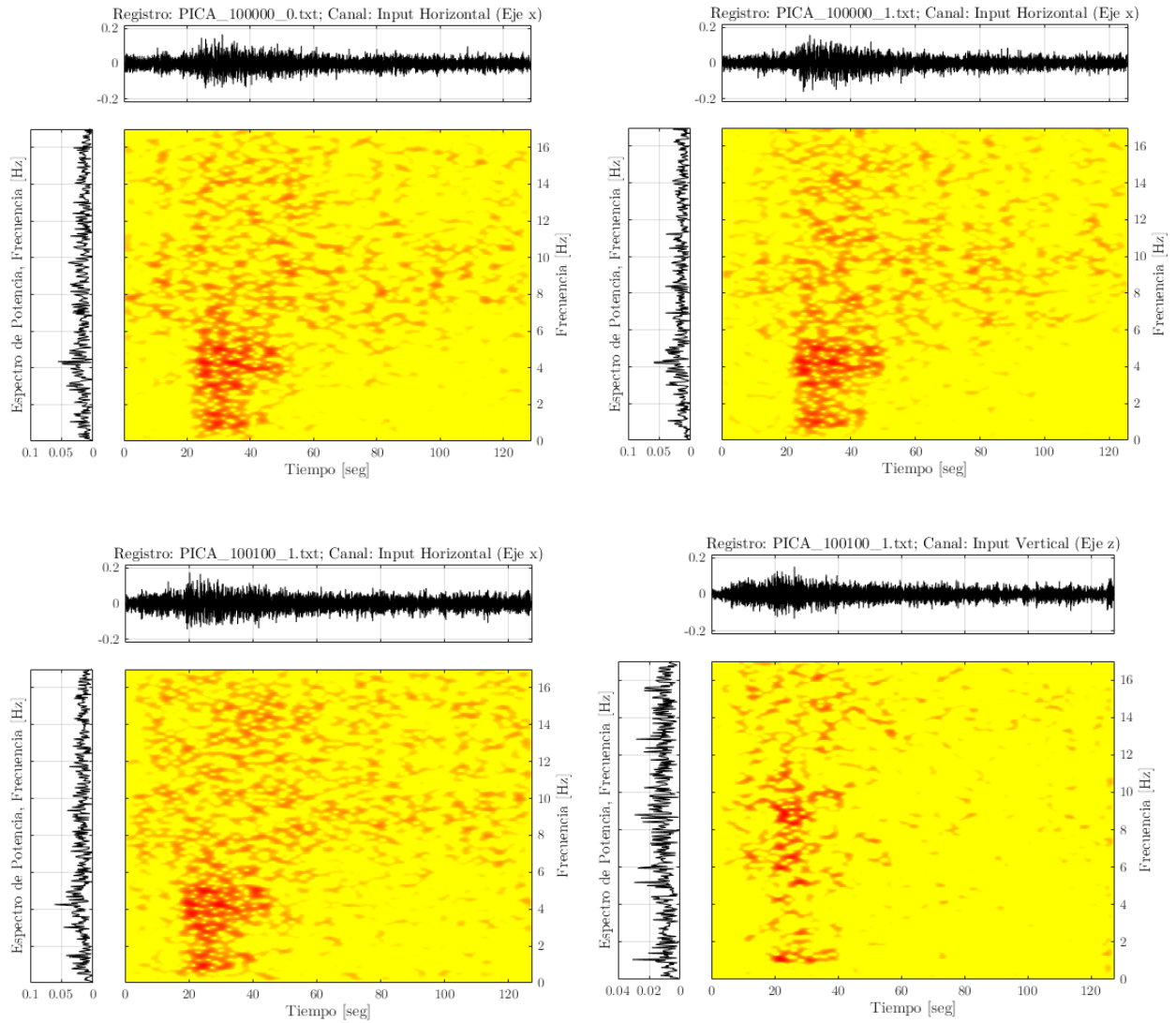


Figura 0-55: Espectrogramas para Registros ‘PICA’.

A.1.4 Espectrogramas, Registro ‘LMO’

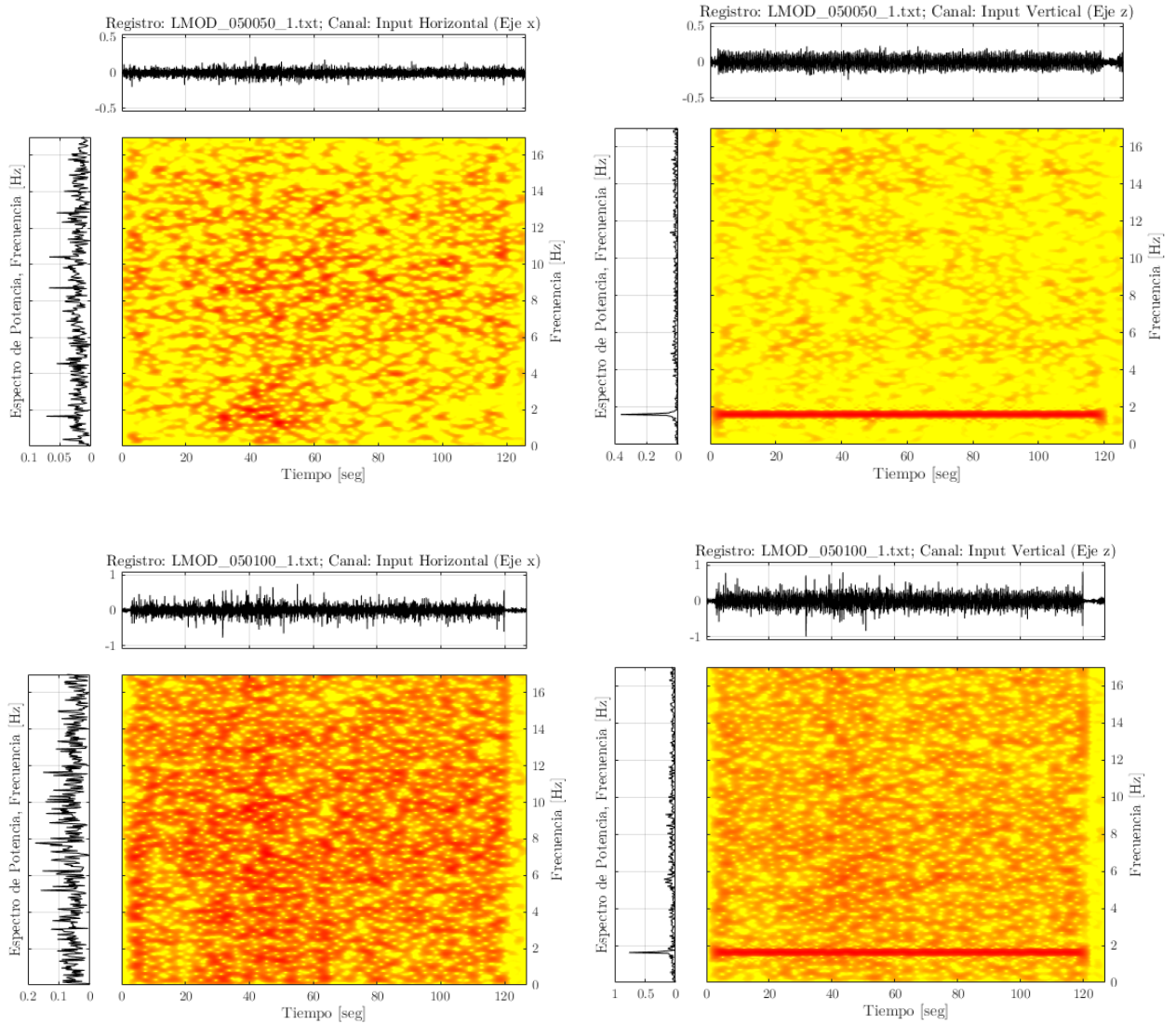


Figura 0-56: Espectrogramas para Registros ‘LMO’.

A.6 Fuerza Horizontal ejercida por DMS

Para cada configuración de ensayo en que se implementa el DMS, se presenta el vector de fuerzas utilizado:

A.1.5 Fuerza Horizontal, Registros ‘KOBE’

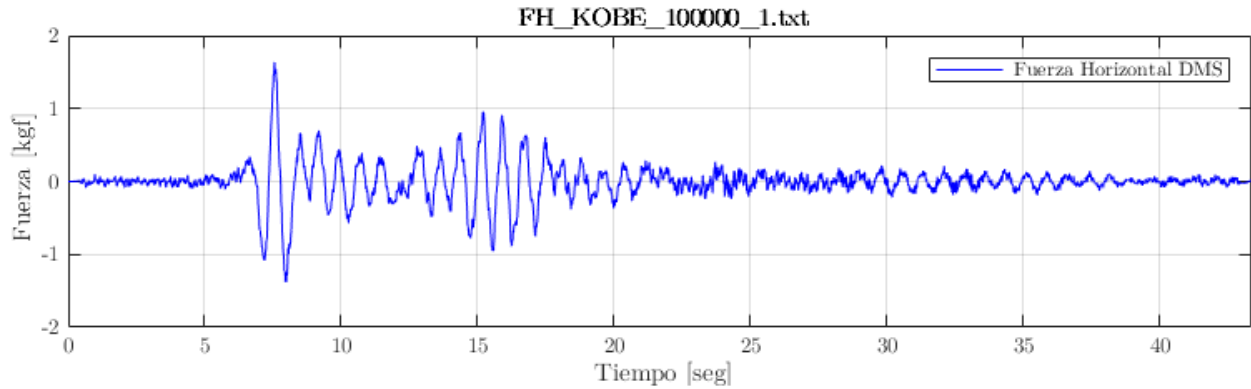


Figura 0-57: Archivo de vector de fuerzas “FH_KOBE_100000_1.txt”.

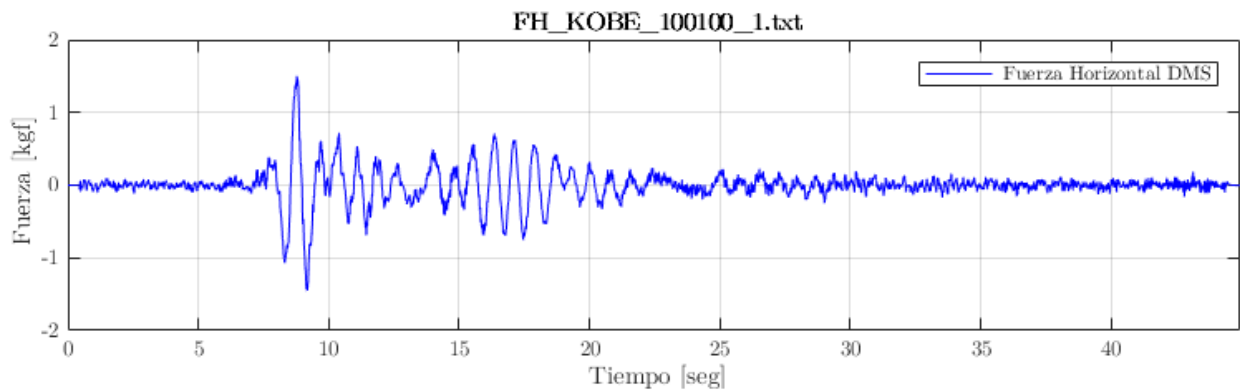


Figura 0-58: Archivo de vector de fuerzas “FH_KOBE_100100_1.txt”.

A.1.6 Fuerza Horizontal, Registros ‘LLOL’

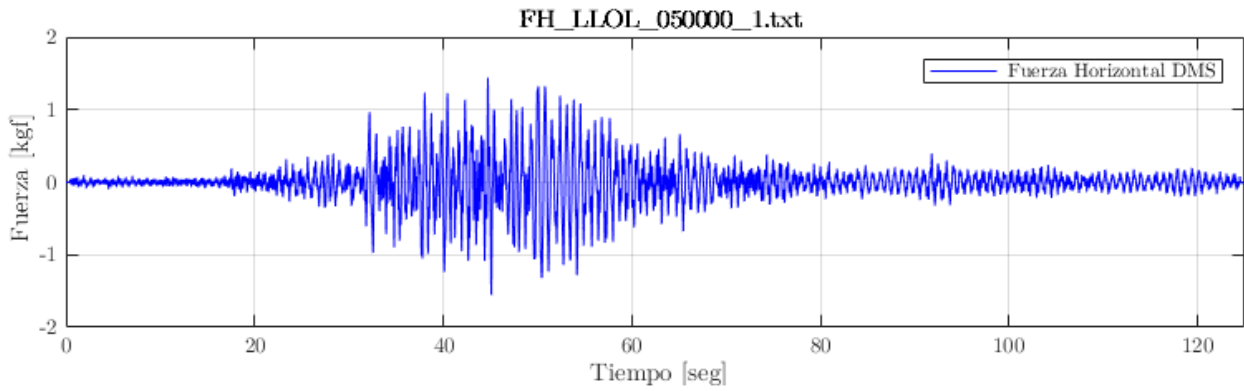


Figura 0-59: Archivo de vector de fuerzas “FH_LLOL_050000_1.txt”.

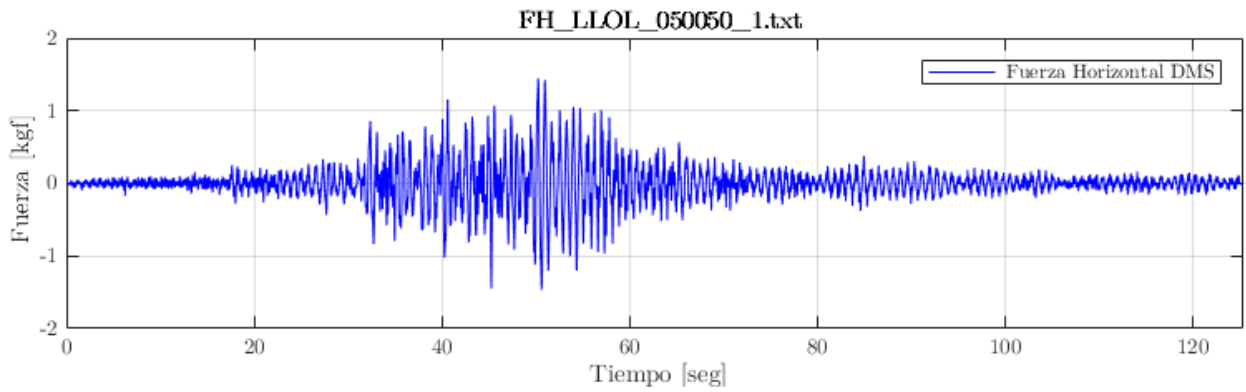


Figura 0-60: Archivo de vector de fuerzas “FH_LLOL_050050_1.txt”.

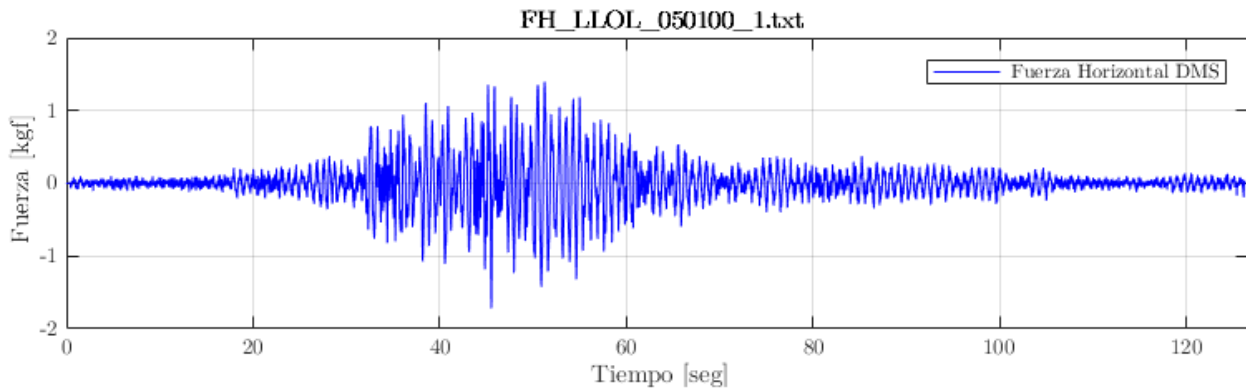


Figura 0-61: Archivo de vector de fuerzas “FH_LLOL_050100_1.txt”.

A.1.7 Fuerza Horizontal, Registros ‘PICA

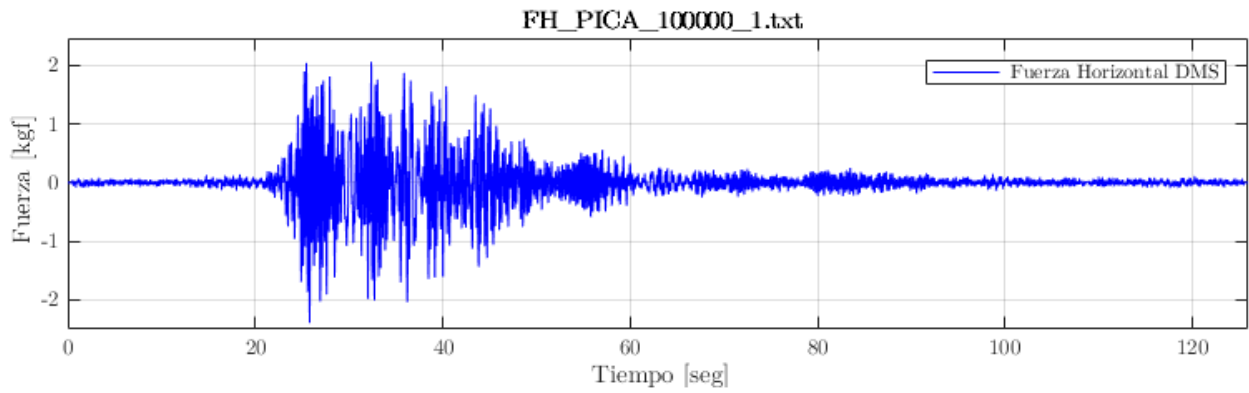


Figura 0-62: Archivo de vector de fuerzas “FH_PICA_100000_1.txt”.

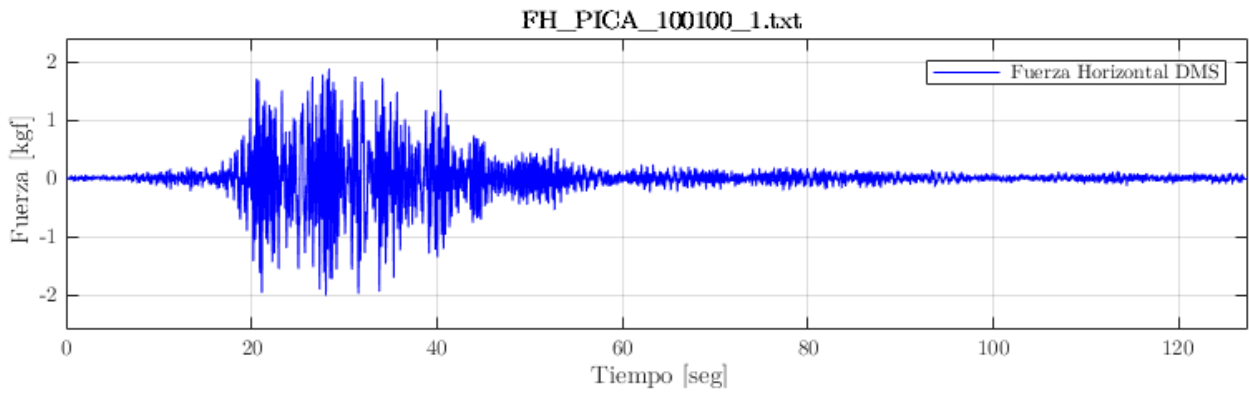


Figura 0-63: Archivo de vector de fuerzas “FH_PICA_100100_1.txt”.

A.1.8 Fuerza Horizontal, Registros ‘LMOB’

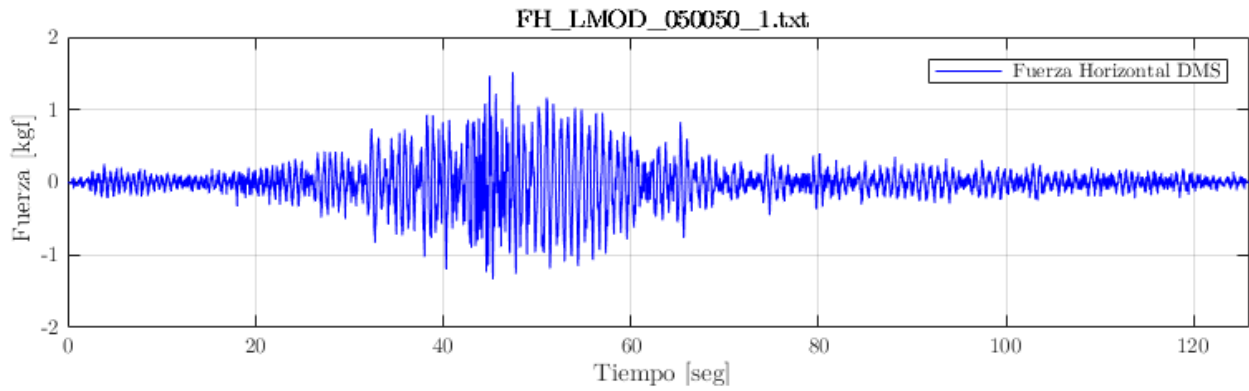


Figura 0-64: Archivo de vector de fuerzas “FH_LMOD_050050_1.txt”.

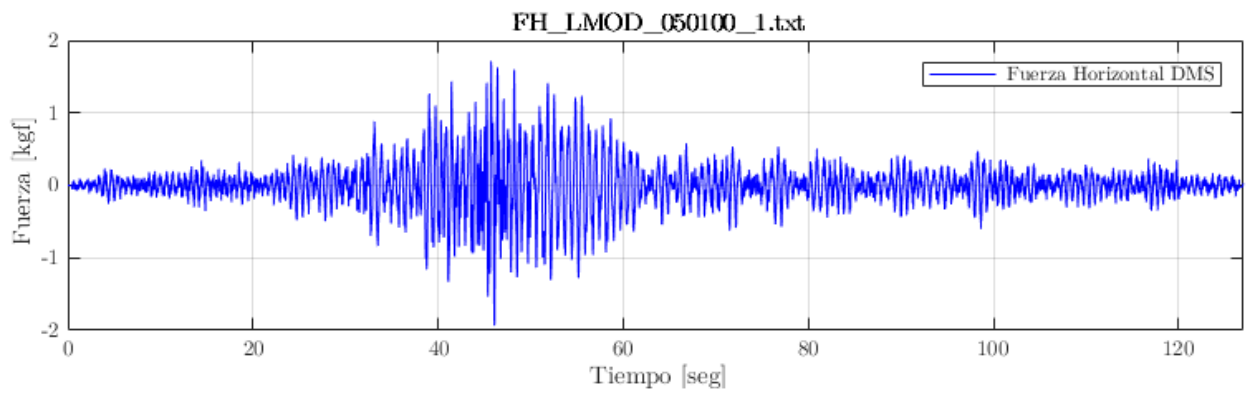


Figura 0-65: Archivo de vector de fuerzas “FH_LMOD_050100_1.txt”.

A.7 Desplazamiento entre niveles

A.7.1 Desplazamiento entre niveles, Registros 'KOBE'

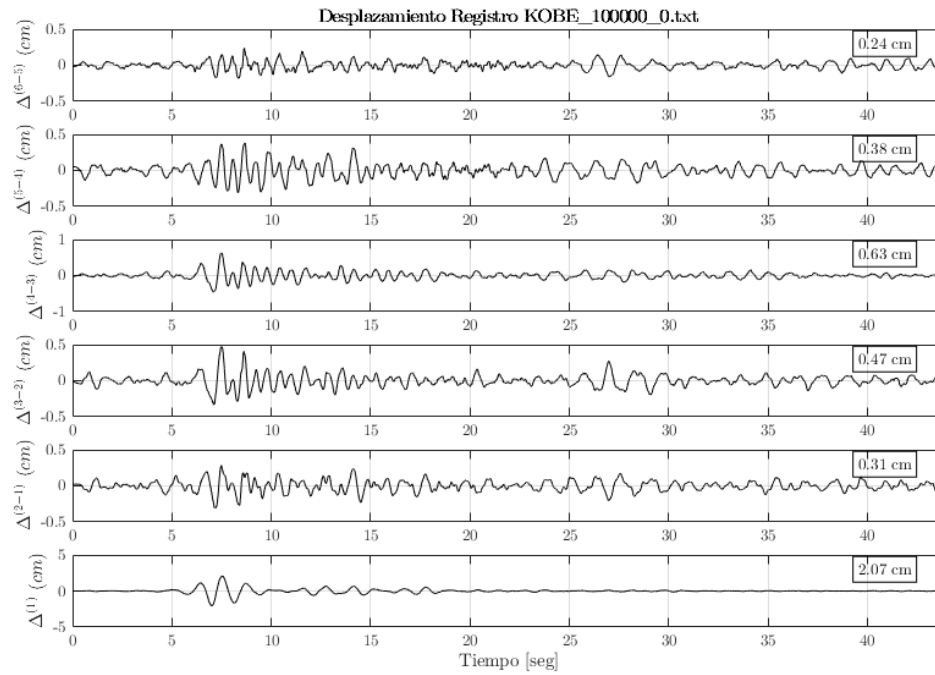


Figura 0-66: Desplazamiento entre niveles, Registro "KOBE_100000_0".

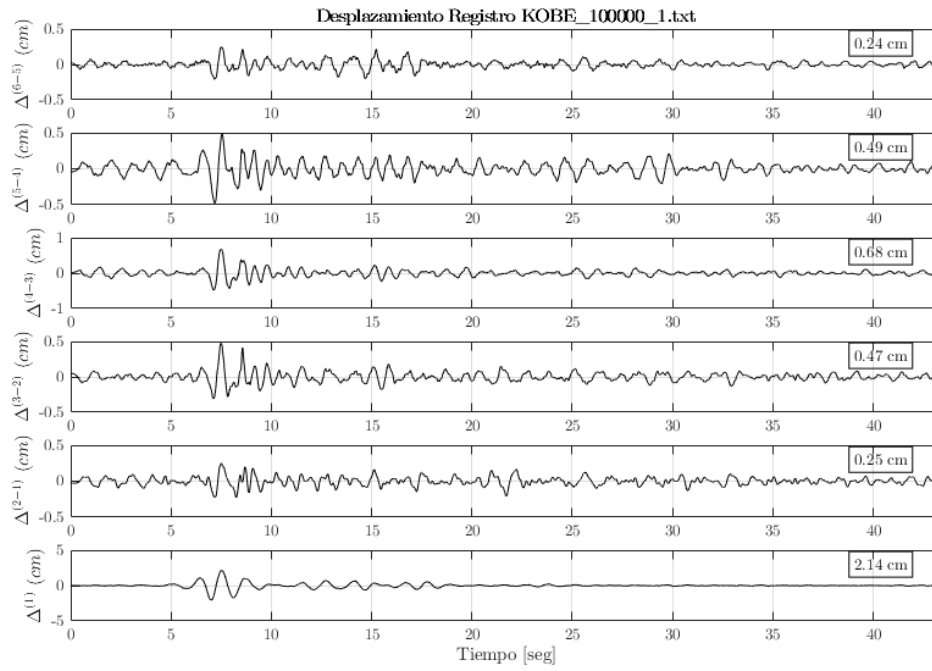


Figura 0-67: Desplazamiento entre niveles, Registro “KOB_E_100000_1”.

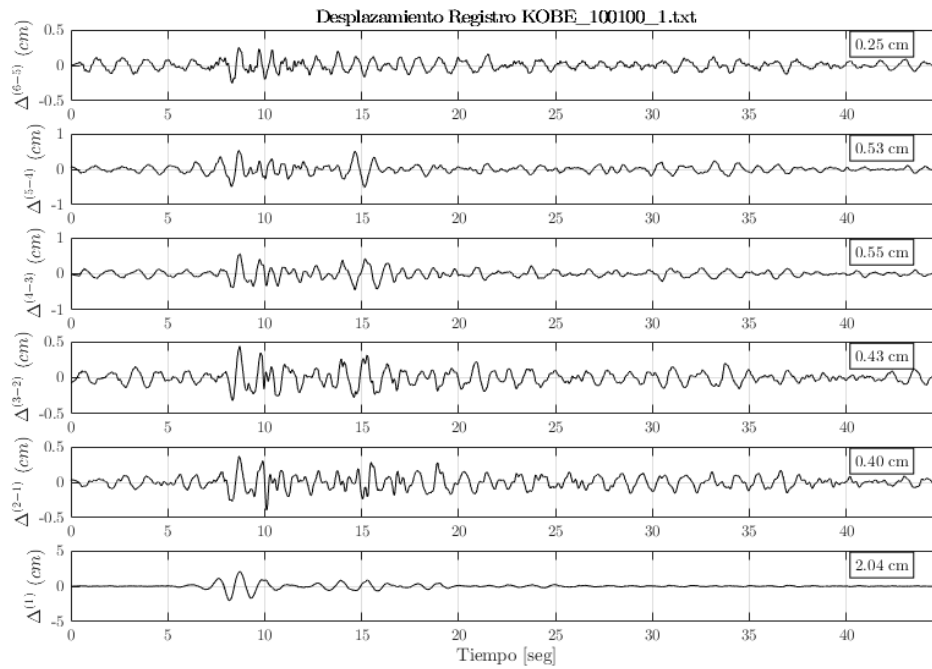


Figura 0-68: Desplazamiento entre niveles, Registro “KOB_E_100100_1”.

A.7.2 Desplazamiento entre niveles, Registros ‘LLOL’

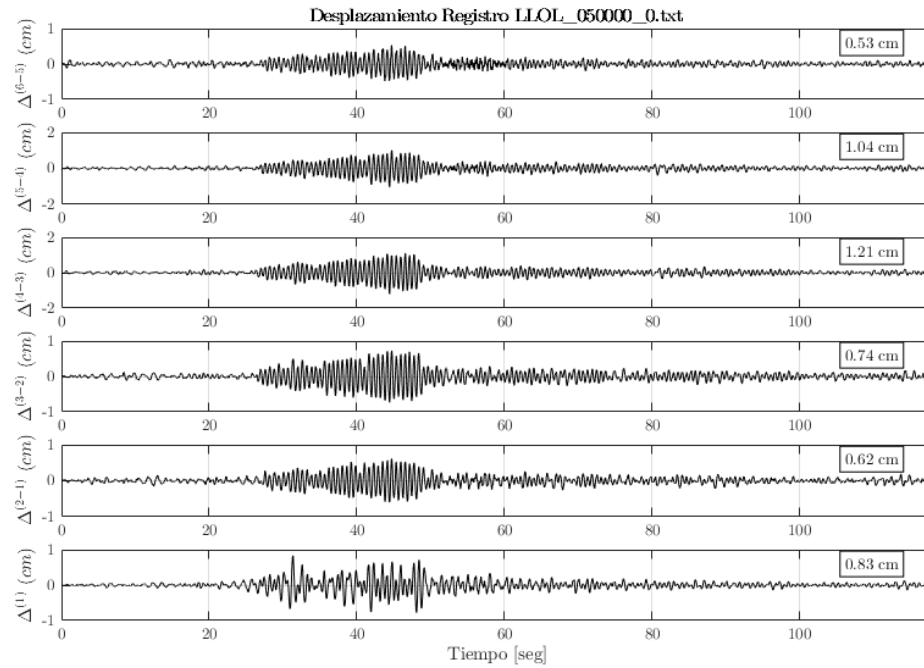


Figura 0-69: Desplazamiento entre niveles, Registro “LLOL_050000_0”.

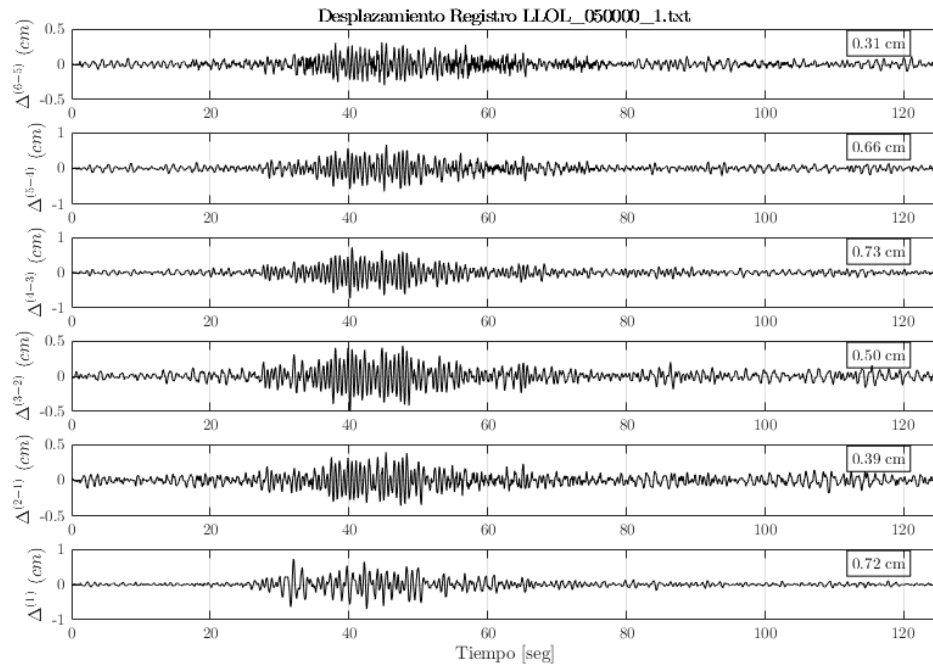


Figura 0-70: Desplazamiento entre niveles, Registro “LLOL_050000_1”.

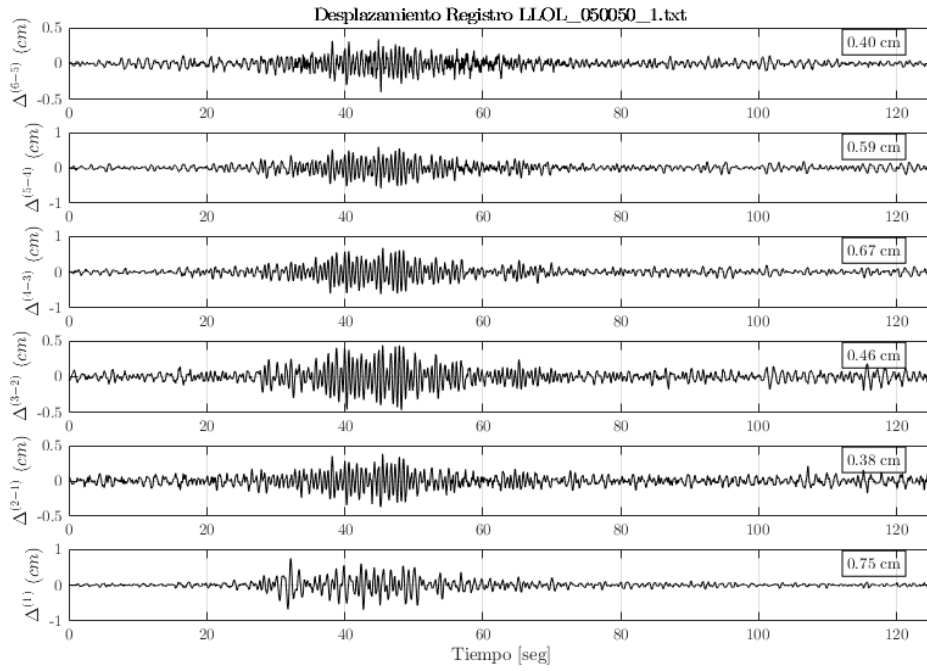


Figura 0-71: Desplazamiento entre niveles, Registro “LLOL_050050_1”.

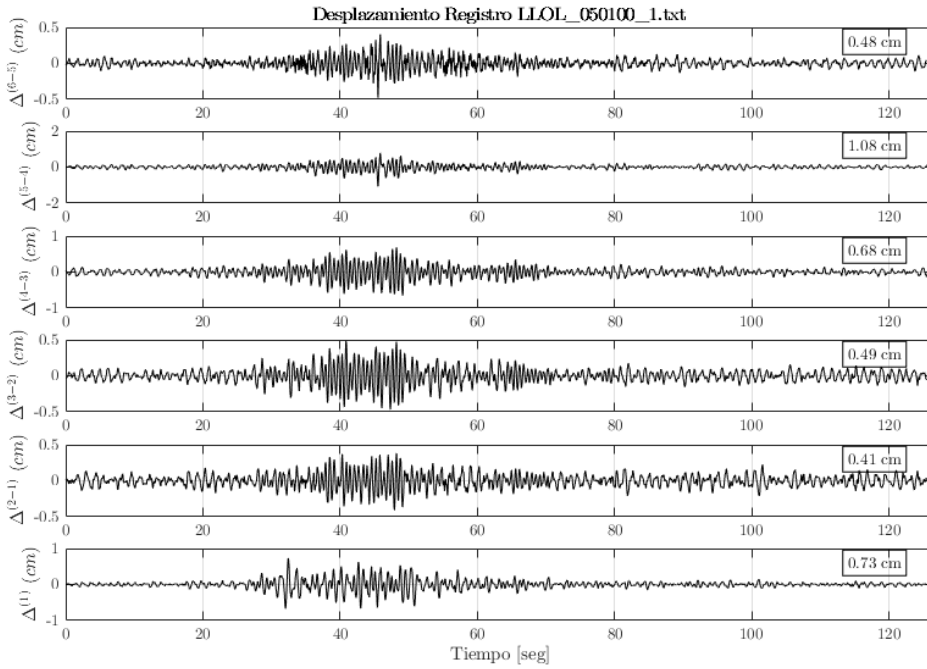


Figura 0-72: Desplazamiento entre niveles, Registro “LLOL_050100_1”.

A.7.3 Desplazamiento entre niveles, Registros ‘PICA’

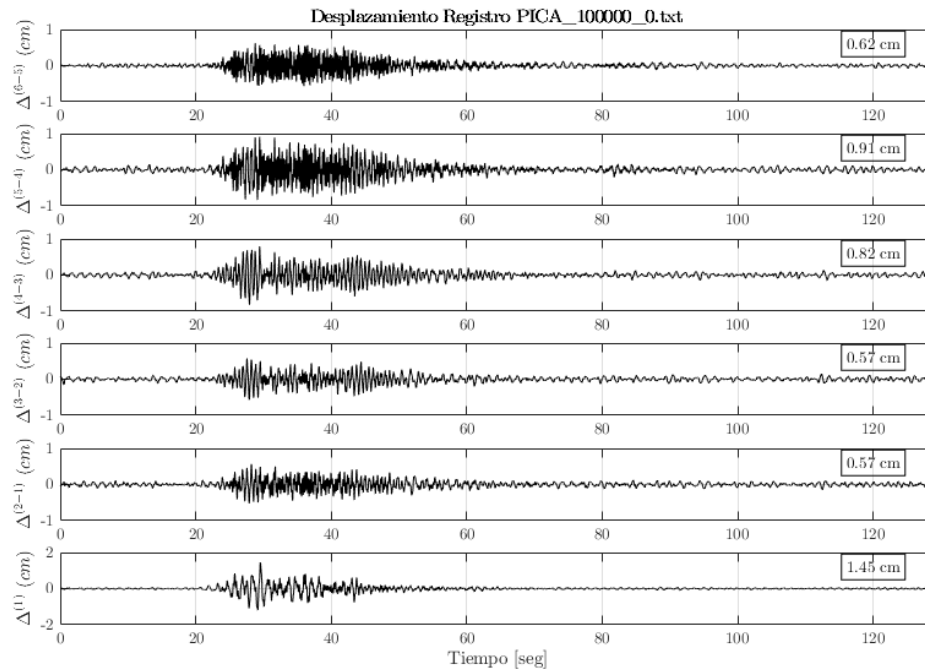


Figura 0-73: Desplazamiento entre niveles, Registro “PICA_100000_0”.

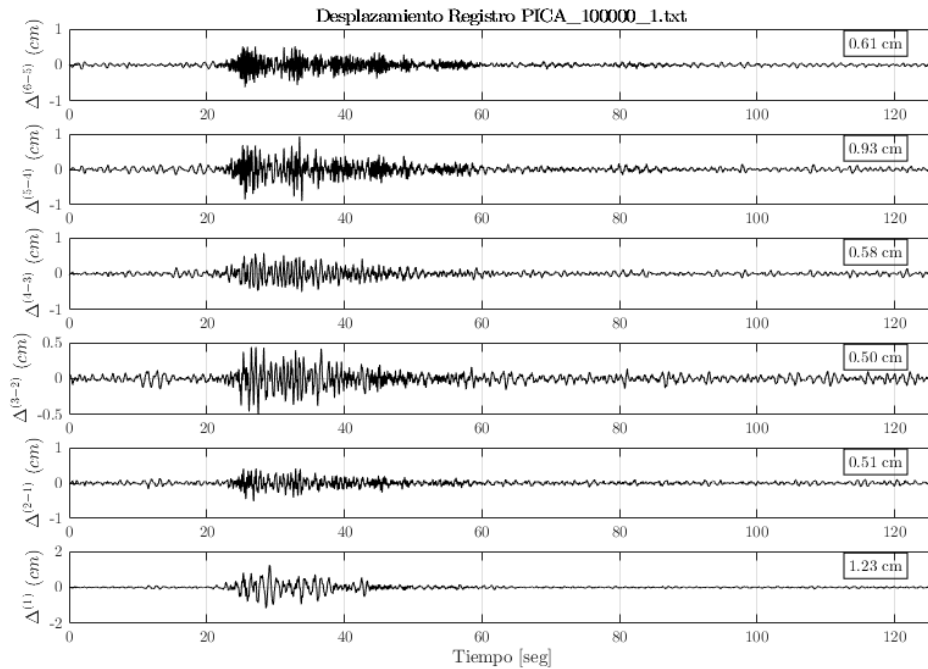


Figura 0-74: Desplazamiento entre niveles, Registro “PICA_100000_1”.

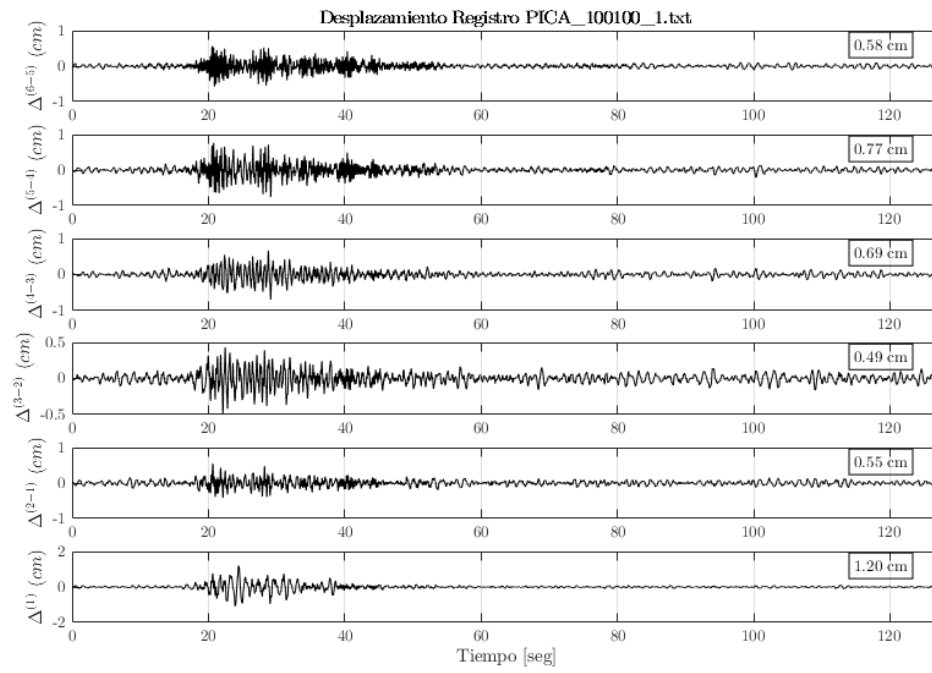


Figura 0-75: Desplazamiento entre niveles, Registro “PICA_100100_1”.

A.7.4 Desplazamiento entre niveles, Registros ‘LMOD’

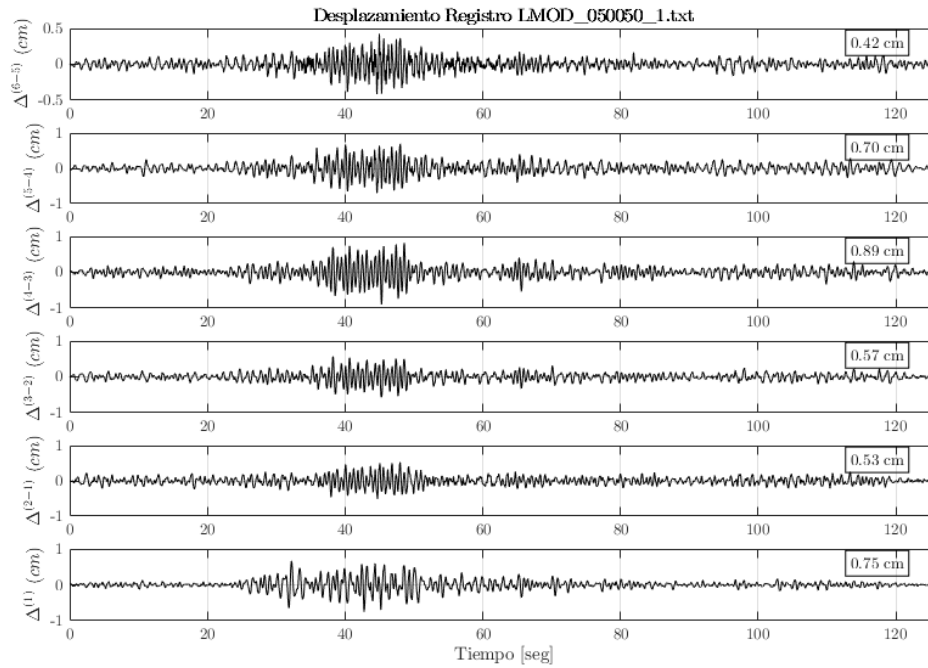


Figura 0-76: Desplazamiento entre niveles, Registro “LMOD_050050_1”.

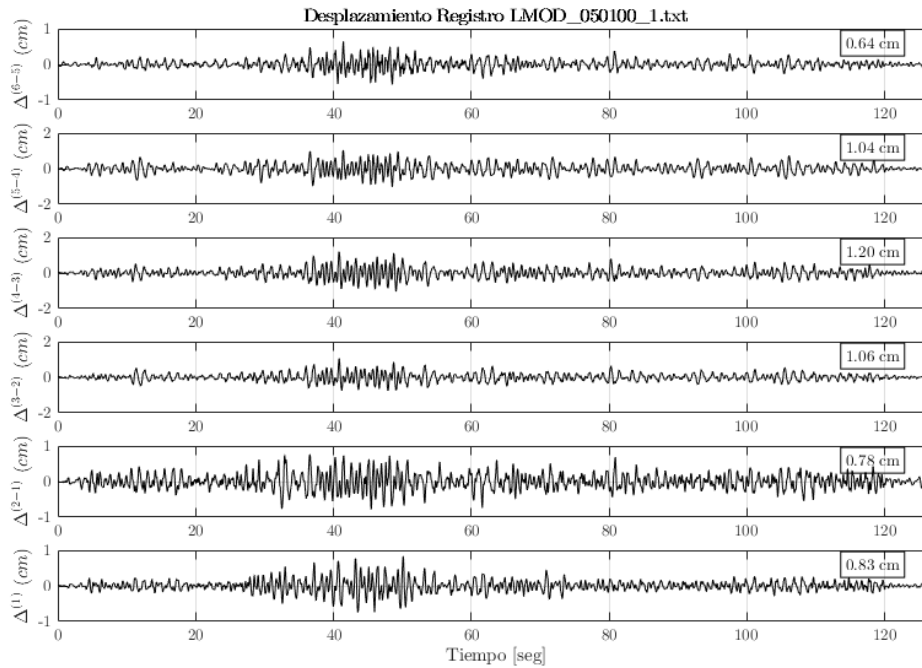


Figura 0-77: Desplazamiento entre niveles, Registro “LMOD_050100_1”.

A.8 Corte entre niveles

A.8.1 Corte entre niveles, Registros ‘KOBE’

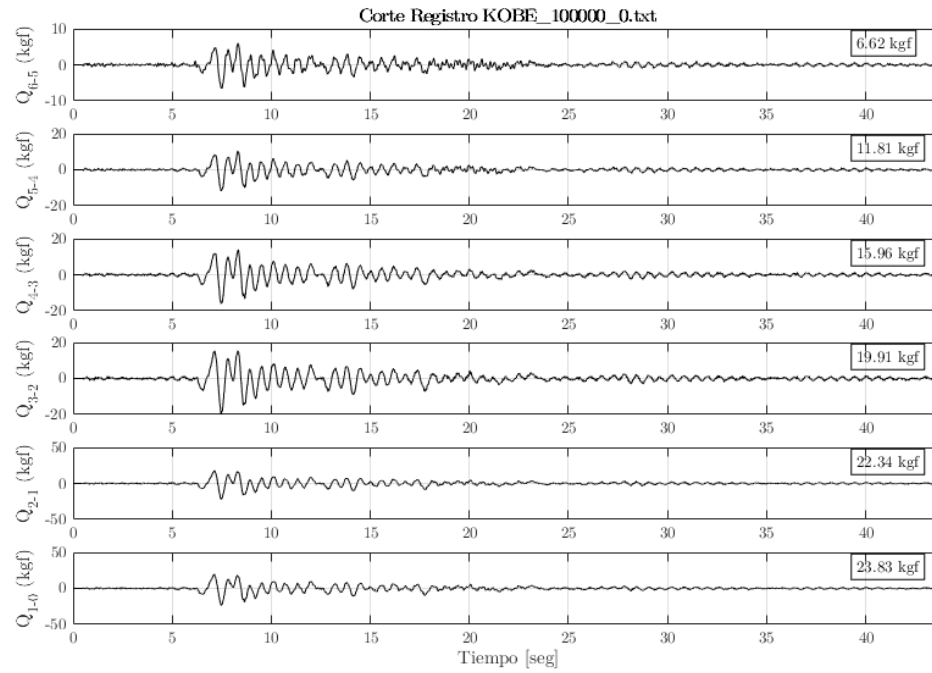


Figura 0-78: Corte entre niveles, Registro “KOBE_100000_0”.

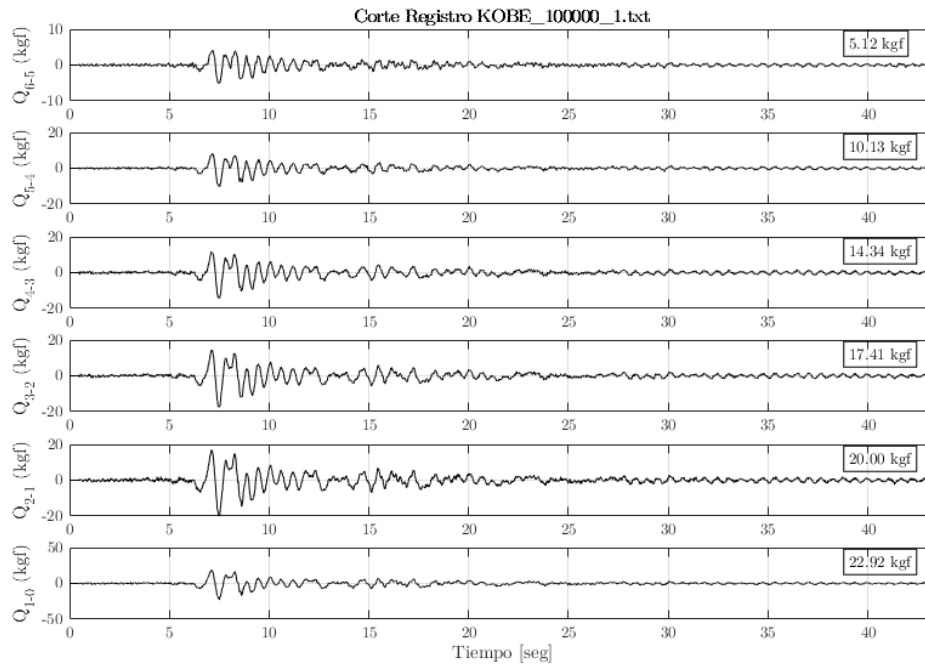


Figura 0-79: Corte entre niveles, Registro “KOBE_100000_1”.

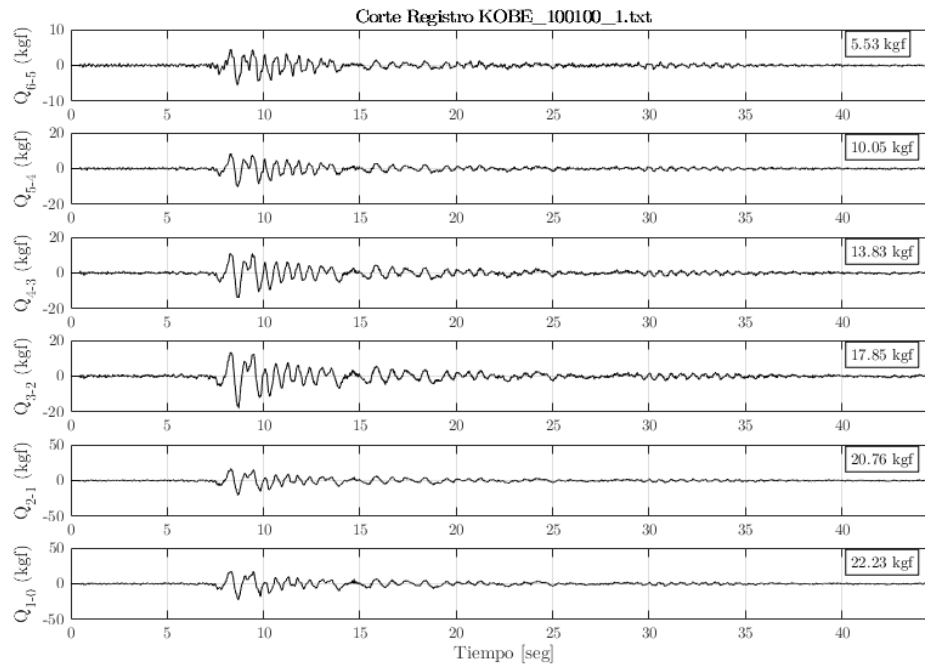


Figura 0-80: Corte entre niveles, Registro “KOBE_100100_1”.

A.8.2 Corte entre niveles, Registros ‘LLOL’

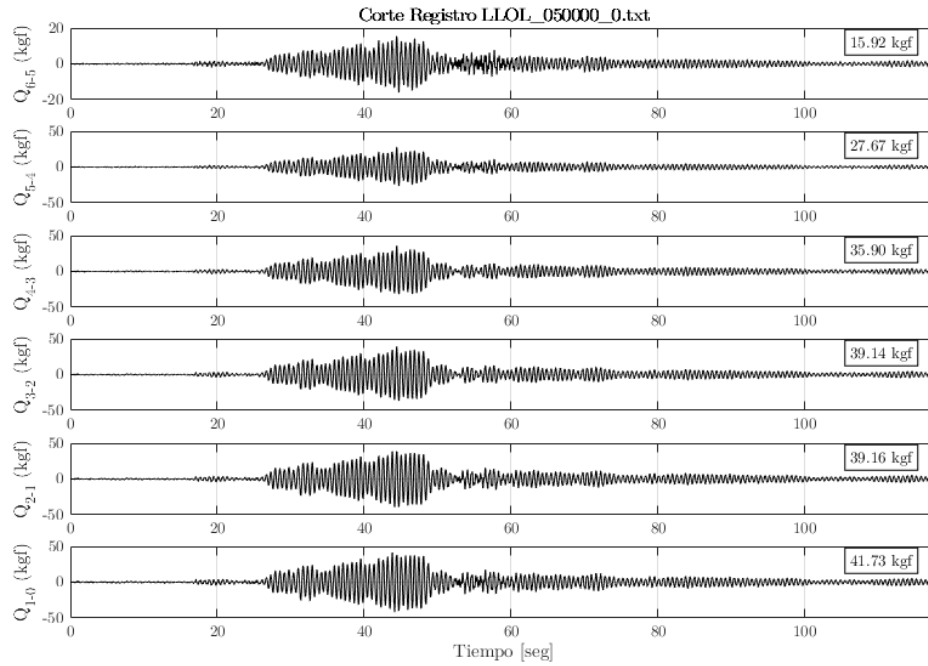


Figura 0-81: Corte entre niveles, Registro “LLOL_050000_0”.

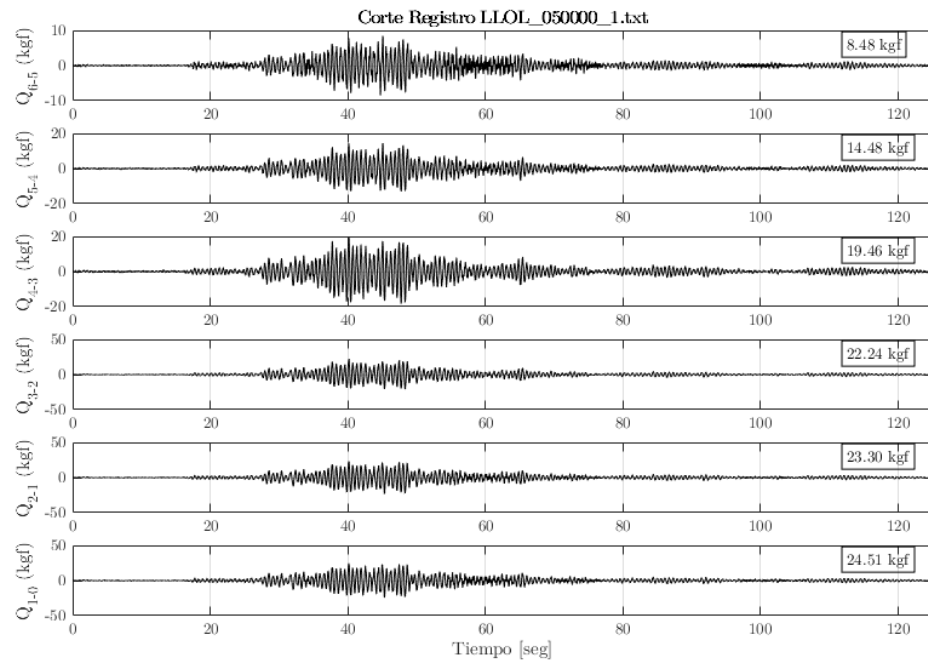


Figura 0-82: Corte entre niveles, Registro “LLOL_050000_1”.

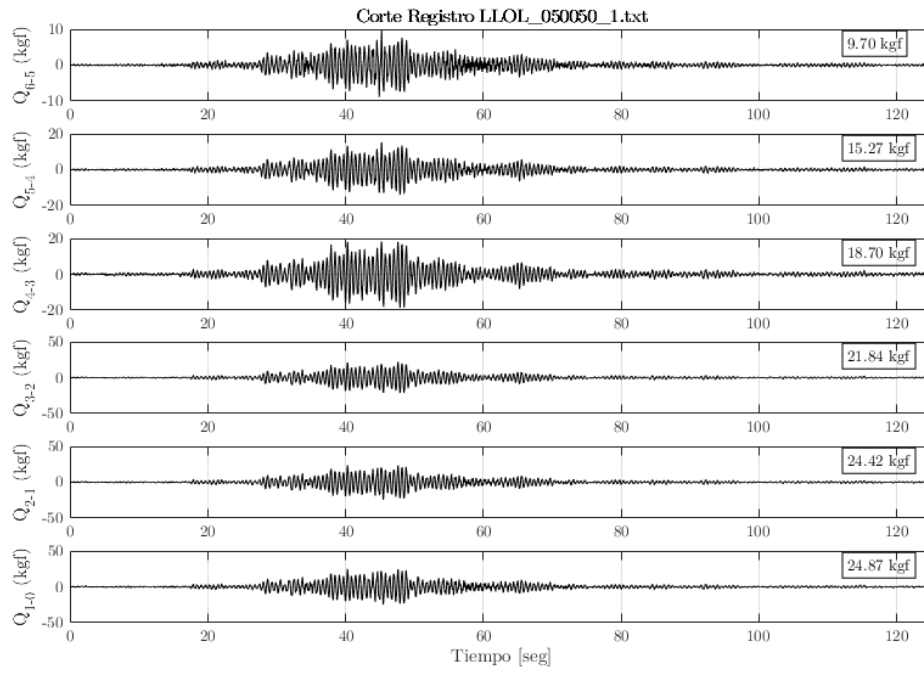


Figura 0-83: Corte entre niveles, Registro “LLOL_050050_1”.

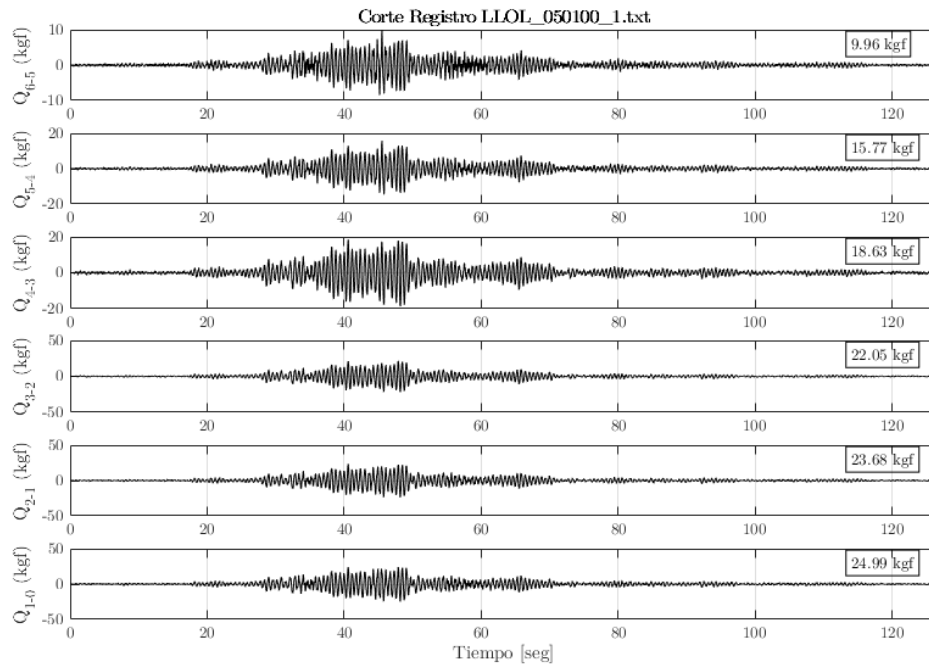


Figura 0-84: Corte entre niveles, Registro “LLOL_050100_1”.

A.8.3 Corte entre niveles, Registros ‘PICA’

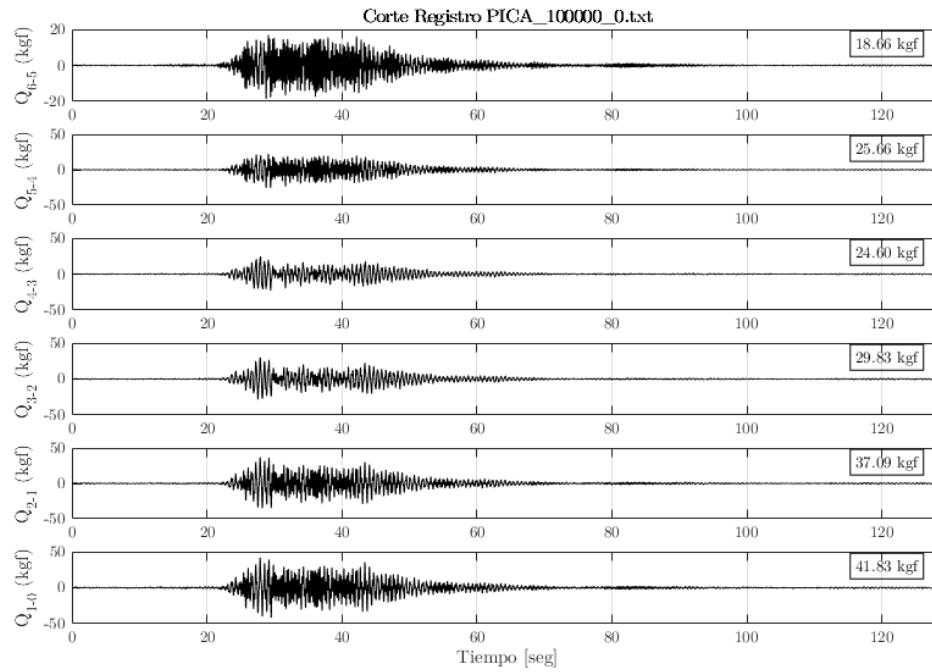


Figura 0-85: Corte entre niveles, Registro “PICA_100000_0”.

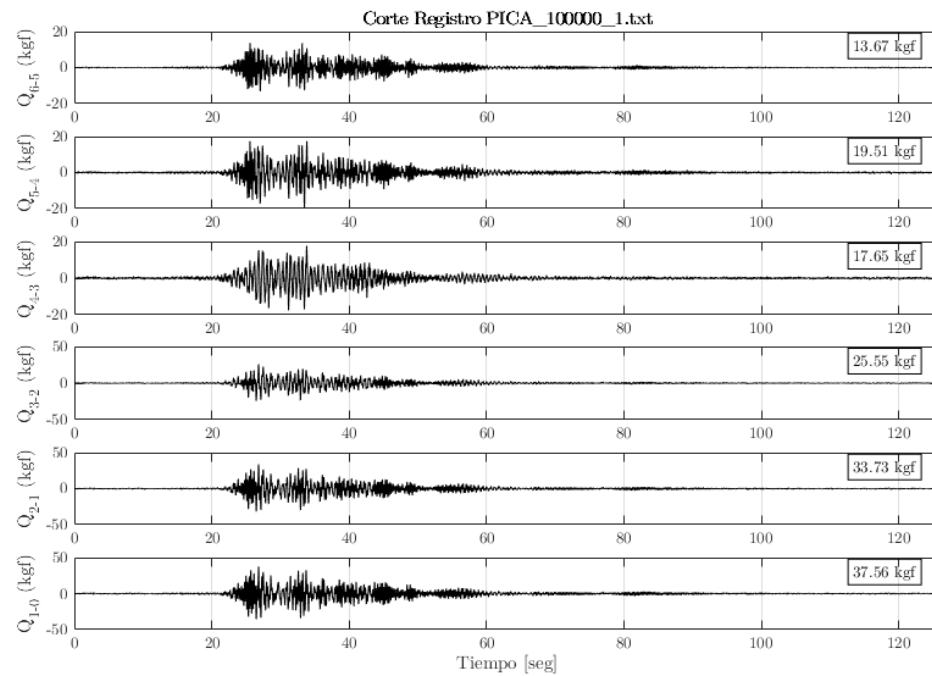


Figura 0-86: Corte entre niveles, Registro “PICA_100000_1”.

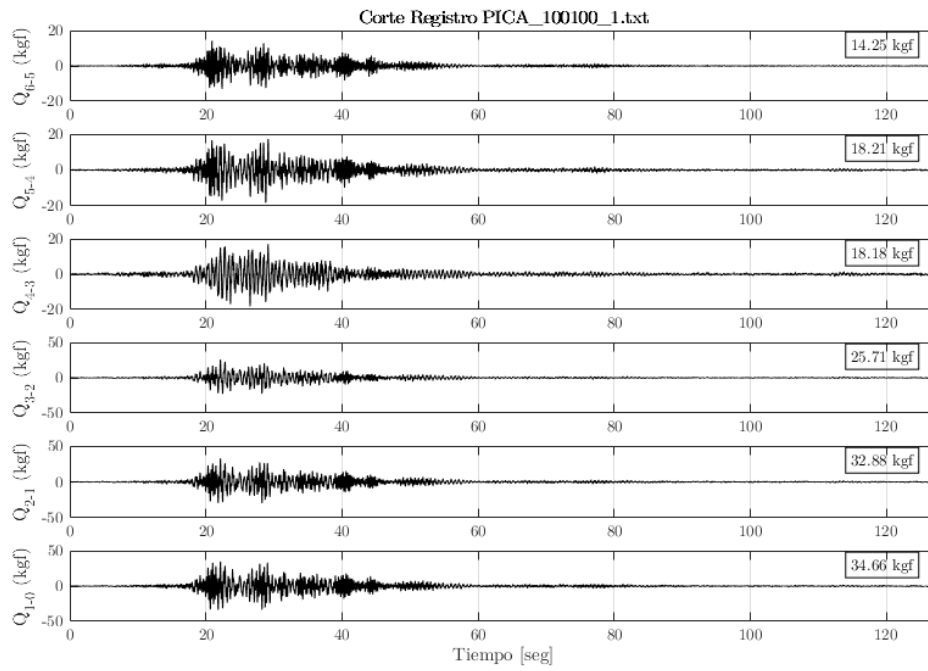


Figura 0-87: Corte entre niveles, Registro “PICA_100100_1”.

A.8.4 Corte entre niveles, Registros ‘LMO’

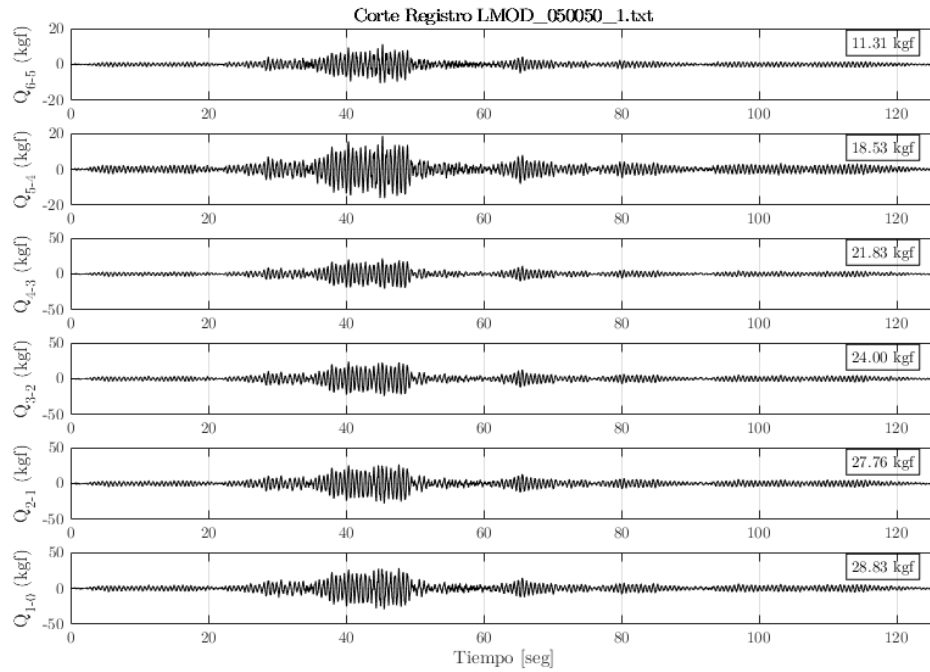


Figura 0-88: Corte entre niveles, Registro “LMO_050050_1”.

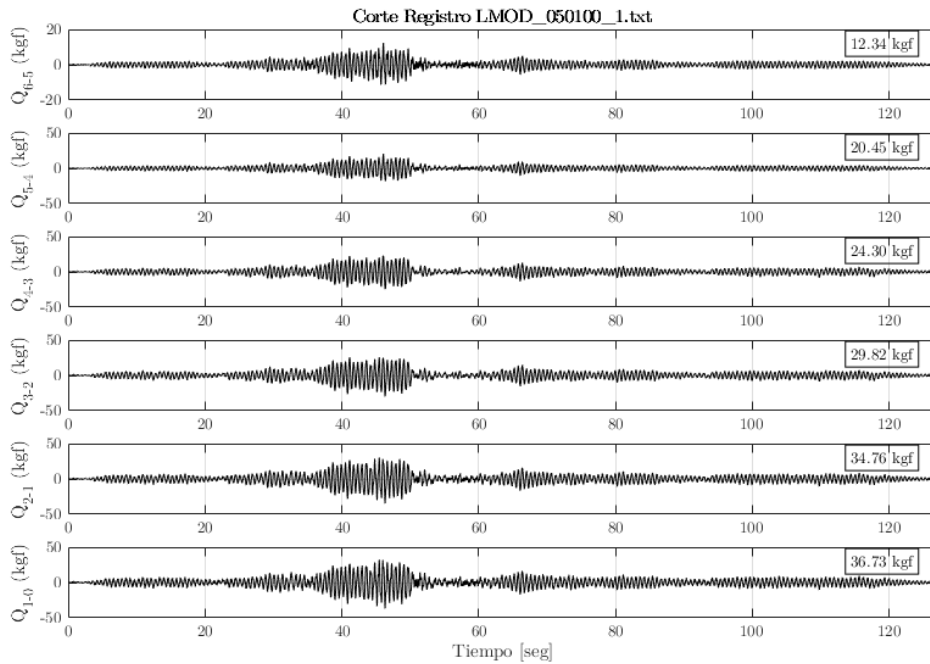


Figura 0-89: Corte entre niveles, Registro “LMO_050100_1”.

