



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

“DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON SISTEMA DE CABLES Y POLEAS”

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LEONARDO SEBASTIÁN BELMAR VÁSQUEZ

PROFESOR GUÍA:

FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RODRIGO ASTROZA EULUFÍ

FABIÁN ROJAS BARRALES

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil con mención en Estructuras, Construcción y Geotecnia.

POR: Leonardo Sebastián Belmar Vásquez

FECHA: 11/11/2019

PROFESOR GUÍA: Francisco Hernández Prado

“DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON SISTEMA DE CABLES Y POLEAS”

El propósito de esta memoria es realizar estudios experimentales que permitan estudiar las propiedades de disipación de energía sísmica de una estructura a escala de acero de cinco pisos, que cuenta con un sistema de disipación de energía atado a toda la estructura mediante un sistema de cables y poleas. A través de ensayos en mesa de vibrar se observa que el sistema propuesto es eficiente ya que proporciona un nivel de disipación de energía comparable a un sistema que emplea múltiples disipadores de energía distribuidos en diversos niveles de la estructura, aportando con tasas de amortiguamiento que alcanzan un valor entre 10-20% para todos los modos.

En este contexto, se estudió experimentalmente la estructura bajo distintas configuraciones: i) la estructura sin sistemas de disipación, ii) el uso de disipadores visco-elásticos en tres niveles, iii) la utilización de disipadores visco-elásticos en todos los niveles, y iv) un sistema de disipación compuesto por cables y poleas. Los ensayos son realizados sobre la mesa vibradora del Laboratorio Experimental de Estructuras de la Universidad de Chile, incluyendo ensayos del tipo pull-back y del tipo sísmico bajo la acción del registro de Concepción centro del 27/02/2010 escalado al 50%. La estructura es instrumentada con acelerómetros en cada uno de sus niveles, de manera de monitorear la respuesta estructural y su entrada sísmica.

Las propiedades dinámicas de la estructura, entre ellas el nivel de amortiguamiento provisto, se obtienen utilizando el método DSI (*Deterministic-Stochastic Subspace Identification*) para la respuesta estructural completa y por pequeñas ventanas de tiempo. Los resultados obtenidos mediante estos métodos muestran que la estructura presenta una respuesta altamente no-lineal, presentando cambios significativos a través del tiempo de sus frecuencias modales, formas modales y tasas de amortiguamiento crítico. En este contexto se señala que la estructura es capaz de volver a su estado original una vez finalizado el movimiento sísmico fuerte. Por este motivo es que se realizó un modelo MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), capaz de estimar la evolución temporal de las propiedades dinámicas a través del tiempo (frecuencias modales, tasas de amortiguamiento crítico y formas modales) ajustando la respuesta medida a una respuesta modelada en función de la respuesta no-lineal modal. Adicionalmente, se analizan los ensayos del tipo pull-back, mediante los métodos de Ibrahim y de decaimiento logarítmico, con los cuales se determinan las tasas de amortiguamiento provistas por cada una de las configuraciones estructurales estudiadas. Finalmente, se procede a comparar los resultados de las distintas configuraciones estructurales en término de sus tasas de amortiguamiento provistas y en base a la comparación del corte y desplazamientos relativos de entre piso observados en los ensayos sísmicos.

*Dedicado a mi familia por su
constante apoyo y cariño.*

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mis padres, quiénes siempre han estado a mi lado, me han apoyado y brindado su cariño. También a mis hermanos, que me han compartido y brindado de su apoyo y alegría. A mis mascotas y al deporte, que me divierten a la vez que me mantienen ocupado y relajado, lo cual fue especialmente útil para centrarme en el desarrollo de este trabajo.

A los amigos y conocidos que hice durante este período de tiempo, quiénes me acompañaron y apoyaron, además de hacer que este período de tiempo en la universidad fuese más ameno y disfrutable.

Un agradecimiento especial para mi profesor guía, Francisco Hernández, por su preocupación, dedicación, disponibilidad y compromiso de principio a fin en el desarrollo de este trabajo y en mi formación profesional.

También agradecer a los profesores de la comisión, Rodrigo Astroza y Fabián Rojas, al profesor Juan Felipe Beltrán y a los profesores encargados del LEE, Pedro Soto y Víctor, quiénes siempre tuvieron la disponibilidad y voluntad de recibirme y responder cualquier duda, además de apoyarme y aportar con distintas visiones del tema.

Finalmente, agradecer a todos los profesores y funcionarios del departamento de Ingeniería Civil, cuyos esfuerzos han permitido mi desarrollo íntegro como futuro profesional así como también el de muchos otros compañeros y compañeras del departamento.

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivos Generales	5
1.2.2. Objetivos Específicos	5
1.3. Metodología.....	5
1.3.1. Revisión Bibliográfica	5
1.3.2. Preparación de la Estructura y Ensayos.....	6
1.3.3. Análisis de Resultados	6
Capítulo 2 Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas	7
2.1. Método de Ibrahim.....	7
2.2. Método DSI (Deterministic-Stochastic Subspace Identification).....	8
Capítulo 3 Descripción de la Estructura y sus Elementos Componentes.....	11
3.1. Descripción de la Estructura.....	11
3.2. Estimación del Cable a Utilizar	14
3.3. Sistema de Poleas.....	18
3.4. Disipadores de Energía.....	20
3.5. Descripción del Sistema de Adquisición de Datos.....	30
Capítulo 4 Resultados y Comentarios.....	33
4.1. Matriz de Ensayos.....	33
4.2. Ensayos Pull-Back.....	38
4.2.1. Mediante Método de Ibrahim.....	38
4.2.2. Mediante Decaimiento Logarítmico.....	41
4.3. Ensayos Dinámicos.....	52
4.3.1. Mediante Método DSI.....	54
4.3.2. Mediante Método DSI para Pequeñas Ventanas de Tiempo.....	61

4.4. Corte y Desplazamientos	74
4.4.1. Configuración A	75
4.4.2. Configuración B	79
4.4.3. Configuración B2	83
4.4.4. Configuración C	87
4.4.5. Configuración D	91
4.4.6. Configuración E	95
4.4.7. Configuración E2	99
4.4.8. Configuración F	103
4.4.9. Configuración F2	107
4.4.10. Comparación entre Configuraciones	111
Capítulo 5 Ajuste Teórico – Método Z(var).....	120
5.1. Configuración A	127
5.2. Configuración B2	128
5.3. Configuración D	131
5.4. Configuración E2	135
5.5. Comentarios Finales del Ajuste Teórico.....	138
Capítulo 6 Conclusiones y Comentarios Finales.....	140
Capítulo 7 Bibliografía.....	145
Capítulo 8 Anexos.....	147
8.1. Anexo A: Resultados mediante Ibrahim.....	147
8.2. Anexo B: Análisis en Frecuencia, Ensayos Pull-Back.....	152
8.2.1. Configuración A	153
8.2.2. Configuración B	154
8.2.3. Configuración B2	155
8.2.4. Configuración C	156
8.2.5. Configuración D	157
8.2.6. Configuración E	158

8.2.7. Configuración E2	159
8.2.8. Configuración F	160
8.2.9. Configuración F2	161
8.3. Anexo C: Resultados mediante DSI	162
8.3.1. Configuración A	162
8.3.2. Configuración B	166
8.3.3. Configuración B2	170
8.3.4. Configuración C	174
8.3.5. Configuración D	178
8.3.6. Configuración E	182
8.3.7. Configuración E2	186
8.3.8. Configuración F	190
8.3.9. Configuración F2	194
8.4. Anexo D: Resultados mediante DSI para Pequeñas Ventanas de Tiempo	199
8.4.1. Configuración A	199
8.4.2. Configuración B	202
8.4.3. Configuración B2	206
8.4.4. Configuración C	210
8.4.5. Configuración D	214
8.4.6. Configuración E	218
8.4.7. Configuración E2	222
8.4.8. Configuración F	226
8.4.9. Configuración F2	230

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Peso por Nivel de la Estructura Tipo.	14
Tabla 3.2. Diámetro Calculado del Cable.....	16
Tabla 3.3. Propiedades Mecánicas del Cable ASTM A36 1x19 2 [mm].	17
Tabla 3.4. Propiedades teóricas de los resortes para disipadores Tipo I y Tipo II.	21
Tabla 3.5. Matriz de Ensayos para Disipadores.....	24
Tabla 3.6. Peso de Configuraciones Estructurales - Ensayos de Disipadores.....	29
Tabla 3.7. Resumen Propiedades Dinámicas de los Disipadores.....	29
Tabla 3.8. Constantes de Sensibilidad los Acelerómetros.....	32
Tabla 4.1. Configuraciones Estructurales por Estudiar.....	33
Tabla 4.2. Procedimiento de Ensayos tipo Pull-Back.	37
Tabla 4.3. Procedimientos de Ensayos tipo Dinámico.....	37
Tabla 4.4. Resumen de Modos y Tasas de Amortiguamiento – Ibrahim.	40
Tabla 4.5. Resumen Frecuencias y Tasas de Amortiguamiento - 1° Modo.....	51
Tabla 4.6. Resumen de Modos y Tasas de Amortiguamiento - DSI.....	60
Tabla 6.1. Configuraciones Estructurales Estudiadas.	140
Tabla 6.2. Configuraciones Estructurales en Análisis.....	142
Tabla 8.1. Relación entre Canales y la Estructura - Análisis de Frecuencia.....	152

Índice de Figuras

Figura 1.1. Ejemplo de Disipadores de Energía. Izq.: Amortiguador metálico instalado en apoyo de puente. Der.: Amortiguador viscoso instalado en apoyo de puente. Fuente: Protección Sísmica de Estructuras, 2012.	1
Figura 1.2. Ejemplo de la instalación de dispositivos de disipación de energía.	3
Figura 1.3. Esquema del Sistema Propuesto.	4
Figura 2.1. Representación gráfica del modelo espacio-estado en tiempo discreto, considerando un sistema lineal constante en el tiempo. Fuente: Van Overschee & De Moor, 1996.	9
Figura 3.1. Vista niveles tipo de la estructura. Fuente: Versluys (2017).	11
Figura 3.2. Losa tipo de 30cm x 30cm. Fuente: Versluys (2017).	12
Figura 3.3. (a) Conexión universal 4cm x 4 cm. (b) Conexión Universal 8cm x 8cm. Fuente: Versluys (2017).	12
Figura 3.4. Vista a conexiones columna-loza y columna-placa de conexión. Fuente: Versluys (2017).	13
Figura 3.5. Placa base de la estructura. Fuente: Versluys (2017).	13
Figura 3.6. Partes de un cable de acero. Fuente: Catalogo de Cables de Acero.	16
Figura 3.7. Vista transversal de un cable 1x19. Fuente: Catálogo de Cables de Acero.	17
Figura 3.8. Elemento L para conexión de poleas a la estructura.	18
Figura 3.9. Ubicación del elemento “L” dentro de la estructura.	18

Figura 3.10. Conexión del elemento “L” con el eje de la polea.	19
Figura 3.11. Vista de la polea en forma aislada (izquierda). Vista de la polea instalada en la estructura (derecha).	19
Figura 3.12. Amortiguadores de Absorción de Choque Utilizados. Fuente: Aliexpress.	20
Figura 3.13. Amortiguador Visco-Elástico con Placas de Metal y Resorte en Retracción Metálica.	21
Figura 3.14. Características de un resorte.	22
Figura 3.15. Estructura sin Disipadores - Configuración 0A.	23
Figura 3.16. Estructura con Disipadores Tipo I - Configuración 0B.	23
Figura 3.17. Estructura con Disipadores Tipo II - Configuración 0C.	23
Figura 3.18. Estructura 0A sobre mesa de ensayos.	24
Figura 3.19. Estructura 0B sobre mesa de ensayos.	24
Figura 3.20. Estructura 0C sobre mesa de ensayos.	25
Figura 3.21. Respuesta del 1° Modo - Configuración 0A.	26
Figura 3.22. Ajuste Lineal - Configuración 0A.	26
Figura 3.23. Respuesta del 1° Modo - Configuración 0B.	27
Figura 3.24. Ajuste Lineal - Configuración 0B.	27
Figura 3.25. Respuesta del 1° Modo - Configuración 0C.	28
Figura 3.26. Ajuste Lineal - Configuración 0C.	28
Figura 3.27. Mesa Vibradora del LEE.	30
Figura 3.28. Ubicación de los acelerómetros en estructura tipo.	31
Figura 4.1. Estructura Configuración A.	34
Figura 4.2. Estructura Tipo para Configuraciones C y D.	34
Figura 4.3. Estructura Tipo para Configuraciones B y B2.	35
Figura 4.4. Estructura Tipo para Configuraciones E y E2.	35
Figura 4.5. Estructura Tipo para Configuraciones F y F2.	36
Figura 4.6. Formas Modales, Ibrahim - Configuración A.	38
Figura 4.7. Formas Modales, Ibrahim - Configuración B2.	39
Figura 4.8. Respuesta del 1° Modo - Configuración A.	41
Figura 4.9. Ajuste Lineal - Configuración A.	42
Figura 4.10. Respuesta del 1° Modo - Configuración B.	43
Figura 4.11. Ajuste Lineal - Configuración B.	43
Figura 4.12. Respuesta del 1° Modo - Configuración B2.	44
Figura 4.13. Ajuste Lineal - Configuración B2.	44
Figura 4.14. Respuesta del 1° Modo - Configuración C.	45
Figura 4.15. Ajuste Lineal - Configuración C.	45
Figura 4.16. Respuesta del 1° Modo - Configuración D.	46
Figura 4.17. Ajuste Lineal - Configuración D.	46
Figura 4.18. Respuesta del 1° Modo - Configuración E.	47
Figura 4.19. Ajuste Lineal - Configuración E.	47
Figura 4.20. Respuesta del 1° Modo - Configuración E2.	48
Figura 4.21. Ajuste Lineal - Configuración E2.	48
Figura 4.22. Respuesta del 1° Modo - Configuración F.	49
Figura 4.23. Ajuste Lineal - Configuración F.	49

Figura 4.24. Respuesta del 1° Modo - Configuración F2.	50
Figura 4.25. Ajuste Lineal - Configuración F2.	50
Figura 4.26. Aceleración Basal para las Distintas Configuraciones - Registro Sísmico: Concepción 50%.	52
Figura 4.27. Espectro de Potencia - Registro Sísmico Concepción.	53
Figura 4.28. Espectro Elástico - Registro Sísmico Concepción.	53
Figura 4.29. Diagrama de Estabilidad - Configuración A.	55
Figura 4.30. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración A.	56
Figura 4.31. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración A.	56
Figura 4.32. Diagrama de Estabilidad - Configuración B2.	57
Figura 4.33. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración B2.	57
Figura 4.34. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración B2.	58
Figura 4.35. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración E2.	58
Figura 4.36. Diagrama de Estabilidad, $t_1=45$ [s] - Configuración A.	62
Figura 4.37. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración A.	63
Figura 4.38. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración A.	63
Figura 4.39. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración A.	64
Figura 4.40. Función de Transferenciograma - Configuración A.	65
Figura 4.41. Función de Transferenciograma - Configuración B.	66
Figura 4.42. Diagrama de Estabilidad, $t_1=55$ [s] - Configuración B2.	66
Figura 4.43. Diagrama de Estabilidad, $t_2=80$ [s] - Configuración B2.	67
Figura 4.44. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración B2.	67
Figura 4.45. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración B2.	68
Figura 4.46. Función de Transferenciograma - Configuración B2.	69
Figura 4.47. Función de Transferenciograma - Configuración C.	70
Figura 4.48. Función de Transferenciograma - Configuración D.	70
Figura 4.49. Función de Transferenciograma - Configuración E.	71
Figura 4.50. Función de Transferenciograma - Configuración E2.	71
Figura 4.51. Función de Transferenciograma - Configuración F.	72
Figura 4.52. Función de Transferenciograma - Configuración F2.	72
Figura 4.53. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración A.	75
Figura 4.54. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración A.	76
Figura 4.55. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración A.	77
Figura 4.56. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración A.	78
Figura 4.57. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración B.	79
Figura 4.58. Corte Máximo por Piso - Configuración B.	80
Figura 4.59. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración B.	81
Figura 4.60. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración B.	82
Figura 4.61. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración B2.	83
Figura 4.62. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración B2.	84
Figura 4.63. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración B2.	85
Figura 4.64. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración B2.	86
Figura 4.65. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración C.	87
Figura 4.66. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración C.	88

Figura 4.67. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración C.	89
Figura 4.68. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración C.	90
Figura 4.69. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración D.	91
Figura 4.70. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración D.	92
Figura 4.71. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración D.	93
Figura 4.72. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración D.	94
Figura 4.73. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración E.	95
Figura 4.74. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración E.	96
Figura 4.75. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración E.	97
Figura 4.76. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración E.	98
Figura 4.77. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración E2.	99
Figura 4.78. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración E2.	100
Figura 4.79. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración E2.	101
Figura 4.80. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración E2.	102
Figura 4.81. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración F.	103
Figura 4.82. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración F.	104
Figura 4.83. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración F.	105
Figura 4.84. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración F.	106
Figura 4.85. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración F2.	107
Figura 4.86. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración F2.	108
Figura 4.87. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración F2.	109
Figura 4.88. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración F2.	110
Figura 4.89. Gráfico Comparativo: Máximo Corte Acumulado por Piso.	111
Figura 4.90. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo I.	113
Figura 4.91. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo II.	114
Figura 4.92. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo I y Tipo II.	115
Figura 4.93. Gráfico Comparativo: Máximo Desplazamiento Relativo de entre Piso.	116
Figura 4.94. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo I.	117
Figura 4.95. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo II.	118
Figura 4.96. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo I y Tipo II.	119
Figura 5.1. Comparación Respuesta de Desplazamiento Modelo vs Newmark.	122
Figura 5.2. Comparación Respuesta de Aceleración Modelo vs Newmark.	122
Figura 5.3. Comparación Respuesta de Aceleración Modelo vs Newmark - β Variable: Lineal.	123
Figura 5.4. Comparación Respuesta de Aceleración Modelo vs Newmark - β Variable: No Lineal.	123
Figura 5.5. Figura Ilustrativa de las Variables Temporales en Uso.	125
Figura 5.6. Figura Ilustrativa de la Optimización de la Tasa de Amortiguamiento.	126
Figura 5.7. Comparación Respuesta Experimental vs Ajustada del Modelo – Configuración A.	127
Figura 5.8. Formas Modales obtenidas del modelo - Configuración A.	128
Figura 5.9. Función de Transferenciograma con Frecuencias Modales Identificadas - Configuración B2.	128
Figura 5.10. Comparación Respuesta Experimental vs Ajustada del Modelo – Configuración B2.	129
Figura 5.11. Evolución Tasas de Amortiguamiento: 3 modos identificados - Configuración B2.	129
Figura 5.12. Tiempo-Historia Corte por Piso - Configuración B2.	130
Figura 5.13. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración B2.	130

Figura 5.14. Formas Modales obtenidas del modelo - Configuración B2.	131
Figura 5.15. Función de Transferenciograma con Frecuencias Modales Identificadas - Configuración D.	131
Figura 5.16. Comparación Respuesta Experimental vs Ajustada del Modelo – Configuración D.	132
Figura 5.17. Evolución Tasas de Amortiguamiento: 3 modos identificados - Configuración D.	132
Figura 5.18. Tiempo-Historia Corte por Piso - Configuración D.	133
Figura 5.19. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración D.	133
Figura 5.20. Formas Modales obtenidas del modelo - Configuración D.	134
Figura 5.21. Función de Transferenciograma con Frecuencias Modales Identificadas - Configuración E2.	135
Figura 5.22. Comparación Respuesta Experimental vs Ajustada del Modelo – Configuración E2.	136
Figura 5.23. Evolución Tasas de Amortiguamiento: 3 modos identificados - Configuración E2.	136
Figura 5.24. Tiempo-Historia Corte por Piso - Configuración E2.	137
Figura 5.25. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración E2.	137
Figura 5.26. Formas Modales obtenidas del modelo - Configuración E2.	138
Figura 8.1. Formas Modales, Ibrahim - Configuración A.	147
Figura 8.2. Formas Modales, Ibrahim - Configuración B.	148
Figura 8.3. Formas Modales, Ibrahim - Configuración B2.	148
Figura 8.4. Formas Modales, Ibrahim - Configuración C.	149
Figura 8.5. Formas Modales, Ibrahim - Configuración D.	149
Figura 8.6. Formas Modales, Ibrahim - Configuración E.	150
Figura 8.7. Formas Modales, Ibrahim - Configuración E2.	150
Figura 8.8. Formas Modales, Ibrahim - Configuración F.	151
Figura 8.9. Formas Modales, Ibrahim - Configuración F2.	151
Figura 8.10. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración A.	153
Figura 8.11. Espectro de Potencia - Configuración A.	153
Figura 8.12. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración B.	154
Figura 8.13. Espectro de Potencia - Configuración B.	154
Figura 8.14. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración B2.	155
Figura 8.15. Espectro de Potencia - Configuración B2.	155
Figura 8.16. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración C.	156
Figura 8.17. Espectro de Potencia - Configuración C.	156
Figura B.8.18. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración D.	157
Figura B.8.19. Espectro de Potencia - Configuración D.	157
Figura B.8.20. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración E.	158
Figura B.8.21. Espectro de Potencia - Configuración E.	158
Figura B.8.22. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración E2.	159
Figura B.8.23. Espectro de Potencia - Configuración E2.	159
Figura B.8.24. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración F.	160
Figura B.8.25. Espectro de Potencia - Configuración F.	160
Figura 8.26. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración A.	162
Figura 8.27. Diagrama de Estabilidad - Configuración A.	163
Figura 8.28. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración A.	163
Figura 8.29. Espectro de Potencia - Configuración A.	164
Figura 8.30. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración A.	164

Figura 8.31. Función de Transferencia (1) - Configuración A.	165
Figura 8.32. Función de Transferencia (2) - Configuración A.	165
Figura 8.33. Función de Transferencia (3) - Configuración A.	166
Figura 8.34. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración B.	166
Figura 8.35. Diagrama de Estabilidad - Configuración B.	167
Figura 8.36. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración B.	167
Figura 8.37. Espectro de Potencia - Configuración B.	168
Figura 8.38. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración B.	168
Figura 8.39. Función de Transferencia (1) - Configuración B.	169
Figura 8.40. Función de Transferencia (2) - Configuración B.	169
Figura 8.41. Función de Transferencia (3) - Configuración B.	170
Figura 8.42. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración B2.	170
Figura 8.43. Diagrama de Estabilidad - Configuración B2.	171
Figura 8.44. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración B2.	171
Figura 8.45. Espectro de Potencia - Configuración B2.	172
Figura 8.46. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración B2.	172
Figura 8.47. Función de Transferencia (1) - Configuración B2.	173
Figura 8.48. Función de Transferencia (2) - Configuración B2.	173
Figura 8.49. Función de Transferencia (3) - Configuración B2.	174
Figura 8.50. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración C.	174
Figura 8.51. Diagrama de Estabilidad - Configuración C.	175
Figura 8.52. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración C.	175
Figura 8.53. Espectro de Potencia - Configuración C.	176
Figura 8.54. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración C.	176
Figura 8.55. Función de Transferencia (1) - Configuración C.	177
Figura 8.56. Función de Transferencia (2) - Configuración C.	177
Figura 8.57. Función de Transferencia (3) - Configuración C.	178
Figura 8.58. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración D.	178
Figura 8.59. Diagrama de Estabilidad - Configuración D.	179
Figura 8.60. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración D.	179
Figura 8.61. Espectro de Potencia - Configuración D.	180
Figura 8.62. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración D.	180
Figura 8.63. Función de Transferencia (1) - Configuración D.	181
Figura 8.64. Función de Transferencia (2) - Configuración D.	181
Figura 8.65. Función de Transferencia (3) - Configuración D.	182
Figura 8.66. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración E.	182
Figura 8.67. Diagrama de Estabilidad - Configuración E.	183
Figura 8.68. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración E.	183
Figura 8.69. Espectro de Potencia - Configuración E.	184
Figura 8.70. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración E.	184
Figura 8.71. Función de Transferencia (1) - Configuración E.	185
Figura 8.72. Función de Transferencia (2) - Configuración E.	185
Figura 8.73. Función de Transferencia (3) - Configuración E.	186

Figura 8.74. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración E2.	186
Figura 8.75. Diagrama de Estabilidad - Configuración E2.	187
Figura 8.76. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración E2.	187
Figura 8.77. Espectro de Potencia - Configuración E2.	188
Figura 8.78. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración E2.	188
Figura 8.79. Función de Transferencia (1) - Configuración E2.	189
Figura 8.80. Función de Transferencia (2) - Configuración E2.	189
Figura 8.81. Función de Transferencia (3) - Configuración E2.	190
Figura 8.82. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración F.	190
Figura 8.83. Diagrama de Estabilidad - Configuración F.	191
Figura 8.84. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración F.	191
Figura 8.85. Espectro de Potencia - Configuración F.	192
Figura 8.86. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración F.	192
Figura 8.87. Función de Transferencia (1) - Configuración F.	193
Figura 8.88. Función de Transferencia (2) - Configuración F.	193
Figura 8.89. Función de Transferencia (3) - Configuración F.	194
Figura 8.90. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración F2.	194
Figura 8.91. Diagrama de Estabilidad - Configuración F2.	195
Figura 8.92. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración F2.	195
Figura 8.93. Espectro de Potencia - Configuración F2.	196
Figura 8.94. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración F2.	196
Figura 8.95. Función de Transferencia (1) - Configuración F2.	197
Figura 8.96. Función de Transferencia (2) - Configuración F2.	197
Figura 8.97. Función de Transferencia (3) - Configuración F2.	198
Figura 8.98. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración A.	199
Figura 8.99. Diagrama de Estabilidad, $t_1=45$ [s] - Configuración A.	199
Figura 8.100. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración A.	200
Figura 8.101. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración A.	200
Figura 8.102. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración A.	201
Figura 8.103. Función de Transferenciograma - Configuración A.	202
Figura 8.104. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración B.	202
Figura 8.105. Diagrama de Estabilidad, $t_1=65$ [s] - Configuración B.	203
Figura 8.106. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración B.	203
Figura 8.107. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración B.	204
Figura 8.108. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración B.	205
Figura 8.109. Función de Transferenciograma - Configuración B.	206
Figura 8.110. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración B2.	206
Figura 8.111. Diagrama de Estabilidad, $t_1=55$ [s] - Configuración B2.	207
Figura 8.112. Diagrama de Estabilidad, $t_2=80$ [s] - Configuración B2.	207
Figura 8.113. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración B2.	208
Figura 8.114. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración B2.	209
Figura 8.115. Función de Transferenciograma - Configuración B2.	210
Figura 8.116. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración C.	210

Figura 8.117. Diagrama de Estabilidad, $t_1=65$ [s] - Configuración C.	211
Figura 8.118. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración C.	211
Figura 8.119. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración C.	212
Figura 8.120. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración C.	213
Figura 8.121. Función de Transferenciograma - Configuración C.	214
Figura 8.122. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración D.	214
Figura 8.123. Diagrama de Estabilidad, $t_1=45$ [s] - Configuración D.	215
Figura 8.124. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración D.	215
Figura 8.125. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración D.	216
Figura 8.126. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración D.	217
Figura 8.127. Función de Transferenciograma - Configuración D.	218
Figura 8.128. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración E.	218
Figura 8.129. Diagrama de Estabilidad, $t_1=50$ [s] - Configuración E.	219
Figura 8.130. Diagrama de Estabilidad, $t_2=70$ [s] - Configuración E.	219
Figura 8.131. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración E.	220
Figura 8.132. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración E.	221
Figura 8.133. Función de Transferenciograma - Configuración E.	222
Figura 8.134. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración E2.	222
Figura 8.135. Diagrama de Estabilidad, $t_1=55$ [s] - Configuración E2.	223
Figura 8.136. Diagrama de Estabilidad, $t_2=80$ [s] - Configuración E2.	223
Figura 8.137. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración E2.	224
Figura 8.138. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración E2.	225
Figura 8.139. Función de Transferenciograma - Configuración E2.	226
Figura 8.140. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración F.	226
Figura 8.141. Diagrama de Estabilidad, $t_1=60$ [s] - Configuración F.	227
Figura 8.142. Diagrama de Estabilidad, $t_2=70$ [s] - Configuración F.	227
Figura 8.143. Diagrama de Estabilidad, $t_3=190$ [s] - Configuración F.	228
Figura 8.144. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración F.	229
Figura 8.145. Función de Transferenciograma - Configuración F.	230
Figura 8.146. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración F2.	230
Figura 8.147. Diagrama de Estabilidad, $t_1=55$ [s] - Configuración F2.	231
Figura 8.148. Diagrama de Estabilidad, $t_2=95$ [s] - Configuración F2.	231
Figura 8.149. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración F2.	232
Figura 8.150. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración F2.	233
Figura 8.151. Función de Transferenciograma - Configuración F2.	234

Capítulo 1 Introducción

1.1. Motivación

Los dispositivos de disipación de energía sísmica son ampliamente utilizados en estructuras que están sometidas a la acción telúrica. El objetivo de estos elementos es el de disipar energía de tal forma de reducir la respuesta sísmica mediante el incremento de la tasa de amortiguamiento de las estructuras. En general, estos dispositivos se utilizan para reducir el daño estructural o mejorar su desempeño sísmico, reduciendo el daño en elementos no estructurales, reduciendo así costos de reparaciones y permitiendo la operabilidad de las estructuras en pequeños lapsos de tiempo después de ocurrido un gran evento sísmico.



Figura 1.1. Ejemplo de Disipadores de Energía. Izq.: Amortiguador metálico instalado en apoyo de puente. Der.: Amortiguador viscoso instalado en apoyo de puente. Fuente: Protección Sísmica de Estructuras, 2012.

En este contexto, es posible encontrar un gran catálogo de dispositivos de disipación de energía sísmica. El primer tipo de estos dispositivos se activa por histéresis o deformaciones friccionales, los cuales se utilizan actualmente como fusibles sísmicos. En este grupo se encuentran los disipadores metálicos como los disipadores tipo ADAS (Added Damping-Added Stiffness/ Amortiguamiento Añadido-Rigidez Añadida) que funcionan al permitir la deformación plástica de las placas de acero para disipar energía, pudiendo ser fabricados con materiales comunes de ingeniería (Whittaker, 1991) o materiales con SMA (Shape Memory Alloys/ Aleaciones con Memoria de Forma), que pueden presentar una respuesta histéretica sin deformaciones residuales significativas (Moroni, 2008). Los disipadores friccionales de energía sísmica pueden reducir la respuesta sísmica mediante la fricción que ocurre debido al desplazamiento relativo producido entre dos o más superficies que están en contacto, y son diseñados para activarse cuando se alcanza un determinado nivel de

carga, debido a lo cual se encuentran inactivos mientras no alcance dicha carga. Un ejemplo de este tipo de disipadores corresponde a una Conexión Deslizante con Orificios Ovalados (SBC-Slotted Bolted Connection) (Grigorian, 1993), otro ejemplo de este grupo de disipadores es la Diagonal de Pandeo Restringido (BRB-Buckling Restrained Brace), que utilizan la extrusión plástica de un núcleo de acero en fluencia y evitan pandeos utilizando mecanismos externos cuando trabajan a compresión (Sabelli, 2003). El segundo grupo de disipadores de energía sísmica es activado por las velocidades relativas que ocurren entre los extremos del dispositivo, añadiendo comúnmente rigidez y amortiguamiento a la estructura. En este grupo se encuentran los disipadores viscoelásticos sólidos que quedan descritos por la deformación de corte de las capas viscoelásticas (Constantinous & Symans, 1992) y los dispositivos fluido-viscosos que contienen fluidos altamente viscosos que fluyen a través de orificios dentro del dispositivo cuando éste se deforma (Fu & Kasai, 1998). La última tipología corresponde a disipadores activados por movimientos dinámicos. Un ejemplo clásico es un Disipador de Masa Sintonizada (TMD-Tuned Mass Damper), los cuales son comúnmente instalados en el piso superior de edificios (Sadek, 1997). El sistema de disipación más común del tipo TMD, corresponde a un sistema de un grado de libertad (1 GDL/ SDOF-Single Degree of Freedom) que tiene propiedades dinámicas sincronizadas (de acuerdo a las propiedades de la estructura) de tal forma de generar una fuerza restitutiva que sea capaz de reducir la respuesta sísmica de la estructura.

En general, el primer y segundo grupo de dispositivos de disipación de energía sísmica se construyen empleando disipadores pasivos de energía, que son comúnmente instalados en toda la estructura para tomar ventaja de los desplazamientos relativos de entre piso o las velocidades que experimenta la estructura durante un terremoto, de hecho, suelen ser instalados en las fachadas lejos del centro de gravedad de los pisos para también mitigar la respuesta torsional. En la Figura 1.2 se presenta el ejemplo de la Torre Titanium, Chile, la cual tiene dispositivos metálicos de disipación sísmica que trabajan utilizando la histéresis de deformación flexural correspondiente a tres pisos y ubicadas en todo el edificio de tal forma de reducir la respuesta transversal y sísmica del edificio.

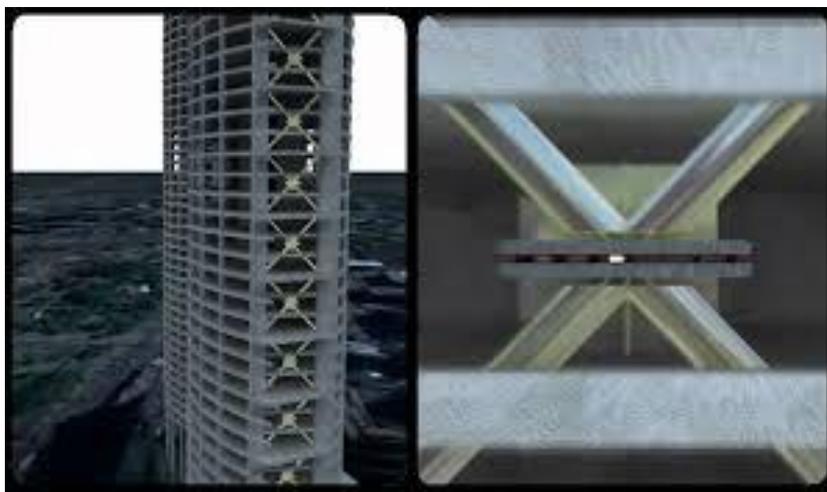


Figura 1.2. Ejemplo de la instalación de dispositivos de disipación de energía.

Por otro lado, los edificios altos y de alta rigidez, como los edificios que poseen un sistema estructural construido con muros de hormigón armado presentan desplazamientos relativos de entre piso muy bajos ante la acción sísmica. Es más, de acuerdo con Lagos (2012) las edificaciones que siguen la práctica chilena (construidas con muros de hormigón armado) tienen desplazamientos relativos de entre piso por debajo del 0,5%, debido a lo cual ciertos dispositivos de disipación de energía se construyen conectando dos, tres o más pisos de una edificación. En consecuencia, bajos desplazamientos relativos de entre piso implican que ciertos dispositivos de disipación de energía ven su efectividad limitada cuando son instalados para capturar la deformación de pocos pisos, lo cual se acentúa particularmente para estructuras altas. De hecho, dado que se suele instalar un sistema de disipación en cada nivel de la estructura la efectividad de estos dispositivos se ve aún más mermada. En este contexto existen diversos estudios que buscan determinar la disposición óptima de un número limitado de amortiguadores visco-elásticos en una estructura de forma que éstos trabajen de forma más efectiva (Takewaki, 1997; Xu, 2004). Además, cabe recordar que estos dispositivos de disipación de energía están conectados a la estructura mediante elementos generalmente robustos y, por tanto, muchas veces contrariado con motivos arquitectónicos.

Es debido a los hechos anteriores que se propone utilizar un sistema compuesto por un dispositivo de disipación de energía (en este caso, un amortiguador fluido viscoso) conectado a la estructura a través de un sistema de cables y poleas (Figura 1.3).

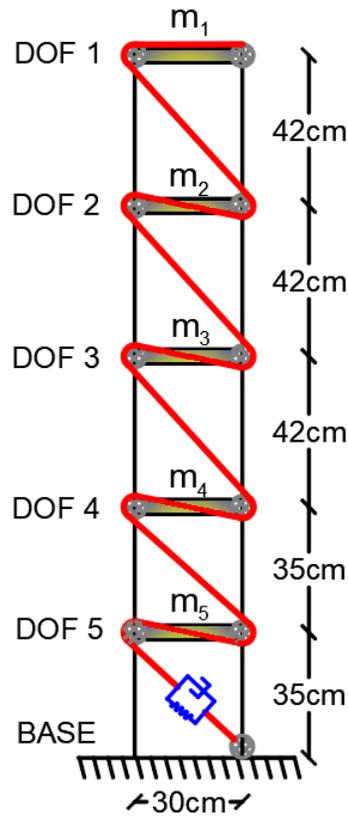


Figura 1.3. Esquema del Sistema Propuesto.

El objetivo de este sistema de disipación es el de concentrar el desplazamiento relativo de entre piso de todos los niveles conectados en un solo disipador, siendo éste el encargado de disipar significativamente la energía sísmica de toda la estructura. Los beneficios esperados de este sistema de disipación son: (i) reducir la cantidad de disipadores de energía que se utilizan en una edificación, reduciendo costos permitiendo realizar un diseño más eficiente, (ii) al utilizar cables, que son elementos no robustos y que además pueden ser escondidos detrás de la fachada, se consigue un sistema de protección sísmica no invasivo desde un punto de vista arquitectónico, y (iii) aportar amortiguamiento significativo a la estructura sin aumentar significativamente su rigidez, y (iv) añadir disipación de energía a través de la fricción que ocurre entre el cable y las poleas, además del comportamiento viscoso de los mecanismos de poleas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

Desarrollar y evaluar experimentalmente la eficacia de un sistema compuesto por cables y poleas conectados a un amortiguador visco-elástico en serie, en cuanto a su capacidad para disipar energía sísmica de una estructura.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Preparar una estructura del tipo edificio (a escala) de 5 GDL (Grados de Libertad).
- Encontrar un sistema de disipación que pueda ser usado a baja escala (con un amortiguador pequeño).
- Emplear el método de DSI para la respuesta completa y por pequeñas ventanas de tiempo para identificar la evolución temporal de las propiedades dinámicas de la estructura.
- Estudiar la estructura a escala según las siguientes configuraciones: i) sin disipadores, ii) con disipadores en tres niveles, iii) con disipadores en todos los niveles, iv) con un sistema de cables y poleas, v) con un sistema de cables, sin disipadores, equivalente al utilizado en (iv). Cada configuración ha de ser ensayada bajo registros sísmicos (como el de Concepción del 27/02/2010, también conocido como Concepción 27F, escalado al 50%) y a ensayos del tipo pull-back.
- Comparar los resultados de la evolución de las propiedades dinámicas en el tiempo y de la energía disipada entre los distintos sistemas analizados.

1.3. Metodología

1.3.1. Revisión Bibliográfica

Realizar una revisión en la bibliografía en busca de antecedentes sobre la implementación de técnicas de identificación de estructuras, tales como Ibrahim para ensayos de pull-back y DSI (MIMO) para caracterización de propiedades dinámicas por pequeñas ventanas de tiempo, de tal forma de permitir la evolución de los parámetros modales en función de su movimiento modal (input) y su respuesta medida en varios niveles (output).

1.3.2. Preparación de la Estructura y Ensayos

Construcción de una estructura a escala de varios GDL, en caso de no tener disponible una estructura idónea para los ensayos. Investigación sobre qué tipo de cables y poleas utilizar y cómo se han de instalar en la estructura.

Una vez que la estructura esté preparada se procede a la realización de los ensayos, sobre la mesa vibradora del LEE y a través de ensayos del tipo pull-back (desplazamiento inicial). Los ensayos por realizar son en base a registros sísmicos chilenos como el de Concepción del 27/02/2010, también conocido como Concepción 27F, a una escala del 50% y del tipo pull-back. Para registrar las aceleraciones en cada nivel de la estructura se utilizarán acelerómetros tipo Kistler, que serán instalados en cada nivel de la estructura.

Las configuraciones estructurales por estudiar son:

- Sin amortiguamiento.
- Con disipadores en 3 niveles.
- Con disipadores en todos los niveles.
- Con sistema de cables y poleas.
- Con sistema de cables equivalente, sin disipadores.

1.3.3. Análisis de Resultados

Se analizan los resultados obtenidos en términos de la capacidad de disipar energía por parte de los dispositivos y la eficiencia para reducir la respuesta estructural de la estructura. Se realizan comparaciones entre todas las configuraciones estudiadas.

Capítulo 2 Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas

2.1. Método de Ibrahim

El método de Ibrahim en el dominio tiempo (ITD, Ibrahim Time Domain), es un método aplicable a ensayos del tipo condiciones iniciales o de impacto controlado, pull-back, en los cuales se busca medir la respuesta de varios grados de libertad (GDL) de la respuesta libre del sistema.

En términos matemáticos la ecuación de equilibrio dinámico en espacio-estado continuo queda descrita por:

$$\{\dot{z}(t)\} = [A_c] \cdot \{z(t)\} + \{F(t)\} \quad (2.1)$$

Donde:

$$\{z(t)\} = \begin{Bmatrix} \{v(t)\} \\ \{\dot{v}(t)\} \end{Bmatrix}$$
$$[A_c] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1} \cdot [K] & -[M]^{-1} \cdot [C] \end{bmatrix} \quad (2.2)$$
$$\{F(t)\} = \begin{Bmatrix} [0] \\ [M]^{-1} \cdot [P(t)] \end{Bmatrix}$$

$\{v(t)\}, \{\dot{v}(t)\}$: Vector de desplazamientos de los GDL, y su derivada temporal.

$[A]$: Matriz de masa.

$[K]$: Matriz de rigidez.

$[C]$: Matriz de amortiguamiento.

$[P(t)]$: Vector de cargas en los GDL.

Notar que la Eq. (2.1) corresponde a una ecuación diferencial de primer orden del doble de tamaño que la ecuación diferencial de segundo orden que corresponde a la ecuación de movimiento clásica. Las soluciones de dicha ecuación es posible separarlas en el caso heterogéneo y el homogéneo, donde el homogéneo se obtiene cuando el vector de cargas es

nulo. A partir de ambas soluciones, se encuentra que del problema de valores y vectores propios generalizado del caso homogéneo se pueden obtener las formas modales complejas (con amortiguamiento) $(\{\psi\}_r)$ y los polos (λ_r) de un sistema de múltiples GDL. El problema generalizado tiene la siguiente forma:

$$(\lambda_r^2 \cdot [M] + \lambda_r \cdot [C] + [K]) \cdot \{\phi\}_r = \{0\} \quad (2.3)$$

El problema generalizado posee $2 \cdot n$ formas modales y polos, cada una de las cuales posee su conjugado correspondiente; los vectores modales también son conocidos como vectores modales de desplazamiento.

Detalles respecto a la descripción del método y su implementación se encuentran en Lorca (2004). Así mismo, detalles respecto a la deducción de este método son descritos en el ANEXO C de Hernández (2009).

2.2. Método DSI (Deterministic-Stochastic Subspace Identification)

Deterministic-Stochastic Subspace Identification (DSI) es un método espacio-estado, en ventanas de tiempo, desarrollado por Van Overschee & De Moor (1996). Este método permite determinar las propiedades dinámicas de una estructura a través de datos de entrada y salida asumiendo un comportamiento lineal invariable en el tiempo. En otras palabras, este método no considera la degradación de la rigidez de la estructura, por lo que asume que en las ventanas de tiempo en estudio las propiedades dinámicas permanecen constantes. Nótese que como propiedades dinámicas se entienden frecuencias, amortiguamientos y formas modales, en tanto que la entrada y salida hacen referencia a la sollicitación o input y respuesta u output, respectivamente.

En términos matemáticos, el método queda determinado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A_d \cdot x_k + B_d \cdot u_k + w_k \\ y_k &= C_d \cdot x_k + D_d \cdot u_k + v_k \end{aligned} \quad (2.4)$$

Con w_k y v_k secuencias de vectores blancos con matriz de covarianza:

$$E \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (2.5)$$

Donde:

u_k : Vector de inputs para el instante discreto k. $u_k \in R^m$
 y_k : Vector de outputs para el instante discreto k. $y_k \in R^l$
 x_k : Vector de estado para el instante discreto k. $x_k \in R^n$
 w_k : Vector de ruido que excita al sistema para el instante discreto k. $w_k \in R^n$
 v_k : Vector de ruido presente en las mediciones para el instante discreto k. $v_k \in R^l$
 A_d : Matriz de estado. $A_d \in R^{n \times n}$
 B_d : Matriz de entrada -input-. $B_d \in R^{n \times m}$
 C_d : Matriz de salida -output-. $C_d \in R^{l \times n}$
 D_d : Matriz de transmisión directa. $D_d \in R^{l \times m}$
 Q, R, S : Matrices de covarianza asociadas a w_k y v_k . $Q \in R^{n \times n}$, $R \in R^{l \times l}$, $S \in R^{n \times l}$

Dado este sistema de ecuaciones, se ha de resolver:

- Encontrar el orden $\{n\}$ del sistema.
- Encontrar las matrices $\{A_d, B_d, C_d, D_d, Q, R, S\}$ del sistema del sistema de ecuaciones.

En la Figura 2.1 se puede apreciar gráficamente cómo trabaja el modelo espacio-tiempo en tiempo discreto, cuando se considera un sistema lineal invariante en el tiempo. Cabe destacar que, tanto las señales de entrada como de salida son conocidas a diferencia del estado, el cual no es conocido, pero se determina como resultado del algoritmo del modelo espacio-tiempo.

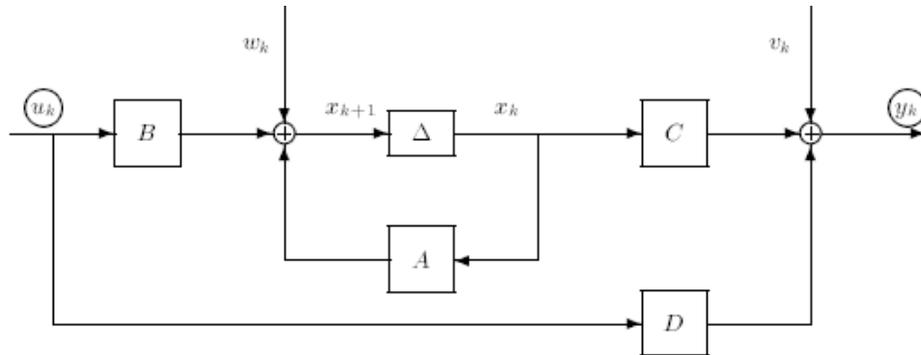


Figura 2.1. Representación gráfica del modelo espacio-estado en tiempo discreto, considerando un sistema lineal constante en el tiempo. Fuente: Van Overschee & De Moor, 1996.

Detalles respecto a la deducción matemática del método DSI pueden ser encontrados en Hernández (2009), Van Overschee & De Moor (1996) y Gutierrez Lihn (2016).

Capítulo 3 Descripción de la Estructura y sus Elementos Componentes

3.1. Descripción de la Estructura

La estructura por ensayar corresponde a una estructura de acero desmontable, cuyos elementos constituyentes son de acero ASTM A36. La configuración montada posee cinco niveles con altura de entrepiso variable debido a disponibilidad de éstos. Los primeros dos niveles tienen altura de entrepiso de 35 [cm], mientras que los tres niveles superiores tienen altura de entrepiso de 42 [cm]. La razón de usar pisos con menores alturas se debe a que los niveles inferiores son los que reciben mayor demanda sísmica, por lo que para proveer mayor seguridad a la estructura es que se emplearon estos pisos de menor altura para estos niveles.



Figura 3.1. Vista niveles tipo de la estructura. Fuente: Versluys (2017).

En cuanto a las losas de la estructura, éstas tienen dimensiones de 30cm x 30cm y de 5mm de espesor, cuya configuración en planta se presenta en la Figura 3.2, donde los orificios

de los extremos tienen como fin la conexión de columnas, en tanto que los centrales dan la opción de instalar masas adicionales en las losas.

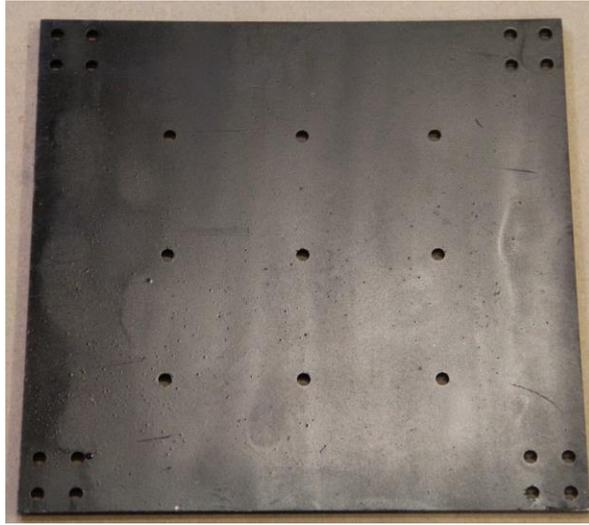


Figura 3.2. Losa tipo de 30cm x 30cm. Fuente: Versluys (2017).

Por otro lado, las conexiones de la estructura son acero ASTM A36 y tienen una forma semi cilíndrica, de espesor 3mm, con una base cuadrada cuyas dimensiones son 4cm x 4cm y 3mm de espesor para las conexiones columna-losa y 8cm x 8cm y 3mm de espesor para las conexiones columna-placa base. Tanto la parte semi cilíndrica como la base cuadrada de las conexiones tienen perforaciones que permiten el paso de tornillos de distintos diámetros por éstas, pudiendo las perforaciones de las bases cuadradas ser para diámetros de 1/4" y 1/2" dependiendo de si son para conectarse a una losa o a la placa base, respectivamente, en tanto las perforaciones de la parte semi cilíndrica están pensadas para tornillos de 1/8" de diámetro. La materialización de las conexiones con la estructura es realizada mediante pernos de acero de alta resistencia de distintos diámetros, dependiendo de la conexión a la que corresponden. Todas las configuraciones de pernos de unión forman cuadriláteros, lo cual asegura condiciones de empotramiento casi perfectas.



Figura 3.3. (a) Conexión universal 4cm x 4 cm. (b) Conexión Universal 8cm x 8cm. Fuente: Versluys (2017).



Figura 3.4. Vista a conexiones columna-losa y columna-placa de conexión. Fuente: Versluys (2017).

Finalmente, en la Figura 3.5 se puede apreciar la placa base de la estructura, la cual es un elemento de acero de 70cm x 70cm y de 5mm de espesor, con 32 perforaciones que permiten optar por estructuras que trabajen con losas de 30cm x 30cm o de 50cm x 50cm.

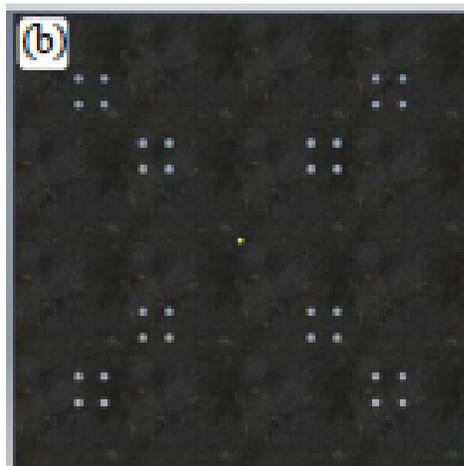


Figura 3.5. Placa base de la estructura. Fuente: Versluys (2017).

La tabla siguiente presenta el peso por nivel de la estructura, el cual considera el peso correspondiente a las losas, columnas, conexiones y tornillos utilizados para éstas, además está considerado el peso que aporta el sistema de poleas que se encuentra presente en todas las configuraciones estructurales en estudio (3.3. Sistema de Poleas). Para determinar el peso de la estructura se utilizó una máquina de pesaje, con error correspondiente a 5gr, y

se procedió de manera de pesar las columnas y losas de la estructura individualmente y los sistemas de conexión y de poleas como conjuntos para evitar incurrir en errores.

Tabla 3.1. Peso por Nivel de la Estructura Tipo.	
Nivel	Peso [kgf]
5°	4,69
4°	5,24
3°	5,24
2°	5,13
1°	5,02
Base	18,56
Total, sin Base	25,34
Total, con Base	43,90

Mayores detalles respecto a la estructura base pueden ser encontrados en Versluys (2017).

3.2. Estimación del Cable a Utilizar

La estimación del cable a utilizar se realiza mediante un análisis de rigidez para un caso 2D del sistema estructura-cable igualándolo al desplazamiento de entre piso permitido, de esta forma se supone conservadoramente que el cable se utilizaría para arriostrar la estructura. De tal forma se plantearon las siguientes ecuaciones, donde la primera de éstas toma en consideración que el primer nivel es el más solicitado en términos de corte sísmico, por lo que se consideran 2 columnas empotradas y un cable (columnas de 35 [cm]), en tanto que la segunda considera que el tercer nivel es el más solicitado, por lo que considera 4 columnas empotradas, 2 columnas de 35 [cm] y 2 columnas de 42 [cm], además de un cable. Recordar que ambos tipos de columnas son perfiles laminares por lo que la forma de obtener su rigidez es conocida.

$$\begin{aligned}\frac{Q_k}{\delta} &= 2k_1 + k_c \cos \alpha \\ \frac{Q_k}{\delta} &= 2k_1 + 2k_2 + k_c \cos \alpha\end{aligned}\tag{3.1}$$

Donde:

Q_k : Corte sísmico a considerar.

δ : Desplazamiento de entre piso permitido, 0,002H.

H : Altura de entre piso.

L : Longitud del cable.

k_1 : Rigidez columnas de 35 [cm].

k_2 : Rigidez columnas de 42 [cm].

k_c : Rigidez del cable.

A_c : Área del cable.

α : Desangulación respecto a la horizontal cable-losa.

d : Diámetro del cable.

Nótese que:

$$k_i = \frac{12EI}{L^3}\tag{3.2}$$

$$k_c = \frac{EA_c}{L} \cos \alpha\tag{3.3}$$

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4}\tag{3.4}$$

Luego, evaluando numéricamente las ecuaciones de (3.1) se obtienen valores para el diámetro del cable para los casos con columnas de 35 [cm] y 42 [cm], respectivamente. Cabe recordar que las ecuaciones utilizadas hacen referencia a una estructura real, donde las alturas de entre piso hacen obtener resultados coherentes, por tanto, este valor debe entenderse como una mera estimación del cable. El valor más restrictivo obtenido, es decir el mayor diámetro, se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 3.2. Diámetro Calculado del Cable.

Diámetro Calculado del Cable	1,2 [mm]
------------------------------	----------

Sin embargo, debido a disponibilidad comercial del cable por utilizar, el cable escogido para trabajar es un cable trenzado de acero galvanizado ASTM A36 1x19 2 [mm]. Un cable de este tipo posee 19 torones, cada uno de los cuales está compuesto por un alambre, que se trenzan entre sí para formar el cable de acero 1x19. En la y en la, se presentan las partes componentes de un cable de acero y la sección transversal de un cable 1x19, respectivamente. En tanto, la Tabla 3.3. Propiedades Mecánicas del Cable ASTM A36 1x19 2 [mm].Tabla 3.3 resumen las propiedades mecánicas correspondientes a este cable.

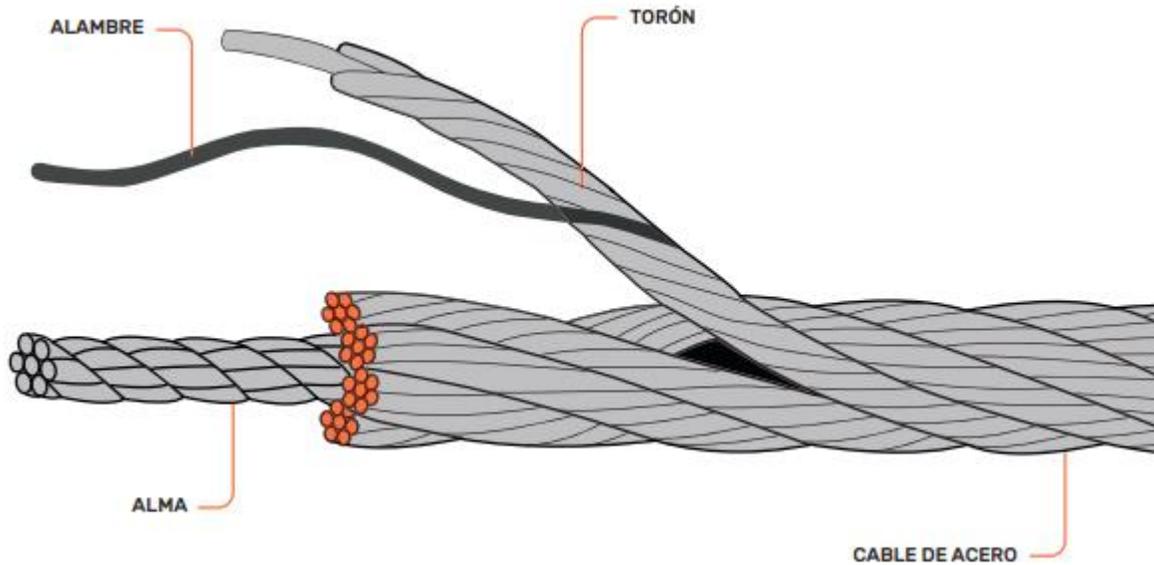


Figura 3.6. Partes de un cable de acero. Fuente: Catalogo de Cables de Acero.

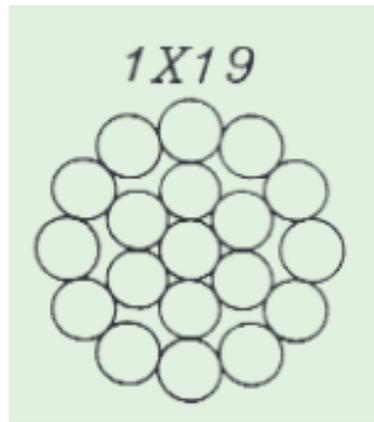


Figura 3.7. Vista transversal de un cable 1x19. Fuente: Catálogo de Cables de Acero.

Tabla 3.3. Propiedades Mecánicas del Cable ASTM A36 1x19 2 [mm].

Propiedad	-
Diámetro	2 [mm]
Módulo Elástico, E	13000 [kgf/m]
Peso	0,02 [kg/m]
Carga de Rotura	386 [kgf]

Finalmente, para la instalación del cable se realiza una pretensión inicial mediante la aplicación manual de peso en el extremo a atar del cable y procurando que los disipadores estén extendidos aproximadamente a la mitad de su gap. Para verificar que la pretensión inicial otorgada al cable sea igual para los cables de ambas caras de la estructura, se midió la frecuencia del sonido que éstos emiten al hacerlos vibrar con un afinador de guitarra en el tercer piso de la estructura y equilibrando la pretensión hasta obtener el mismo valor en ambos cables instalados (70 Hz).

3.3. Sistema de Poleas

Para la instalación del sistema de poleas se diseñaron y confeccionaron elementos “L” de acero de manera de poder unir las poleas a la estructura existente, como los presentados en la Figura 3.8. Estos elementos están tienen cuatro orificios de 8 [mm] de diámetro en su alma y un orificio de 9 [mm] de diámetro en su ala.



Figura 3.8. Elemento L para conexión de poleas a la estructura.

Los orificios de 8 [mm] tienen como fin proveer la conexión de los elementos “L” con la estructura, ubicándose entre las losas y la columna perteneciente al siguiente nivel. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 3.9.



Figura 3.9. Ubicación del elemento “L” dentro de la estructura.

En tanto, los orificios de 9 [mm] de diámetro tienen se utilizan para conectar el eje de la polea al elemento “L”.



Figura 3.10. Conexión del elemento “L” con el eje de la polea.

En cuanto a las poleas, éstas se encuentran en el comercio establecido y pueden ser apreciadas en la Figura 3.11. Las poleas se componen de su eje, dos bolillas, dos guías de giro (una por lado) y una tuerca para cerrar el sistema.

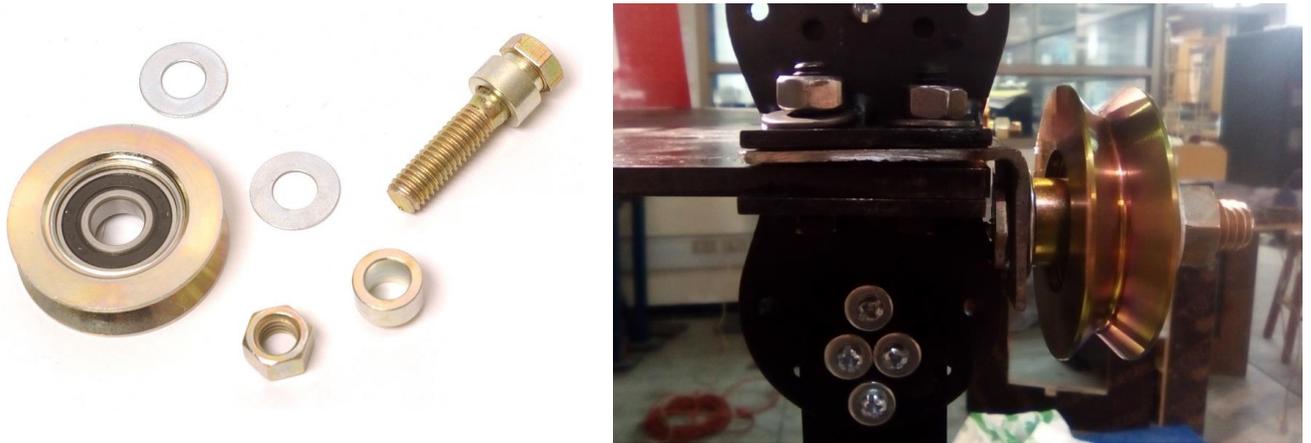


Figura 3.11. Vista de la polea en forma aislada (izquierda). Vista de la polea instalada en la estructura (derecha).

3.4. Disipadores de Energía

Para el desarrollo de los ensayos experimentales se utilizan 2 tipos de disipadores, los cuales serán identificados desde ahora como Disipador Tipo I y Disipador Tipo II. Ambos tipos de disipadores son construidos a partir de un amortiguador de absorción de choque, Figura 3.12, cuyas dimensiones son de 10 [cm] de alto cuando el amortiguador se encuentra abierto con su máximo gap, y 6 [cm] cuando se encuentra cerrado. Estos amortiguadores están hechos con aleaciones de metal de aluminio de alta gama y son utilizados como componentes de juguetes de control remoto del tipo D90 Axial SCX10 AXSPEED RC Rock Crawler.

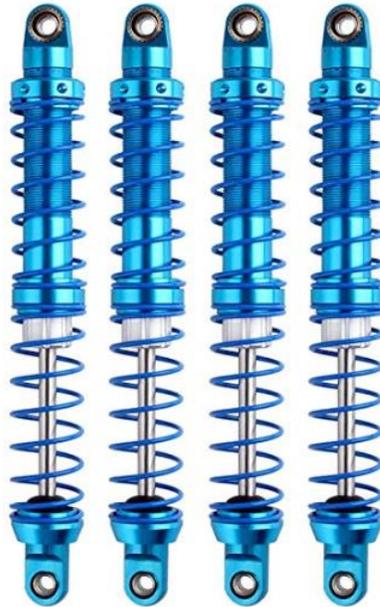


Figura 3.12. Amortiguadores de Absorción de Choque Utilizados. Fuente: Aliiexpress.

La confección de los amortiguadores del Tipo I y del Tipo II es realizada manteniendo el sistema central en lo referido al mecanismo fluido-viscoso y removiendo el resorte a compresión con el cual vienen los dispositivos originalmente (Figura 3.13). Luego, se les instalan dos placas de metal, de 3 [mm] de diámetro, en sus extremos, para lo cual se empleó acero líquido, y se conectan por contacto al dispositivo haciendo un orificio central que se ajuste con el dispositivo. Adicionalmente, las placas tienen un orificio con el propósito de permitir el paso de un nuevo resorte a tracción a través de él, permitiendo una conexión mecánica entre el resorte y el amortiguador fluido-viscoso. De esta forma se obtiene un amortiguador visco-elástico que trabaja a tracción con un resorte instalado mediante retracción mecánica, Figura 3.13, siendo la única diferencia entre los

amortiguadores del Tipo I y del Tipo II el resorte que utilizan. Las propiedades de cada resorte utilizado se resumen en la Tabla 3.4. Propiedades teóricas de los resortes para disipadores Tipo I y Tipo II..



Figura 3.13. Amortiguador Visco-Elastico con Placas de Metal y Resorte en Retracción Metálica.

Nótese que al momento de la instalación de los disipadores de energía se ha de procurar que, al tensar el cable, se permita que la mitad del gap del disipador se encuentre disponible para la realización de los ensayos, de forma de asegurar el correcto funcionamiento del disipador.

Tabla 3.4. Propiedades teóricas de los resortes para disipadores Tipo I y Tipo II.		
Resorte	Tipo I	Tipo II
Longitud, L_0		6,0 [cm]
Diámetro, D		2,5 [cm]
Diámetro Alambre, d	1,0 [mm]	1,5 [mm]
Paso, p		2 [cm]
Rigidez, K	0,13 [kgf/mm]	0,66 [kgf/mm]

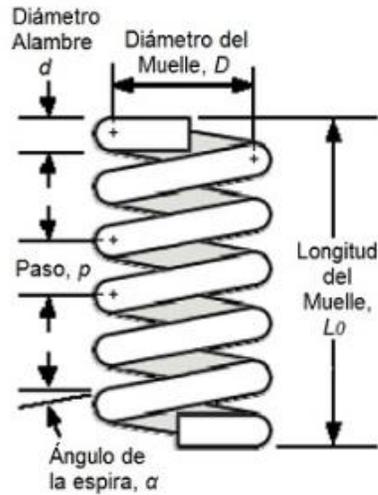


Figura 3.14. Características de un resorte.

La rigidez, K , se deduce utilizando la Eq. (3.5), donde G corresponde al módulo de corte del acero, igual a 85000 [Mpa], y N_a a la cantidad de alambres activos del resorte, cuyo valor para este caso particular es igual a 3,5.

$$K = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot N_a} \quad (3.5)$$

Para determinar la capacidad de disipación de energía de cada disipador se han preparado las configuraciones estructurales de 1 GDL que se presentan en las figuras siguientes.



Figura 3.15. Estructura sin Disipadores - Configuración 0A.



Figura 3.16. Estructura con Disipadores Tipo I - Configuración 0B.



Figura 3.17. Estructura con Disipadores Tipo II - Configuración 0C.

Los ensayos por aplicar a cada configuración se presentan en la siguiente matriz de ensayos.

Tabla 3.5. Matriz de Ensayos para Disipadores.

Etapa 1	
Descripción	Configuraciones Aplicadas
Realización de ensayo del tipo pull-back, mediante la aplicación de golpes centrados en el nivel superior de la estructura.	Configuración: 0A, 0B, 0C.
Etapa 2	
Descripción	Configuraciones Aplicadas
Realización de ensayo dinámico, mediante la aplicación de un barrido de aceleraciones en la base de la estructura, cubriendo el espectro que puede entregar la mesa utilizada para este ensayo.	Configuración: 0A, 0B, 0C.



Figura 3.18. Estructura 0A sobre mesa de ensayos.



Figura 3.19. Estructura 0B sobre mesa de ensayos.



Figura 3.20. Estructura 0C sobre mesa de ensayos.

Las figuras siguientes presentan el análisis del primer modo para cada configuración, donde al aplicar el método del decaimiento logarítmico y un ajuste lineal, es posible obtener el amortiguamiento de correspondiente a cada configuración.

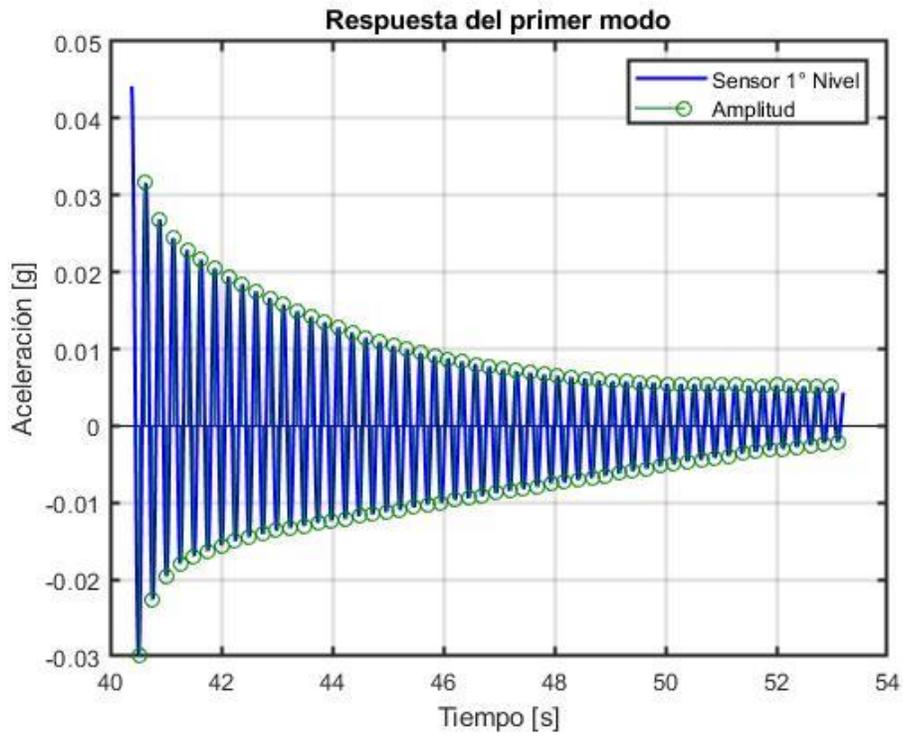


Figura 3.21. Resposta del 1º Modo - Configuración 0A. ¹

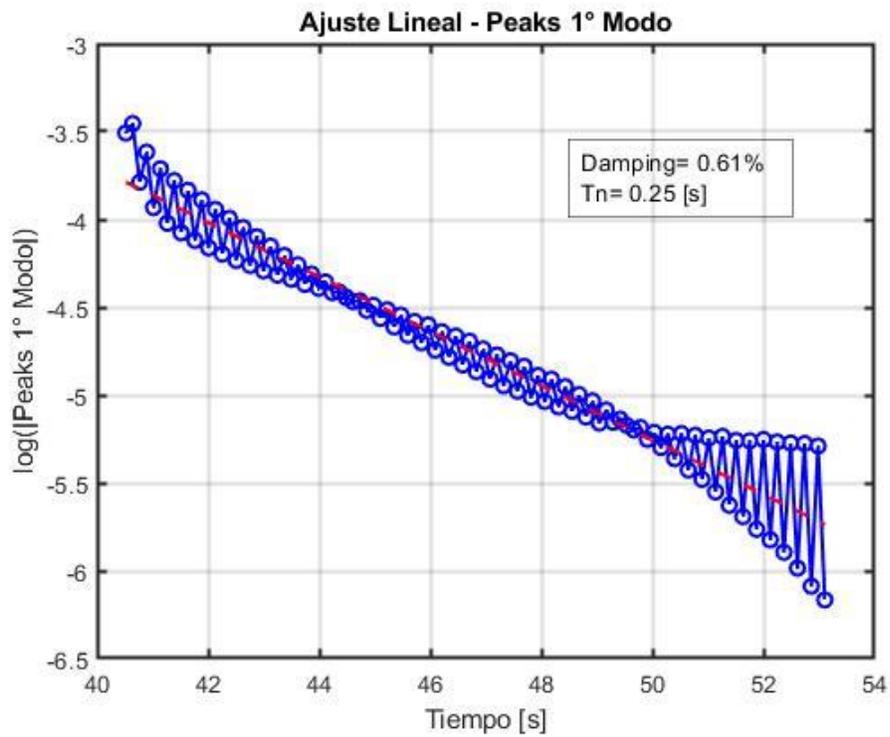


Figura 3.22. Ajuste Lineal - Configuración 0A.

¹ Estructura 1 GDL, sin disipadores.

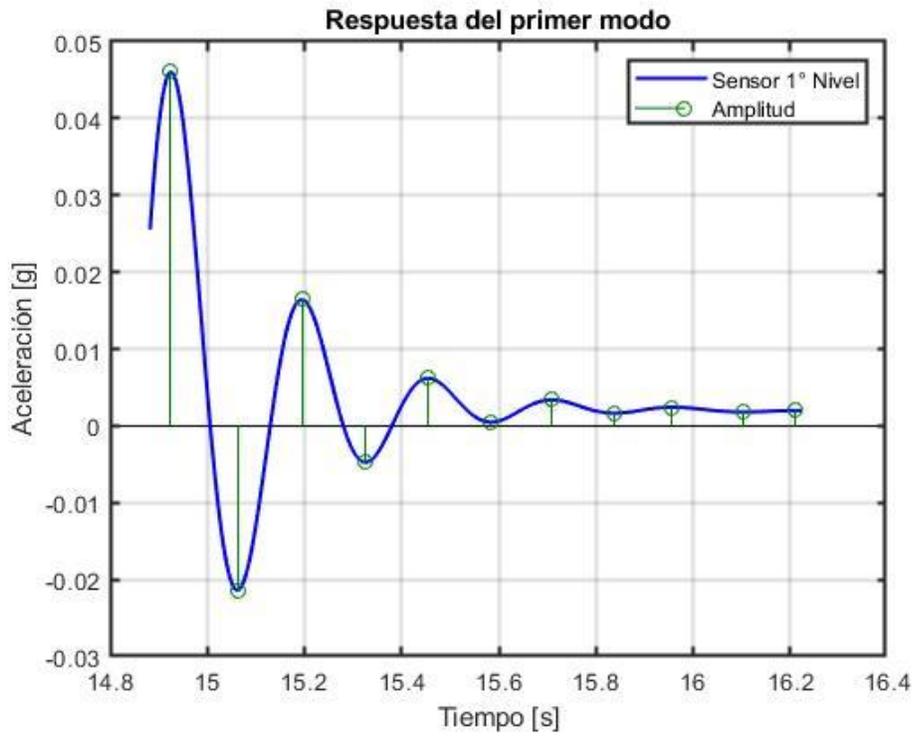


Figura 3.23. Resposta del 1º Modo - Configuración 0B. ²

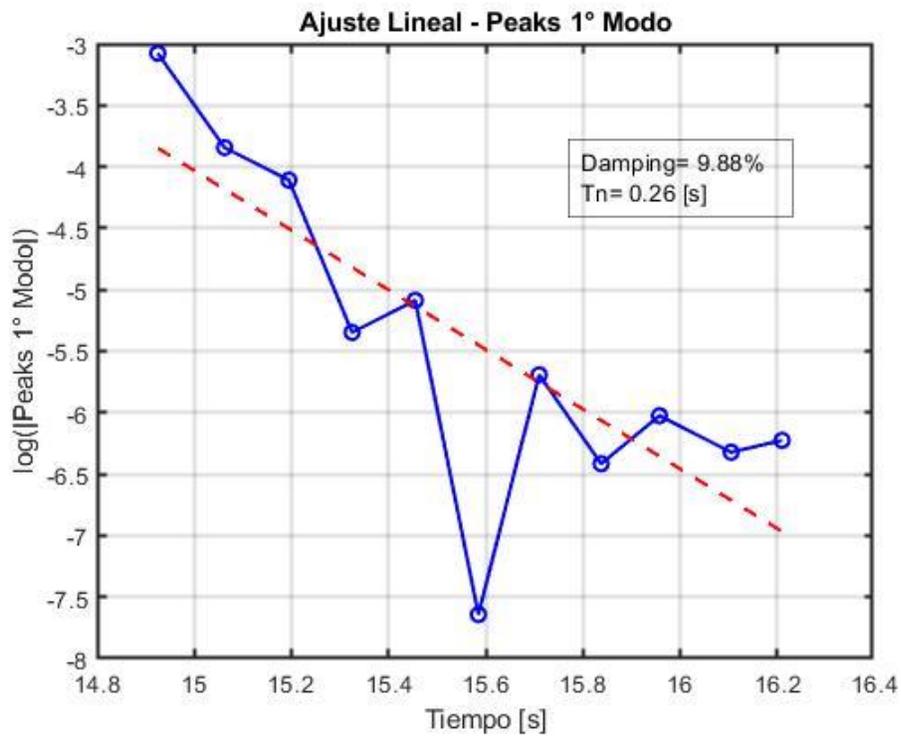


Figura 3.24. Ajuste Lineal - Configuración 0B.

² Estructura 1 GDL, con disipadores Tipo I.

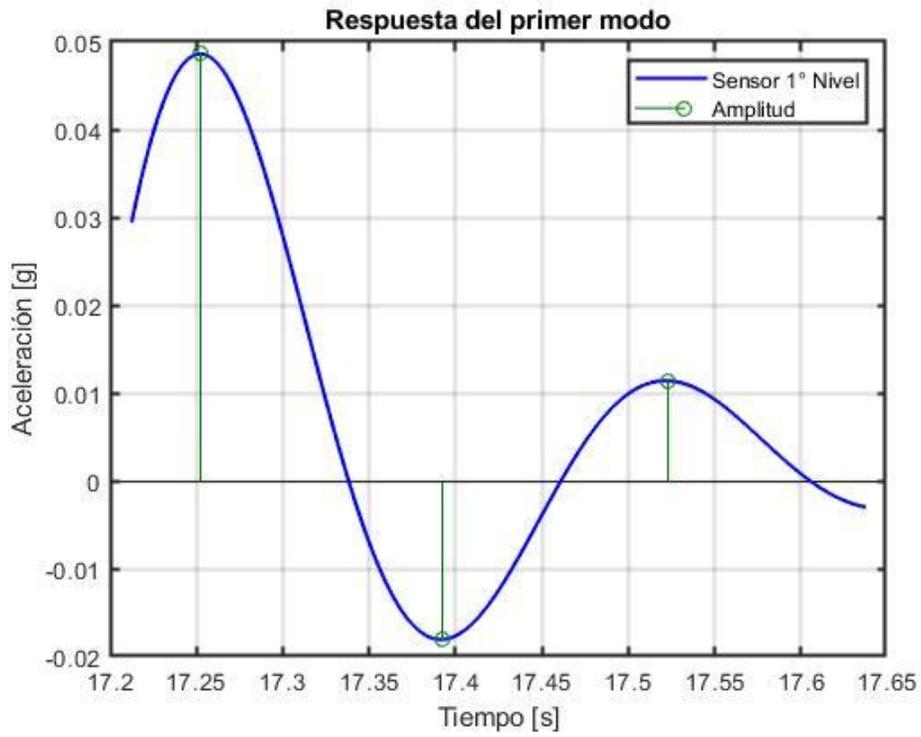


Figura 3.25. Resposta del 1° Modo - Configuración 0C.³

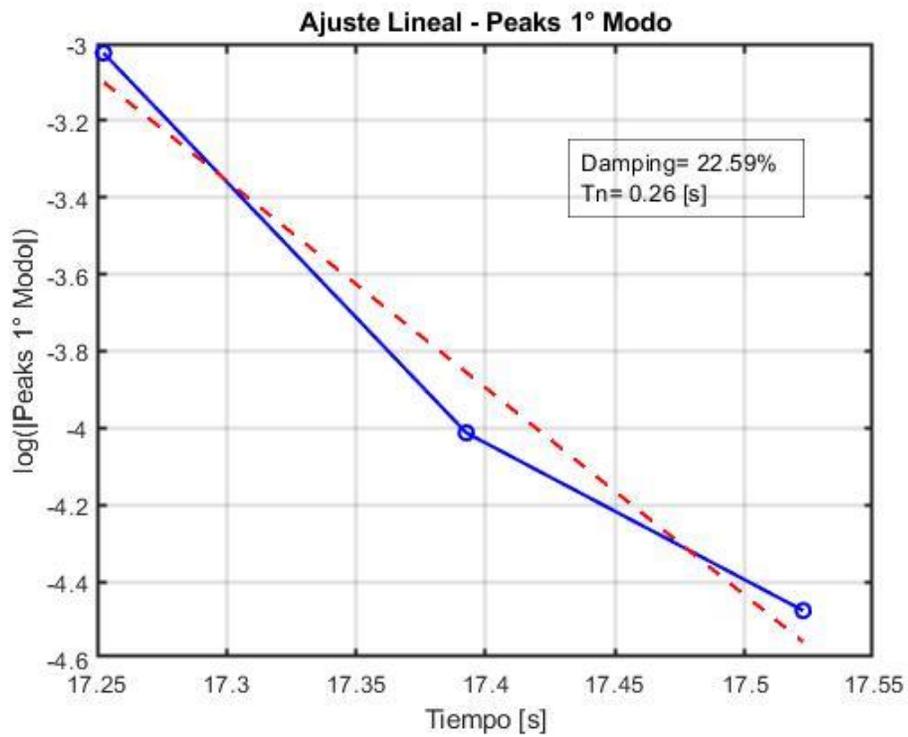


Figura 3.26. Ajuste Lineal - Configuración 0C.

³ Estructura 1 GDL, con disipadores Tipo II.

La tabla siguiente presenta la masa utilizada para la realización de los ensayos de las tres configuraciones anteriores. Nótese que la masa correspondiente a las configuraciones con sistema de disipación difieren de la masa de la configuración sin sistema de disipación, esto se debe a que las configuraciones con sistema de disipación instalado no presentaban desplazamientos visibles por lo cual se les agregó 5 [kg] adicionales para subsanar este hecho.

Tabla 3.6. Peso de Configuraciones Estructurales - Ensayos de Disipadores.

Configuración	Peso [kgf]
0A	4,69
0B – 0C	9,69

Finalmente, en la Tabla 3.7 se presentan los coeficientes de amortiguamiento de cada tipo de disipador, así como también el de la estructura sin disipación. Para obtener el coeficiente de amortiguamiento se restan las tasas de amortiguamiento de la configuración en estudio con la tasa de amortiguamiento de la configuración base, se divide el valor resultante en 2, se proyecta en la horizontal (con respecto al ángulo que se forma entre el amortiguador y la losa) y finalmente se aplica la relación entre la tasa de amortiguamiento y el coeficiente de amortiguamiento. En términos matemáticos:

$$c = \frac{2m\omega_n\beta \cdot \cos\theta}{2} \quad (3.6)$$

Tabla 3.7. Resumen Propiedades Dinámicas de los Disipadores

Disipador	Tipo I	Tipo II
Tasa de Amortiguamiento, β	9,88%	22,59%
Coficiente de Amortiguamiento, c	12,62 [kgf · s/m]	29,93 [kgf · s/m]
Referencia: Estructura sin disipadores; c		0,12 [kgf · s/m]

3.5. Descripción del Sistema de Adquisición de Datos

La realización de los ensayos es llevada a cabo en el Laboratorio Experimental de Estructuras (LEE) ubicado en el primer piso del Edificio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

En el LEE se encuentran la mesa vibradora sobre la cual se realizan los ensayos, ésta es una mesa unidireccional con dimensiones de 2,1 [m] x 1,3 [m], y ha sido diseñada para soportar una carga de 3000 [kgf], siendo capaz de reproducir una frecuencia máxima de 15 [Hz] lo cual permite simular registros sísmicos chilenos. En términos prácticos la mesa se mueve por un actuador hidráulico MOOG CA5276, capaz de reproducir sismos del tipo chileno con un PGA de hasta 1g, PGV de hasta 0,4 [m/s] y PGD de 0,195 [m].



Figura 3.27. Mesa Vibradora del LEE.

La estructura fue instrumentada en todos sus niveles con acelerómetros Kistler K-beam 8304B2, los cuales son instalados en cada nivel de la estructura desde la base hasta el cuarto nivel, en tanto se instalaron dos acelerómetros en el quinto nivel de la estructura con el fin de verificar que la respuesta torsional no fuese significativa, vale decir, que la estructura trabaje como un edificio de marco 2D y su dirección flexible y la de trabajo de la mesa vibradora coincidan. En la Figura 3.28 se puede apreciar cómo se ven los acelerómetros una vez instalados en la estructura, en tanto que las constantes de cada uno de ellos, de arriba abajo y de izquierda a derecha de acuerdo con la figura, se presentan en la Tabla 3.8. El sistema de adquisición de datos corresponde a un DAQ National

Instrument PCI-6229 (16-Bit, 250 kS/S) que es controlado por el software DAQ View, adquiriendo los datos en todas las mediciones a una tasa de muestreo de 400 [Hz].



Figura 3.28. Ubicación de los acelerómetros en estructura tipo.

Tabla 3.8. Constantes de Sensibilidad los Acelerómetros.

Nombre del Acelerómetro	Constante [V/g]
Sensor 1	1,028
Sensor 2	1,029
Sensor 3	0,986
Sensor 4	0,990
Sensor 5	1,019
Sensor 6	1,000
Sensor 7	1,031

Capítulo 4 Resultados y Comentarios

4.1. Matriz de Ensayos

En la Tabla 4.1 se presentan las definiciones de las distintas configuraciones estructurales a estudiar, seguida de figuras que ilustran la apariencia tipo de las configuraciones descritas en la tabla.

Tabla 4.1. Configuraciones Estructurales por Estudiar.

Configuración Estructural	Descripción
A	Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.
B	Estructura con cable, en ambas caras, instalado en serie con 1 disipador (Tipo I).
B2	Estructura con cable, en ambas caras, instalado en serie con 1 disipador (Tipo II).
C	Estructura con cables, en ambas caras, instalado con tensión que reproduzca la rigidez de la estructura cuando ésta tiene instalada la configuración B.
D	Estructura análoga a la configuración C, salvo que los cables se encuentran más tensos de tal forma que se obtiene una estructura más rígida, similar a la rigidez de la estructura B2.
E	Estructura con 5 disipadores (Tipo I) instalados, en paralelo, por cada cara.
E2	Estructura con 5 disipadores (Tipo II) instalados, en paralelo, por cada cara.
F	Estructura con 3 disipadores instalados, en paralelo, por cada cara; disipadores (Tipo I) instalados en niveles 1, 3 y 5.
F2	Estructura con 3 disipadores instalados, en paralelo, por cada cara; disipadores (Tipo II) instalados en niveles 1, 3 y 5.



Figura 4.1. Estructura Configuración A.



Figura 4.2. Estructura Tipo para Configuraciones C y D.



Figura 4.3. Estructura Tipo para Configuraciones B y B2.

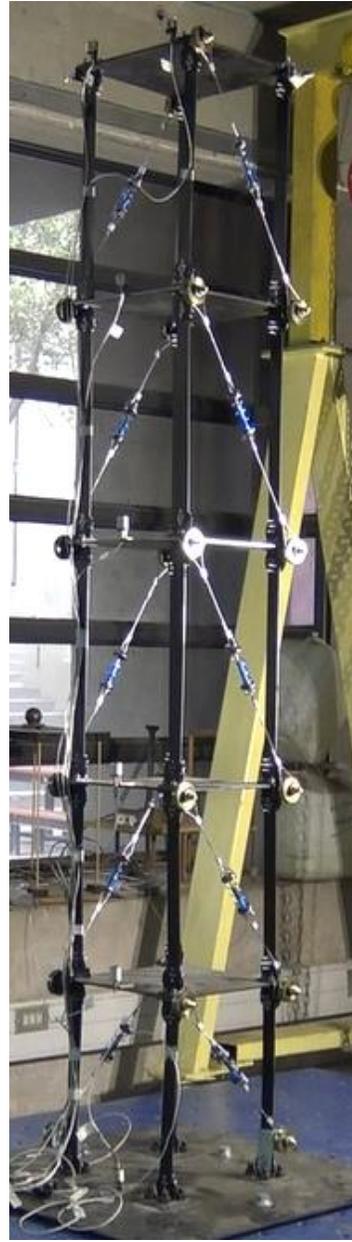


Figura 4.4. Estructura Tipo para Configuraciones E y E2.



Figura 4.5. Estructura Tipo para Configuraciones F y F2.

Las tablas siguientes resumen los procedimientos a seguir para la realización de los distintos ensayos. La Tabla 4.2 resume el procedimiento a seguir para la realización de los ensayos tipo pull-back, mientras que la Tabla 4.3 resume el procedimiento para la realización de los ensayos del tipo dinámico.

Tabla 4.2. Procedimiento de Ensayos tipo Pull-Back.

Etapa 1	
Descripción	Configuraciones Aplicadas
Aplicar golpes centrados por cada nivel de la estructura, desde el nivel superior al inferior. (5 golpes en total).	Configuración: A, B, C, D, E, F.
Etapa 2	
Descripción	Configuraciones Aplicadas
Aplicar golpes excéntricos por cada nivel de la estructura, desde el nivel superior al inferior. (5 golpes en total).	Configuración: A, B, C, D, E, F.
Etapa 3	
Descripción	Configuraciones Aplicadas
Excitar 2 niveles distintos de la estructura al mismo tiempo; niveles por excitar: 2 con 4, 3 con 5, 2 con 5.	Configuración: A, B, C, D, E, F.

Tabla 4.3. Procedimientos de Ensayos tipo Dinámico.

Descripción	Configuraciones Aplicadas
Aplicar registro sísmico: Concepción Centro 27F 50%.	Configuración: A, B, B2, C, D, E, E2, F, F2.

4.2. Ensayos Pull-Back

4.2.1. Mediante Método de Ibrahim

En las figuras siguientes se presentan los resultados obtenidos para las configuraciones A y B2, mediante el análisis con el método de Ibrahim. Estos resultados son representados mediante las formas modales identificadas y sus respectivas tasas de amortiguamiento. La totalidad de estos resultados se presentan en detalle en el capítulo 8.1. Anexo A: Resultados mediante Ibrahim.

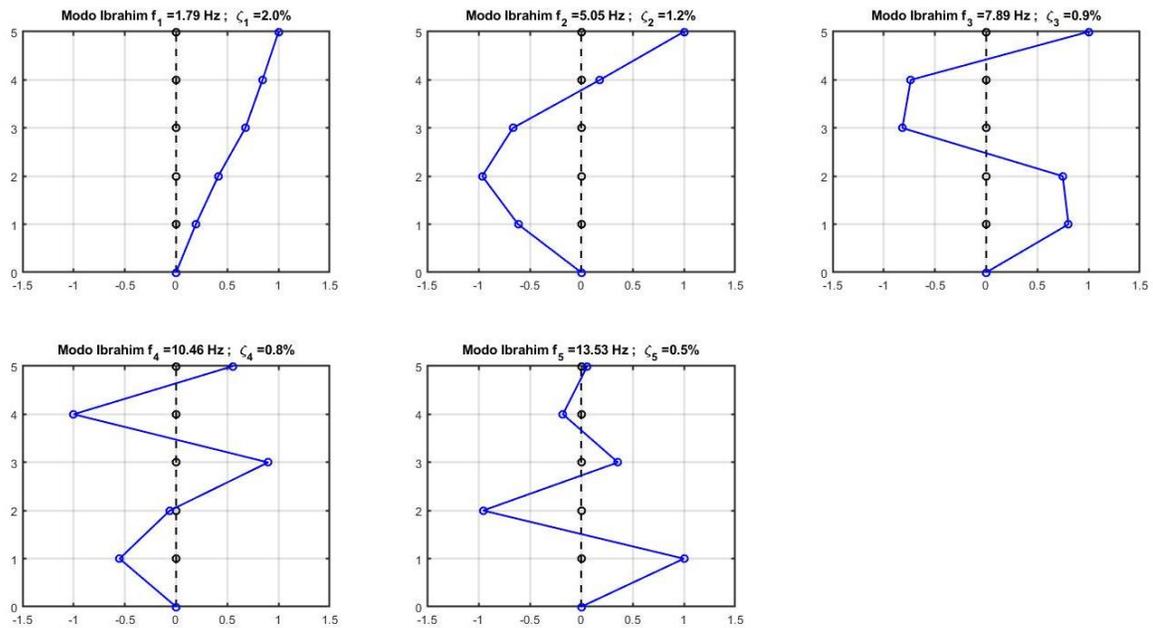


Figura 4.6. Formas Modales, Ibrahim - Configuración A. ⁴

⁴ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

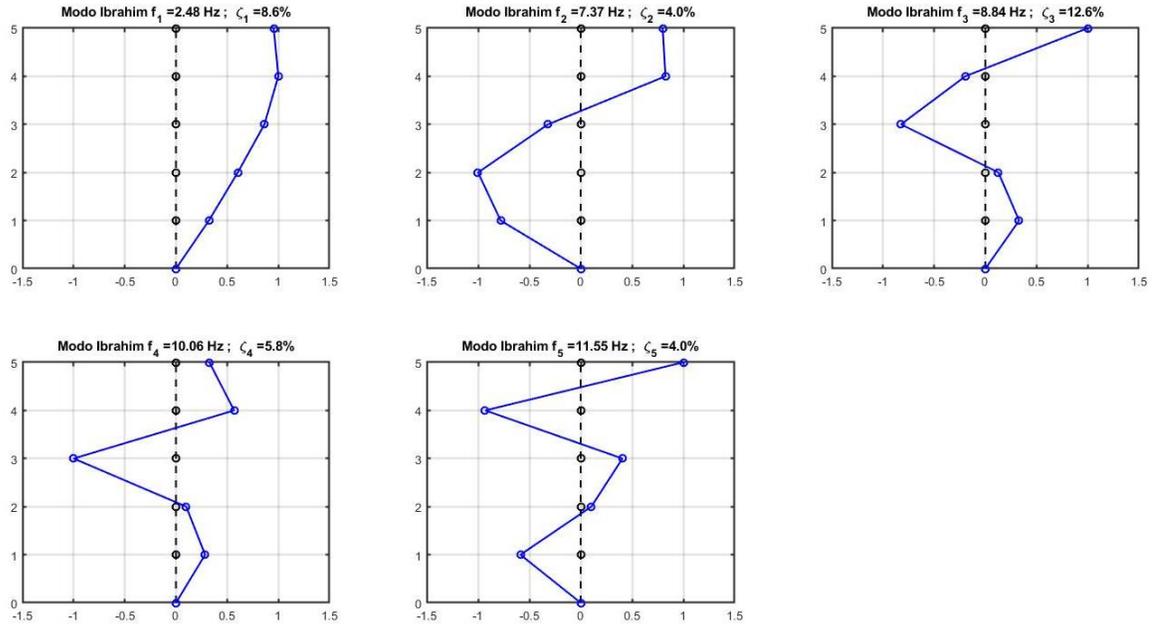


Figura 4.7. Formas Modales, Ibrahim - Configuración B2. ⁵

Se ha de destacar que entre las formas modales presentadas en el capítulo 8.1. Anexo A existen algunas de éstas que no son verídicas (i.e., son un artilugio del modelo espacio-estado), como son los primeros modos presentados para las configuraciones C y F2, donde éstos indican tasas de amortiguamiento que son irreales y, por tanto, el primer modo real de dichas configuraciones corresponde a los segundos modos presentados en sus respectivas figuras.

La Tabla 4.4 presenta un resumen de los modos y tasas de amortiguamiento, excluyendo aquellos no verídicos, correspondientes a cada configuración estudiada. Nótese que, de acuerdo a estos resultados, las configuraciones con el sistema de cables y poleas con un amortiguador en serie instalado, configuraciones B y B2, mejoran la tasa de amortiguamiento de la estructura base, obteniendo la configuración B2 resultados comparables con los obtenidos para la configuración con disipadores en tres niveles, configuración F2.

⁵ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

Tabla 4.4. Resumen de Modos y Tasas de Amortiguamiento – Ibrahim.

	Propiedad	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
Configuración A ⁶	f [Hz]	1,79	5,05	7,89	10,46	13,53
	β	2,0%	1,2%	0,9%	0,8%	0,5%
Configuración B ⁷	f [Hz]	2,00	5,53	8,46	10,89	
	β	3,2%	2,7%	2,2%	1,8%	
Configuración B2 ⁸	f [Hz]	2,48	7,37	8,84	11,55	
	β	8,6%	4,0%	12,6%	4,0%	
Configuración C ⁹	f [Hz]	2,00	5,58	8,51	10,96	
	β	2,4%	2,2%	2,0%	1,6%	
Configuración D ¹⁰	f [Hz]	2,94	7,06	9,28	11,42	
	β	3,5%	8,0%	4,5%	3,3%	
Configuración E ¹¹	f [Hz]	1,99	5,54	9,11		
	β	8,4%	10,6%	8,8%		
Configuración E2 ¹²	f [Hz]	1,90	5,12	10,82		
	β	14,7%	28,7%	13,4%		
Configuración F ¹³	f [Hz]	1,79	5,16	8,83	10,76	
	β	5,7%	5,7%	5,7%	6,7%	
Configuración F2 ¹⁴	f [Hz]	1,91	5,35	9,01		
	β	4,7%	6,1%	8,6%		

⁶ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

⁷ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

⁸ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

⁹ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

¹⁰ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

¹¹ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

¹² Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

¹³ Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

¹⁴ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

4.2.2. Mediante Decaimiento Logarítmico

Las siguientes figuras presentan la respuesta filtrada del primer modo de la estructura. Para ello se utiliza un filtro del tipo Butterworth de octavo orden (con una frecuencia seleccionada para extraer sólo la respuesta del primer modo) para todos los grados de libertad de la estructura. Posteriormente, se toma la respuesta del piso superior para aplicar un clásico método de decremento logarítmico, típico para sistemas de un grado de libertad, con el objetivo de determinar las frecuencias naturales y tasas de amortiguamiento del modo fundamental.

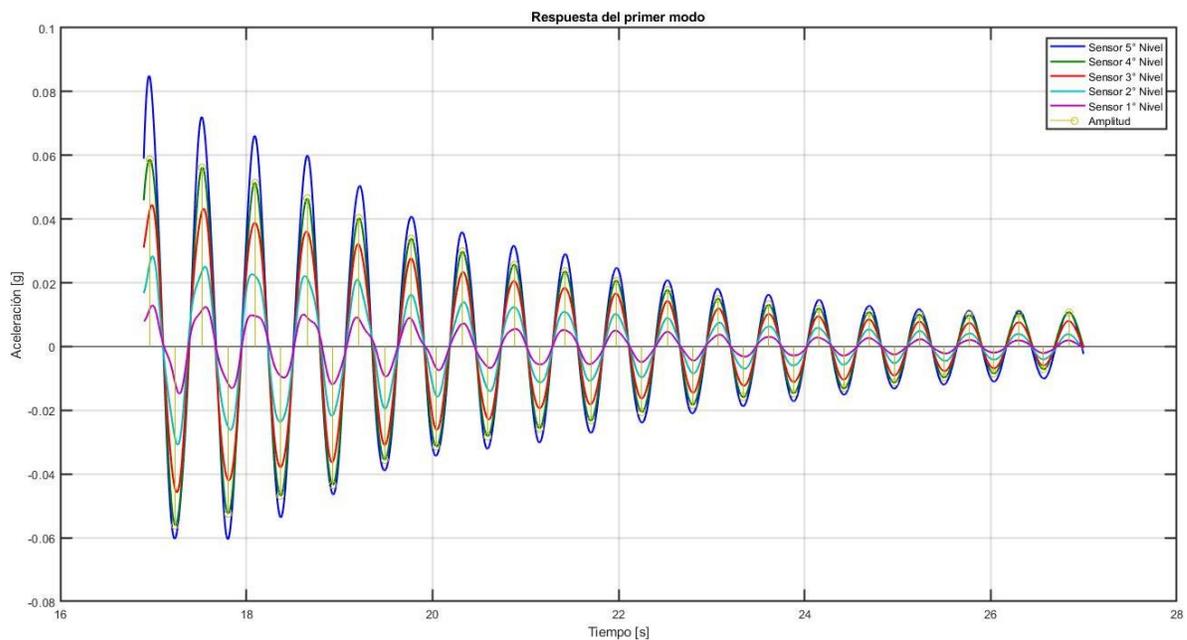


Figura 4.8. Respuesta del 1º Modo - Configuración A.¹⁵

La figura anterior, así como las siguientes, presentan la respuesta del primer modo de la estructura percibido por cada uno de los sensores instalados en ella. A partir de estos datos es posible confeccionar la Figura 4.9, en la cual se presentan los valores peak del primer modo en escala logarítmica (referenciados al cuarto piso). Luego, con estos datos es posible obtener el valor de la tasa de amortiguamiento mediante una regresión lineal de dichos

¹⁵ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

datos, considerando que el promedio de tiempo entre peaks (máximos o mínimos locales) es igual al periodo amortiguado y teniendo en cuenta que $\log v_{max} = A - b \cdot w_n \cdot t$.

El proceso anteriormente descrito es aplicado para cada una de las configuraciones estructurales en estudio. Los resultados obtenidos mediante este método se presentan en la Tabla 4.5.

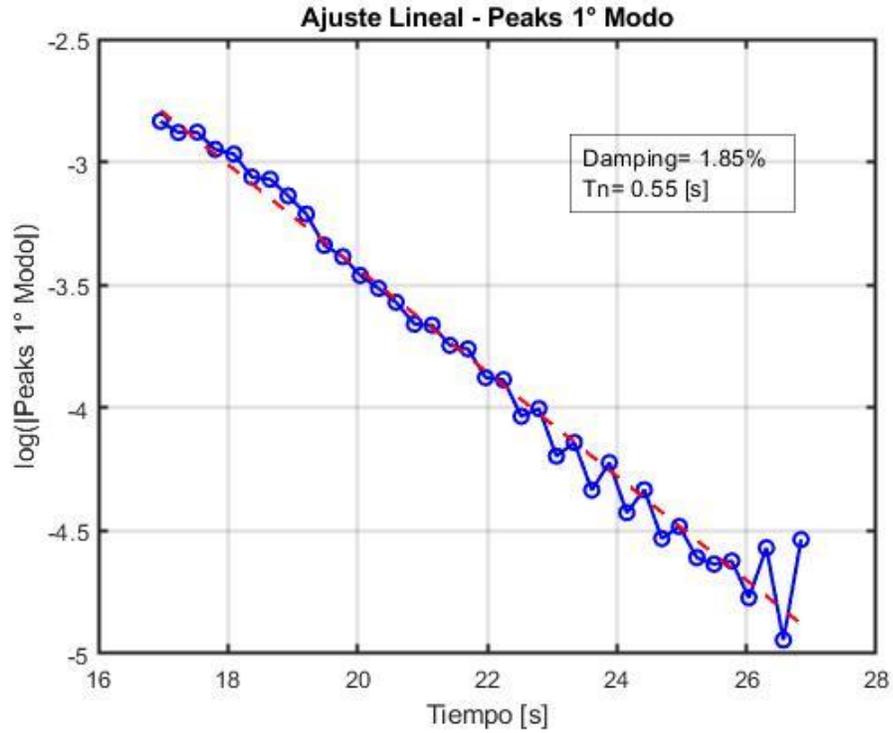


Figura 4.9. Ajuste Lineal - Configuración A.

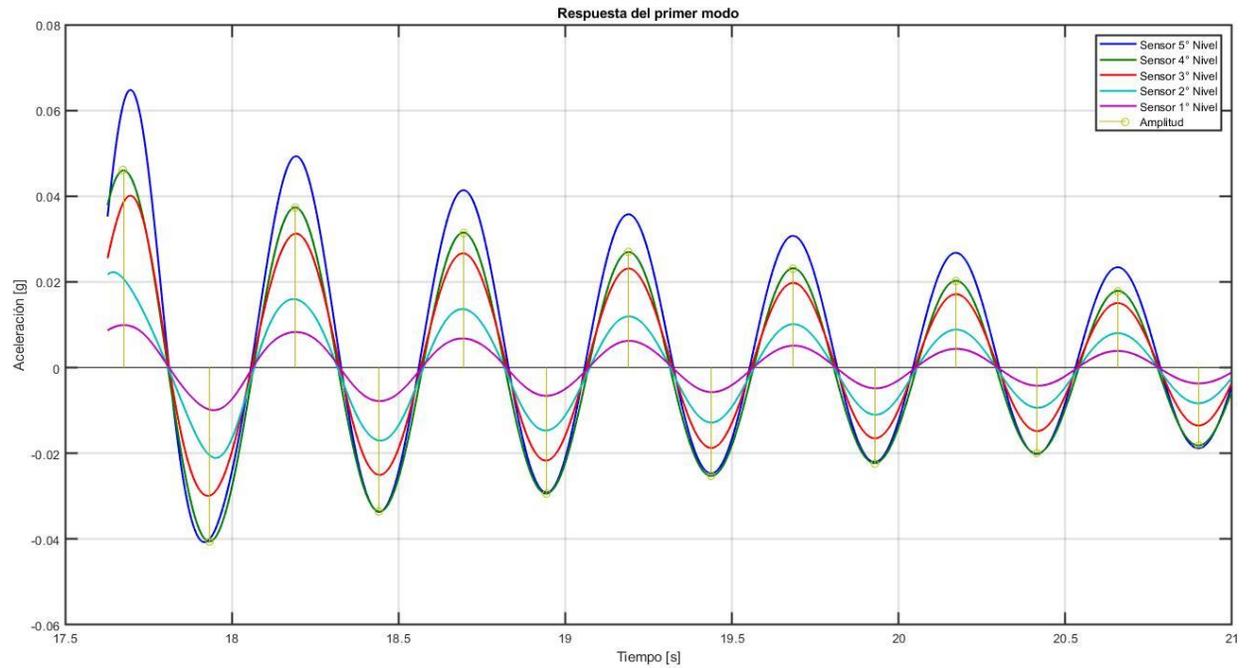


Figura 4.10. Resposta del 1° Modo - Configuración B. ¹⁶

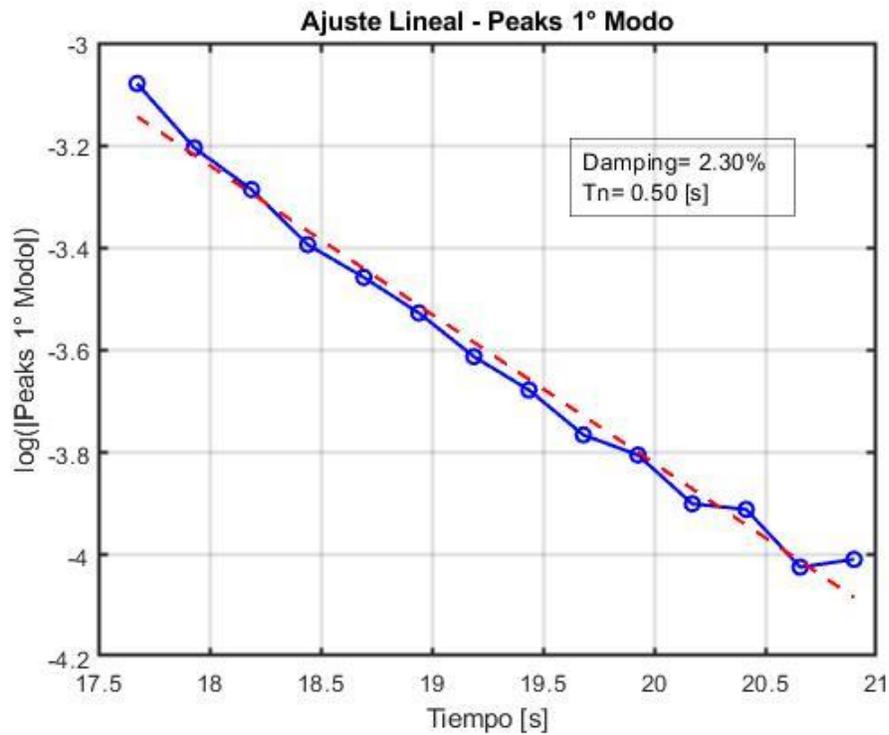


Figura 4.11. Ajuste Lineal - Configuración B.

¹⁶ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

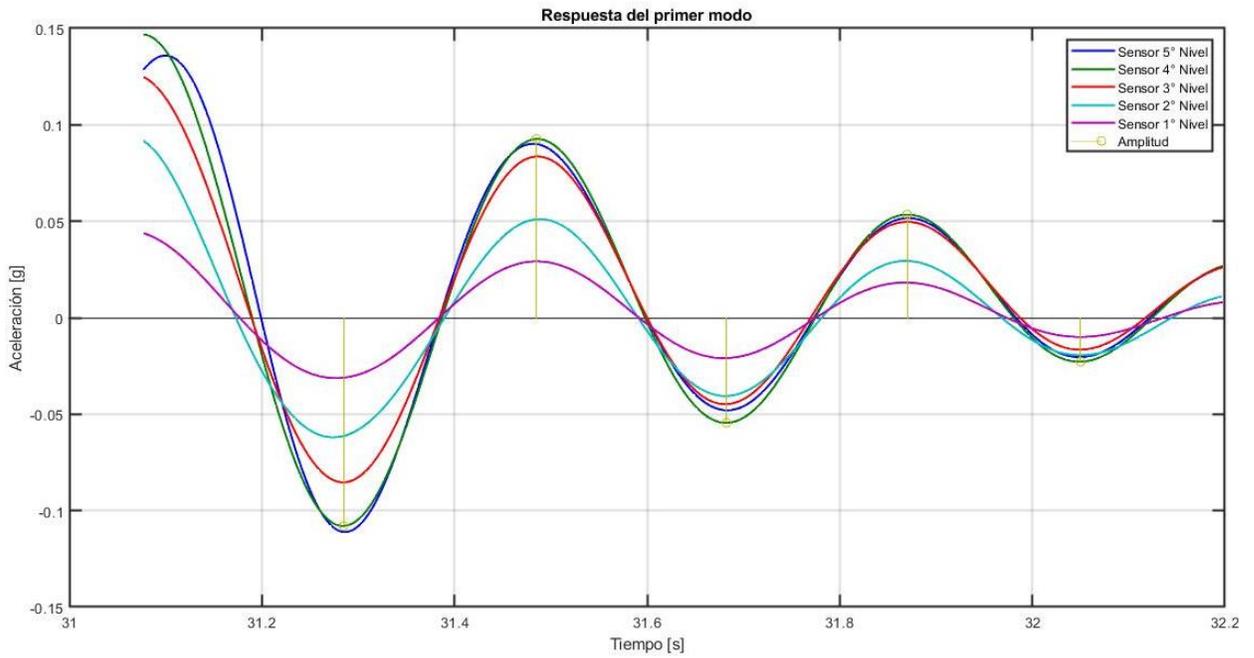


Figura 4.12. Resposta del 1º Modo - Configuración B2. ¹⁷

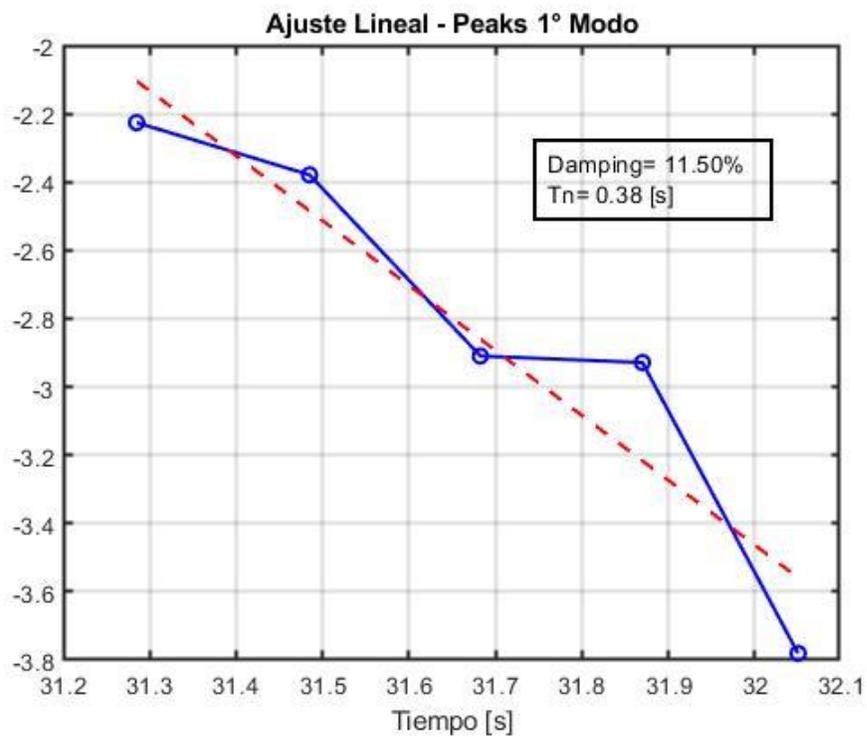


Figura 4.13. Ajuste Lineal - Configuración B2.

¹⁷ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

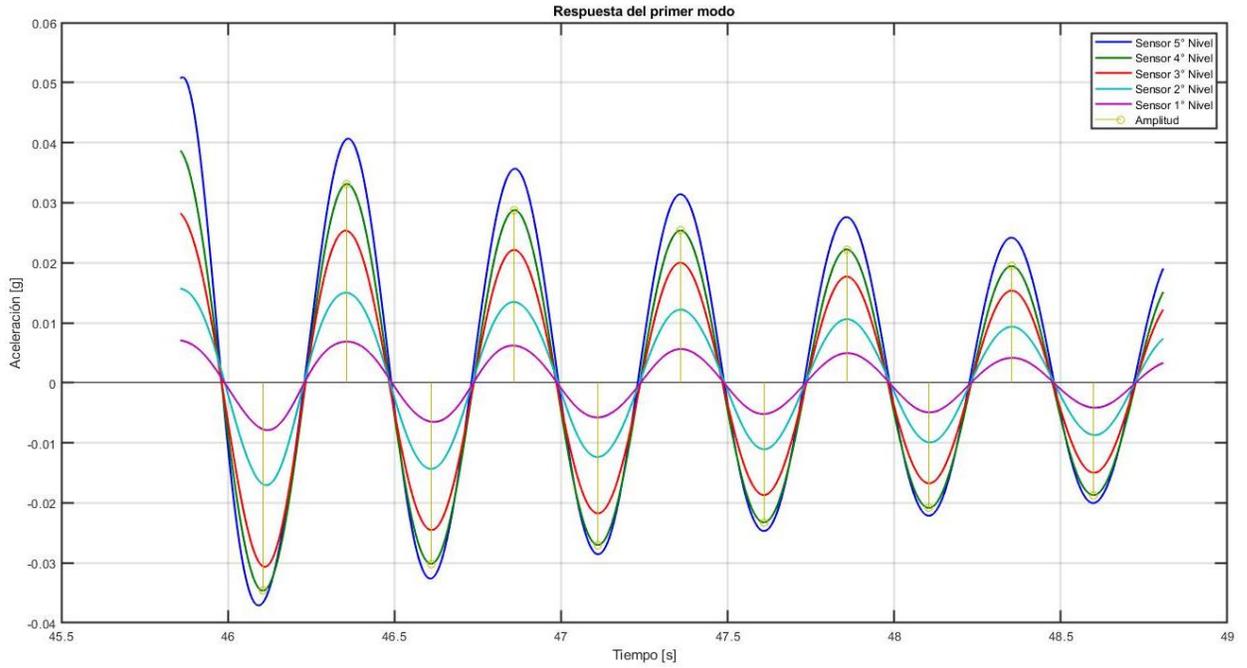


Figura 4.14. Resposta del 1º Modo - Configuración C. ¹⁸

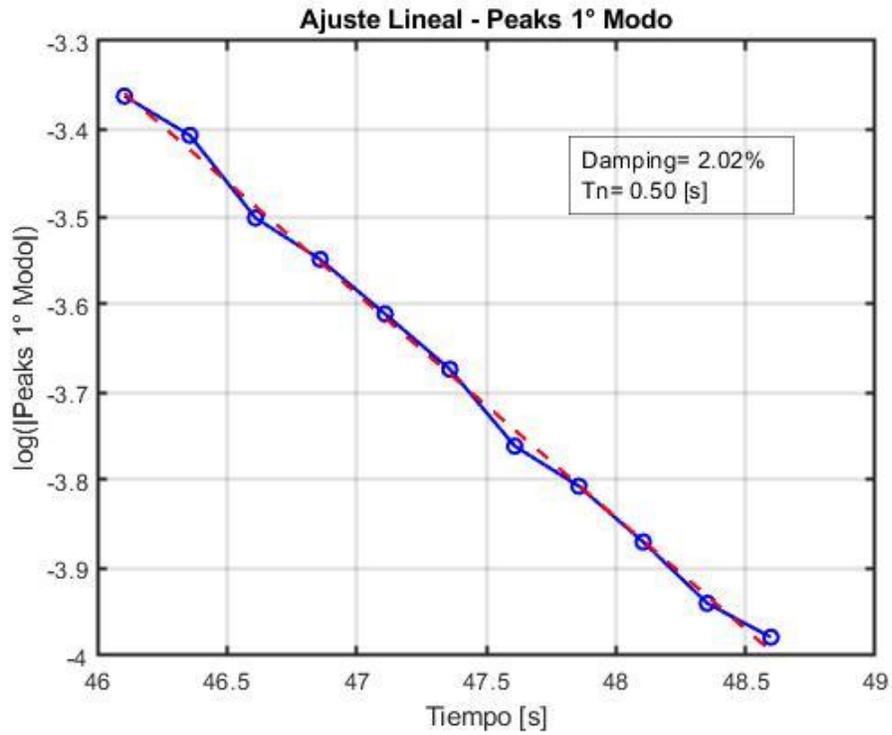


Figura 4.15. Ajuste Lineal - Configuración C.

¹⁸ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

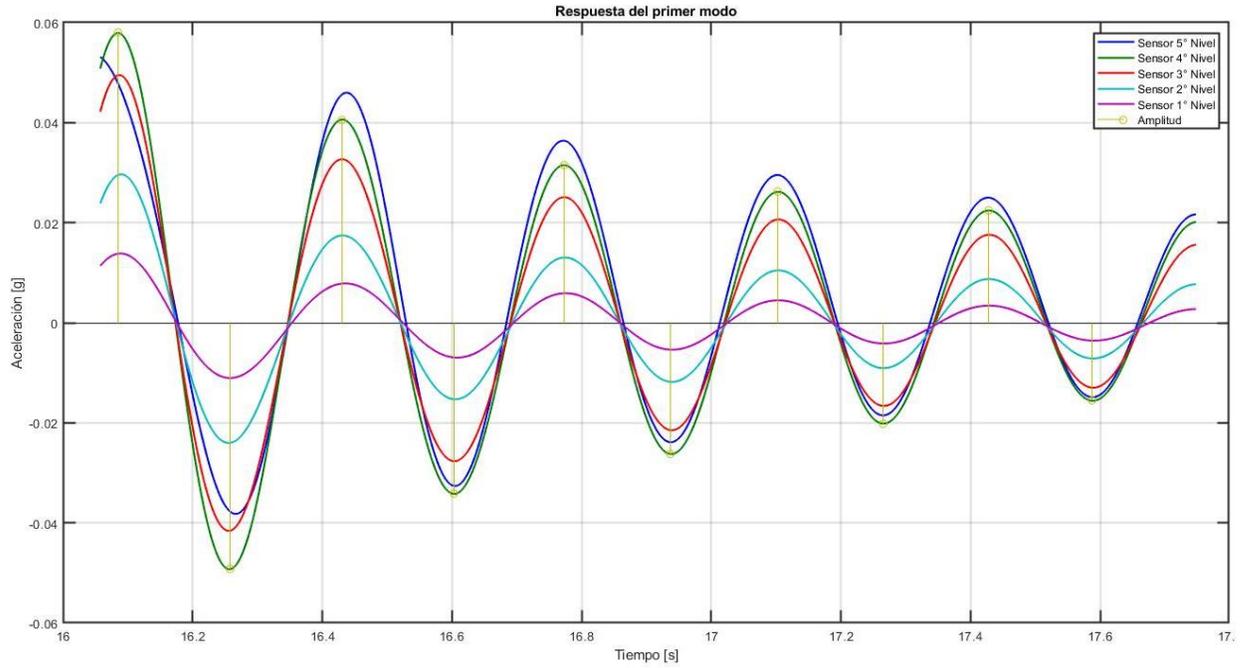


Figura 4.16. Respuesta del 1° Modo - Configuración D. ¹⁹

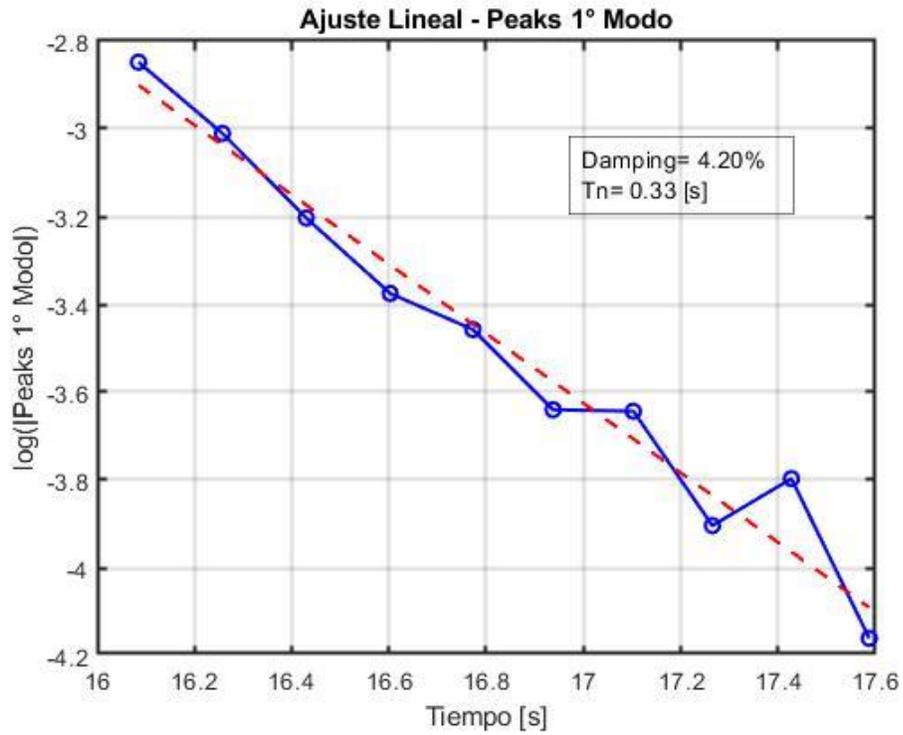


Figura 4.17. Ajuste Lineal - Configuración D.

¹⁹ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

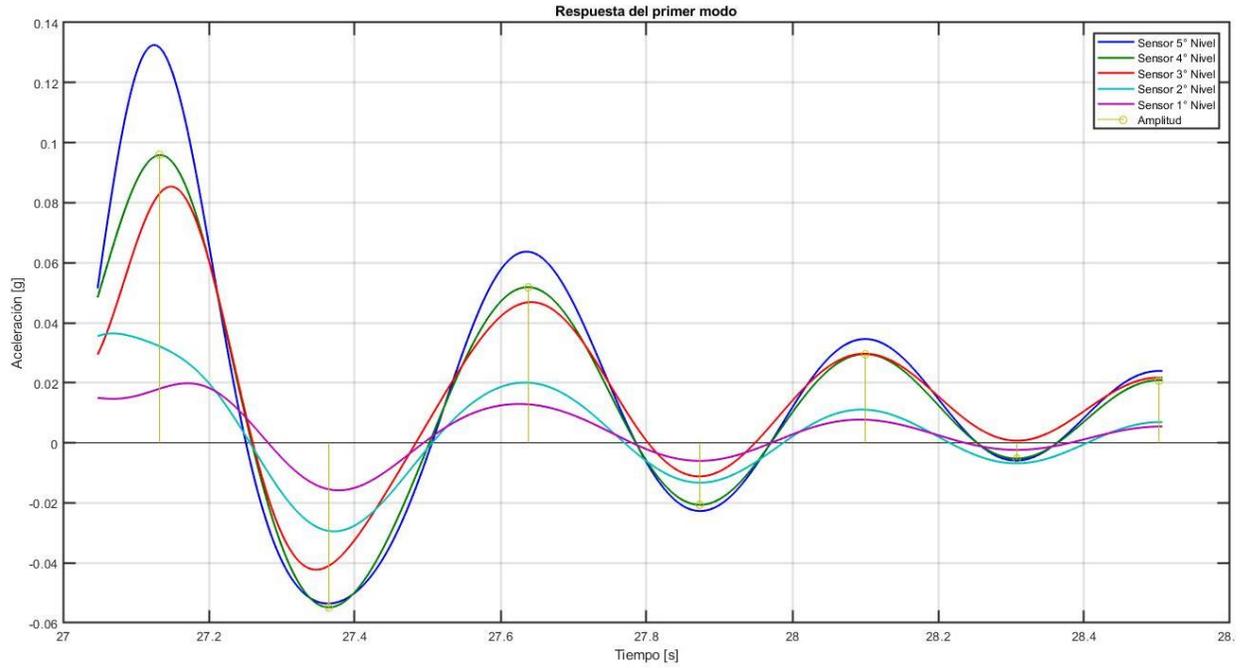


Figura 4.18. Respuesta del 1° Modo - Configuración E.²⁰

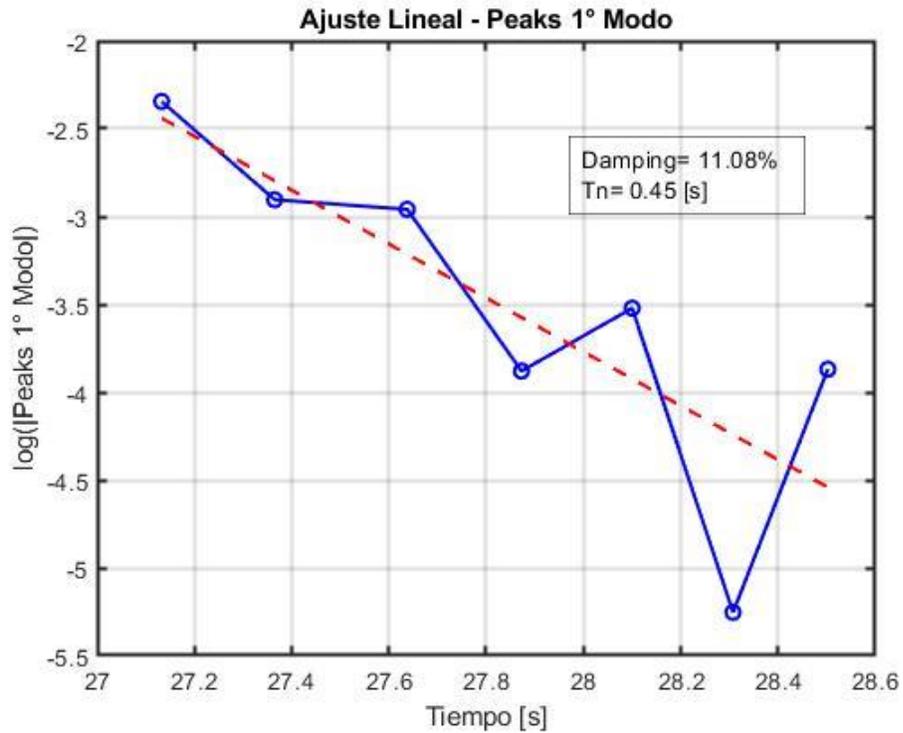


Figura 4.19. Ajuste Lineal - Configuración E.

²⁰ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

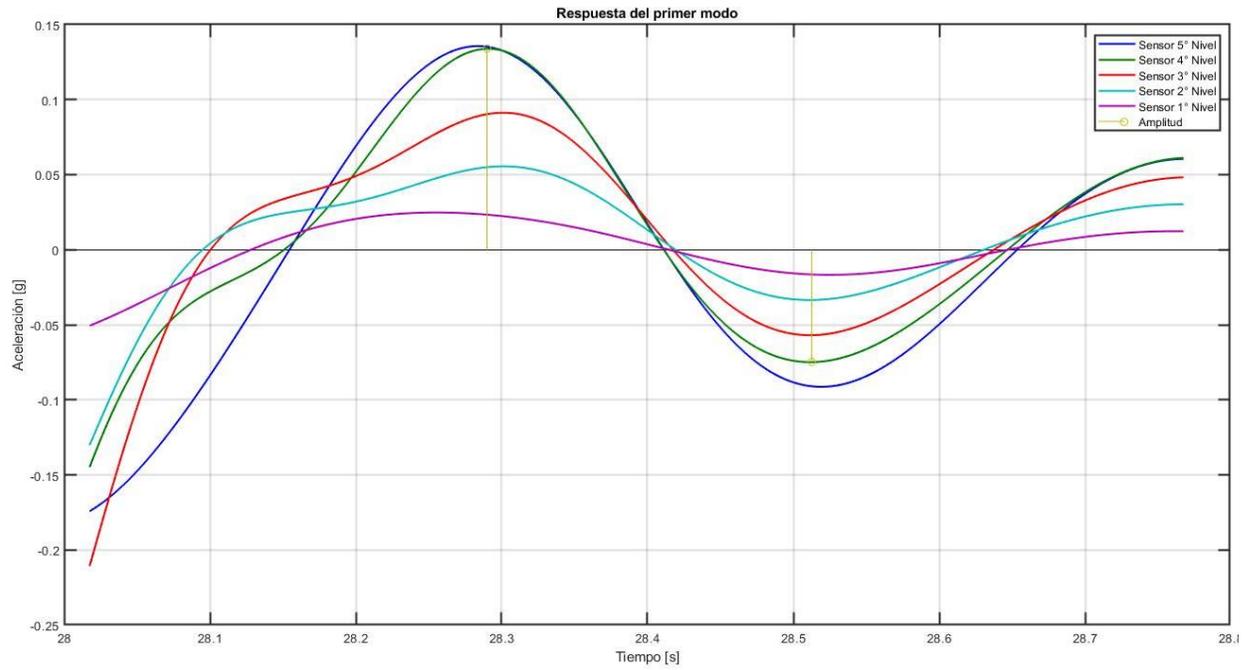


Figura 4.20. Resposta del 1º Modo - Configuración E2. ²¹

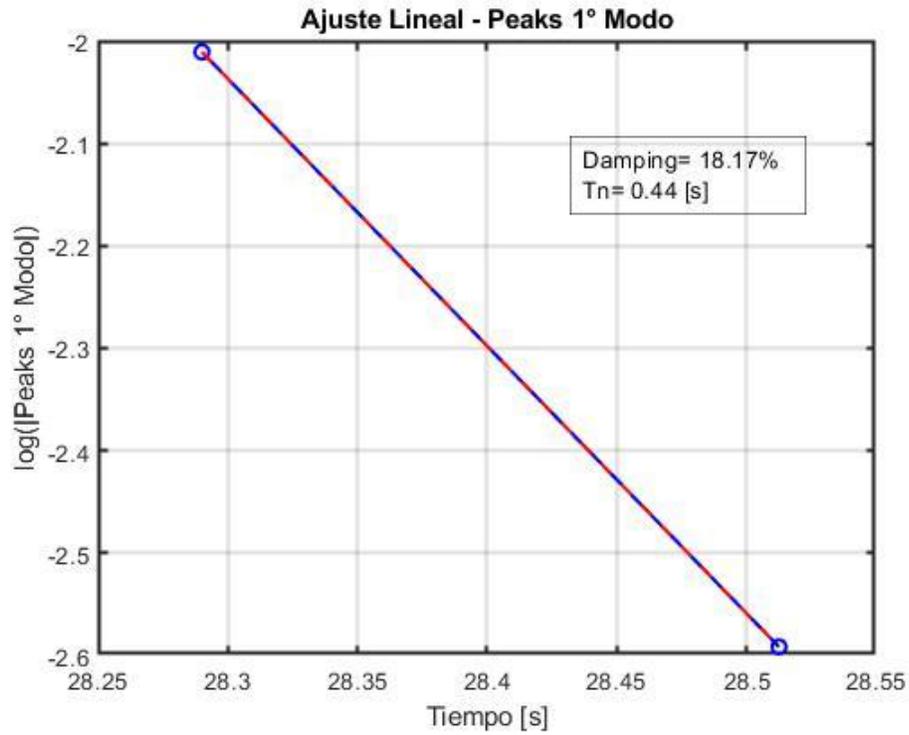


Figura 4.21. Ajuste Lineal - Configuración E2.

²¹ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

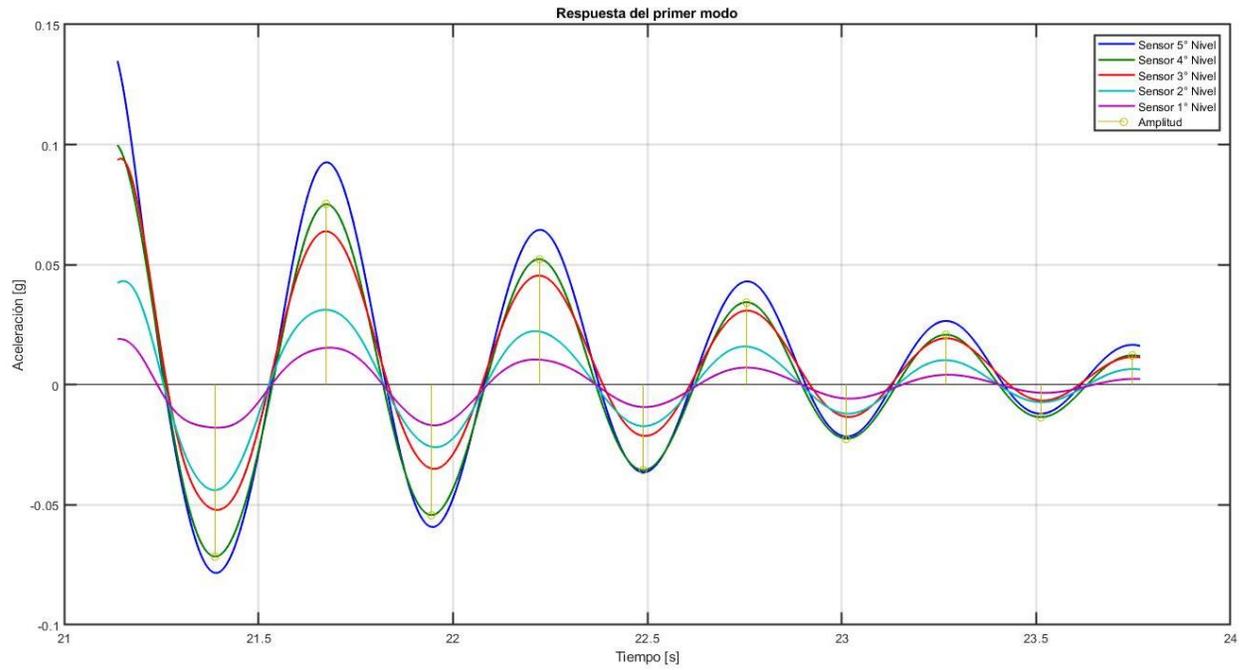


Figura 4.22. Respuesta del 1º Modo - Configuración F. ²²

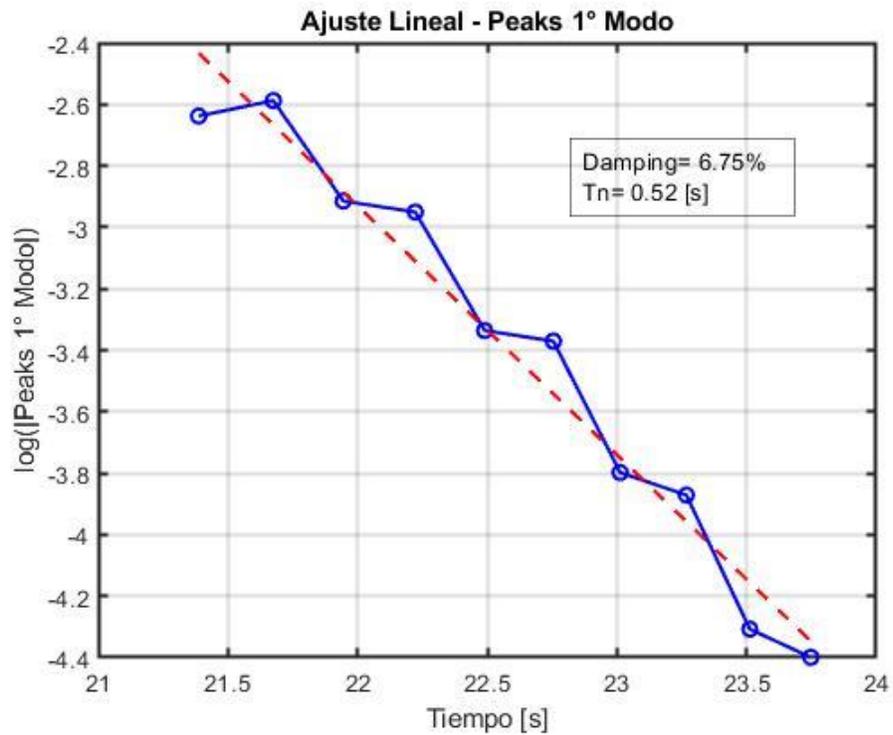


Figura 4.23. Ajuste Lineal - Configuración F.

²² Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

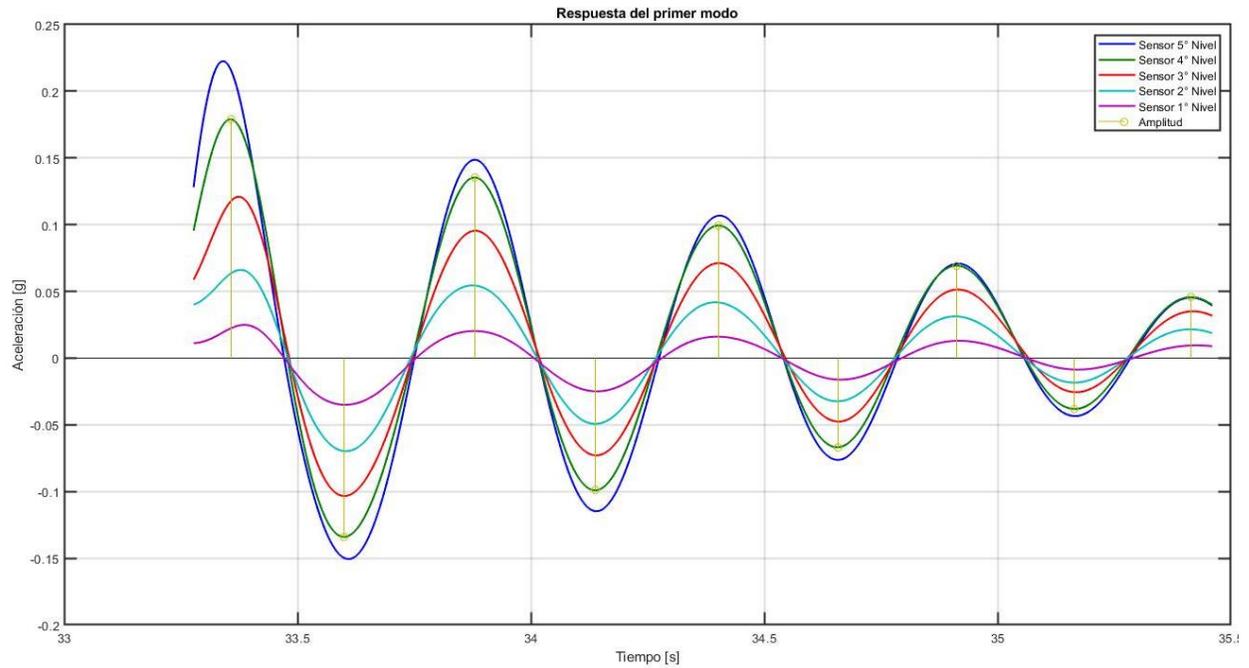


Figura 4.24. Resposta del 1º Modo - Configuración F2. ²³

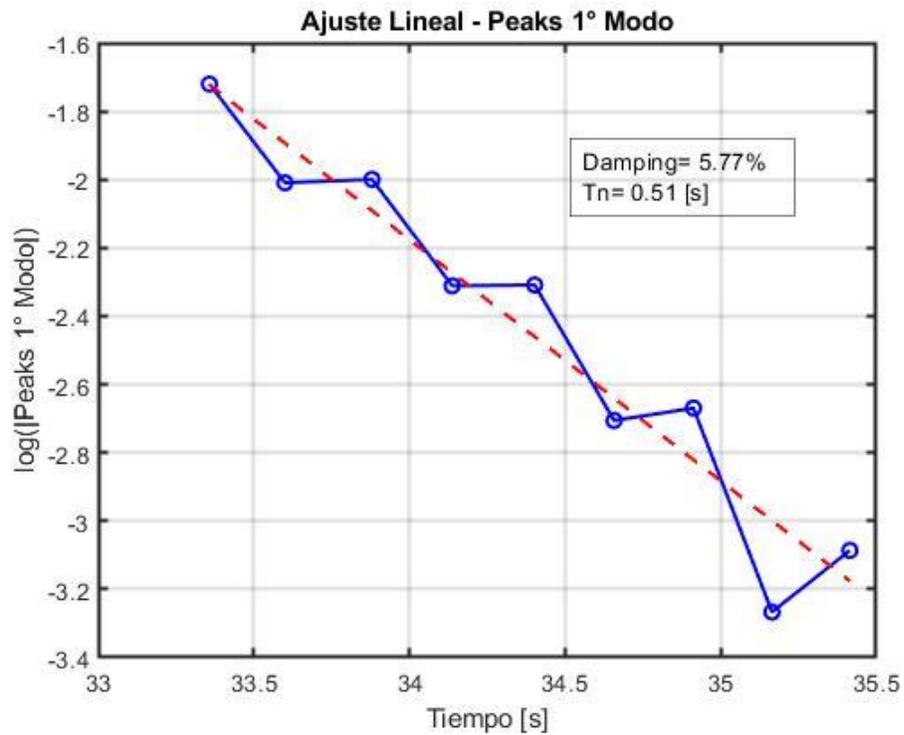


Figura 4.25. Ajuste Lineal - Configuración F2.

²³ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

Tabla 4.5. Resumen Frecuencias y Tasas de Amortiguamiento - 1° Modo.

	T_{n1} [s]	f_1 [Hz]	β
Configuración A ²⁴	0,55	1,82	1,85%
Configuración B ²⁵	0,50	2,00	2,30%
Configuración B2 ²⁶	0,38	2,63	11,50%
Configuración C ²⁷	0,50	2,00	2,02%
Configuración D ²⁸	0,33	3,03	4,20%
Configuración E ²⁹	0,45	2,22	11,08%
Configuración E2 ³⁰	0,44	2,27	18,17%
Configuración F ³¹	0,52	1,92	6,75%
Configuración F2 ³²	0,51	1,96	5,77%

²⁴ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

²⁵ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

²⁶ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

²⁷ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

²⁸ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

²⁹ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

³⁰ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

³¹ Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

³² Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

4.3. Ensayos Dinámicos

Para la realización de los ensayos del tipo dinámico se utiliza el registro sísmico de Concepción centro del 27 de febrero de 2010, también conocido como Concepción 27F, escalado al 50%. En la figura siguiente, se presentan las aceleraciones basales asociadas a este registro sísmico en cada una de las configuraciones en estudio, las cuales se encuentran en una misma escala de tiempo y fase para facilitar la comparación.

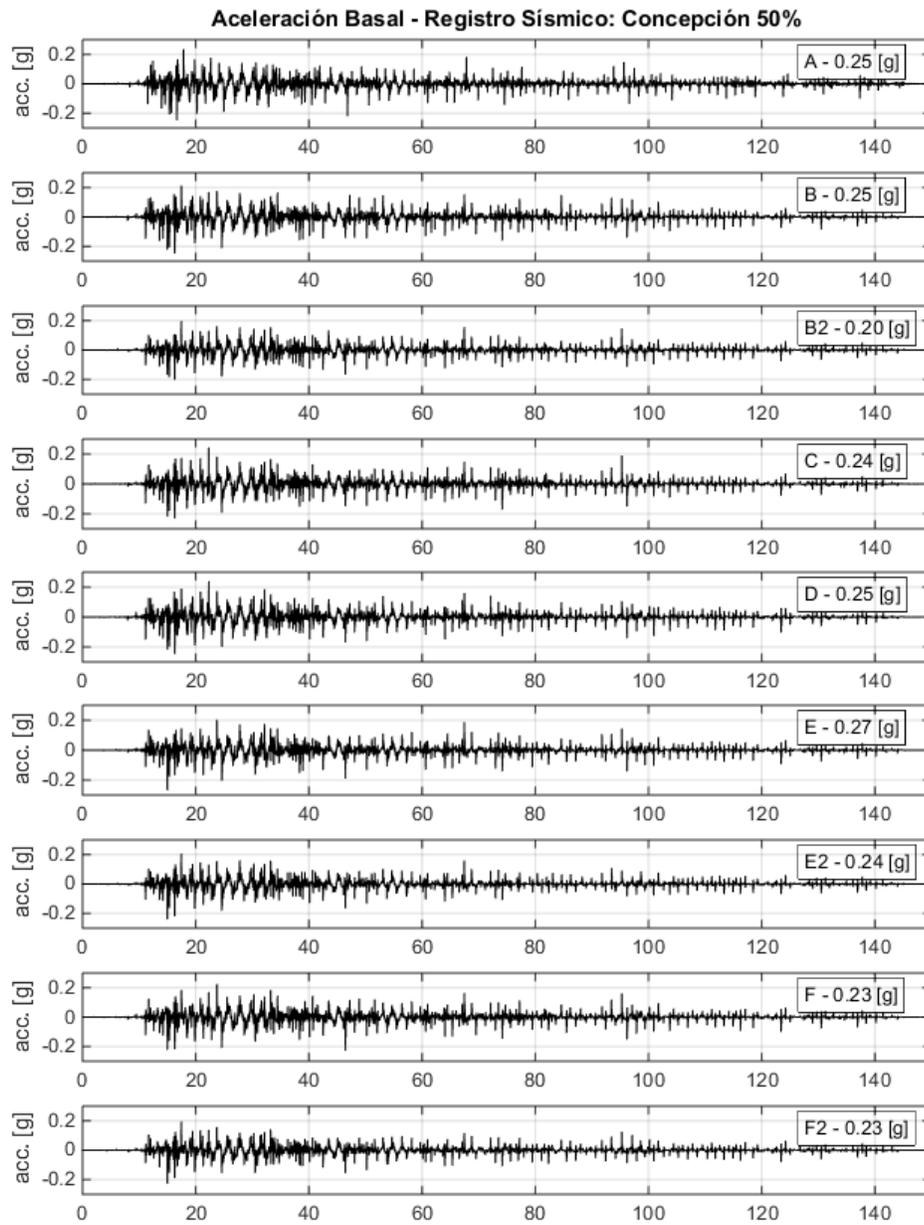


Figura 4.26. Aceleración Basal para las Distintas Configuraciones - Registro Sísmico: Concepción 50%.

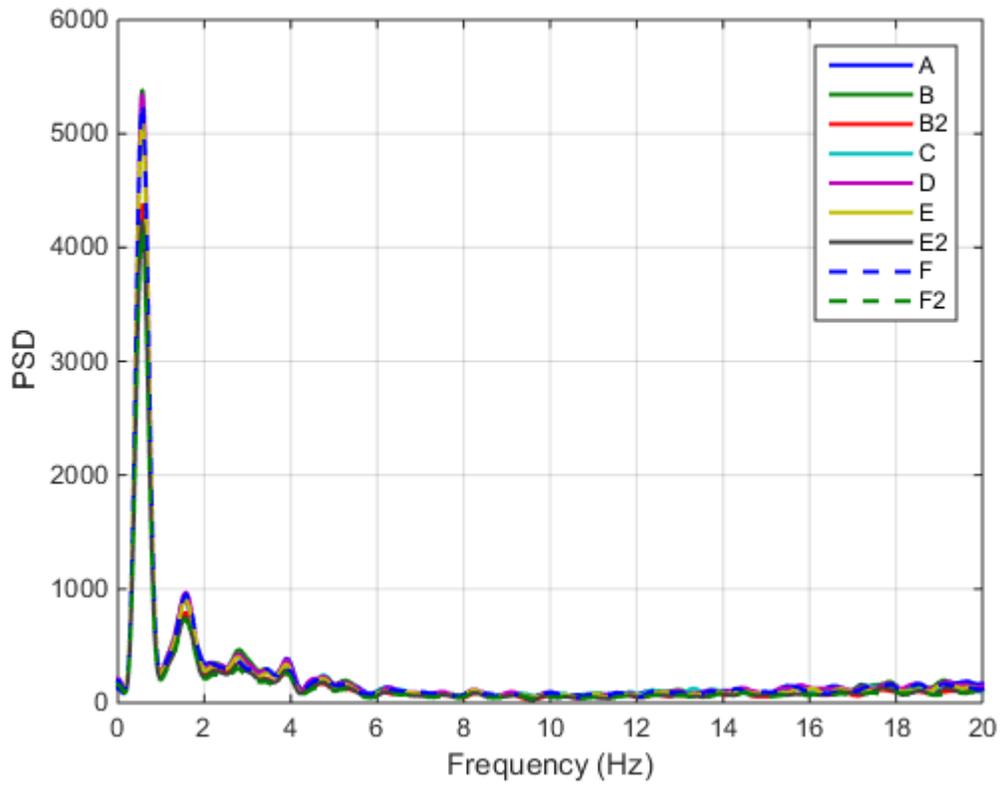


Figura 4.27. Espectro de Potencia - Registro Sísmico Concepción.

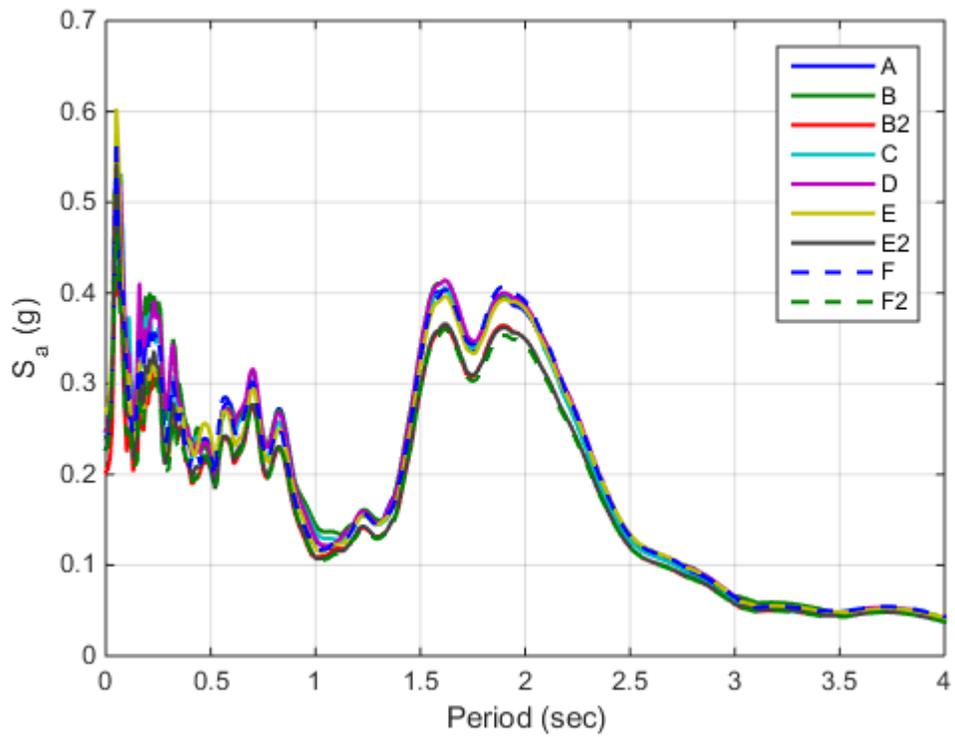


Figura 4.28. Espectro Elástico - Registro Sísmico Concepción.

Como se puede apreciar en la Figura 4.26, Figura 4.27 y Figura 4.28, las aceleraciones basales de cada configuración no son exactamente iguales entre sí a pesar de estar sujetas al mismo registro sísmico en la mesa vibradora, lo cual se debe a que la mesa vibradora reproduce el registro sísmico con ciertas variaciones en cada ocasión que, a su vez, puede tener su génesis en que la mesa vibradora se ve influenciada por las distintas configuraciones estructurales que se posan sobre ella. Una solución para estas diferencias podría ser la de calcular e implementar funciones de transferencia que permitan reproducir de forma más exacta el registro sísmico considerando las distintas configuraciones estructurales que se posan sobre la mesa vibradora. Sin embargo, a pesar de estas diferencias, los registros de aceleraciones basales son lo suficientemente similares como para permitir la comparación general de resultados entre las distintas configuraciones estructurales en estudio.

4.3.1. Mediante Método DSI

En el presente apartado se presentan los resultados de las distintas configuraciones estructurales sometidas al registro sísmico de Concepción centro 27F escalado al 50%, siendo analizadas con el método DSI para la respuesta estructural asociada a las respuestas medidas y la entrada sísmica asociada a las mediciones completas durante el sismo impuesto en la base. Cada resultado obtenido es comparado con su resultado respectivo mediante un análisis en el espacio de las frecuencias.

Los resultados del método DSI se presentan mediante diagramas de estabilidad y formas modales, que además contienen las frecuencias y tasas de amortiguamientos asociados a cada forma. En los diagramas de estabilidad se presenta el estudio de la estabilidad de que tan repetidas son las propiedades dinámicas identificadas suponiendo un orden del sistema y el subsiguiente, buscando la coincidencia en frecuencia, razón de amortiguamiento y forma modal. En este contexto, los criterios de similitud empleados para la construcción de los diagramas de estabilidad fueron 5% para frecuencia, 7% para variaciones de tasas de amortiguamiento y 5% para analizar la similitud de MAC de las formas modales, este tipo de coincidencia es conocida como triple coincidencia. Cuando la triple coincidencia comienza a repetirse sucesivamente a medida que se aumenta el orden del sistema, es posible suponer que los parámetros identificados representan estabilidad para los modos identificados. Dentro de los diagramas de estabilidad también se incluyen histogramas, los cuales contabilizan la cantidad de coincidencias en torno a una frecuencia identificada, y el espectro de potencia promedio de las señales de salida.

Nótese que, debido a la alta no linealidad de las configuraciones estructurales (distintas a la configuración A), hay configuraciones en las que no es posible identificar más de 1 o 2 modos de vibrar, como sucede en las configuraciones D, E y E2 donde sólo es posible identificar un modo de vibrar, en tanto que en las configuraciones B2, F, y F2 sólo es posible identificar dos modos de vibrar. Adicionalmente, para todas las configuraciones (a excepción de la configuración A) se observa una alta variabilidad y múltiples modos de frecuencias similares en los diagramas de estabilidad evidenciando un comportamiento altamente no-lineal.

En el capítulo 4.3.1.4. Resumen y Comentarios de Resultados mediante Método DSI, se presenta una tabla resumen de los modos y tasas de amortiguamiento obtenidas mediante el método DSI, además se discute sobre los resultados presentados en los apartados siguientes.

La totalidad de resultados obtenidos mediante el método DSI y el análisis en frecuencia se presentan en el 8.3. Anexo C: Resultados mediante DSI.

4.3.1.1. Configuración A ³³

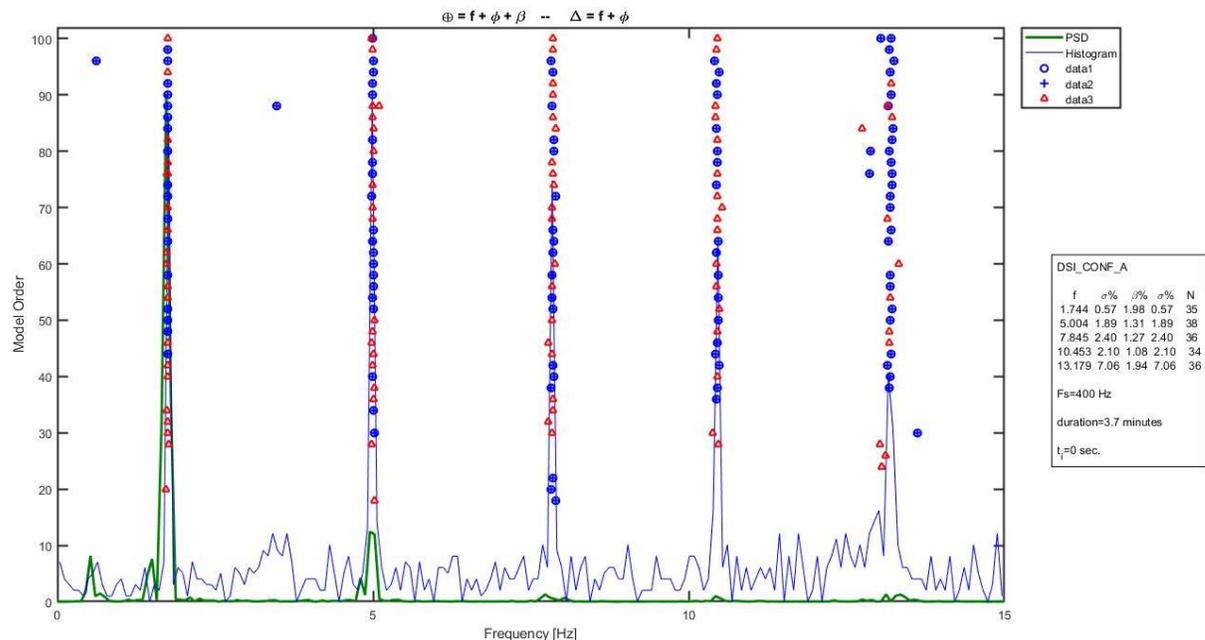


Figura 4.29. Diagrama de Estabilidad - Configuración A.

³³ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

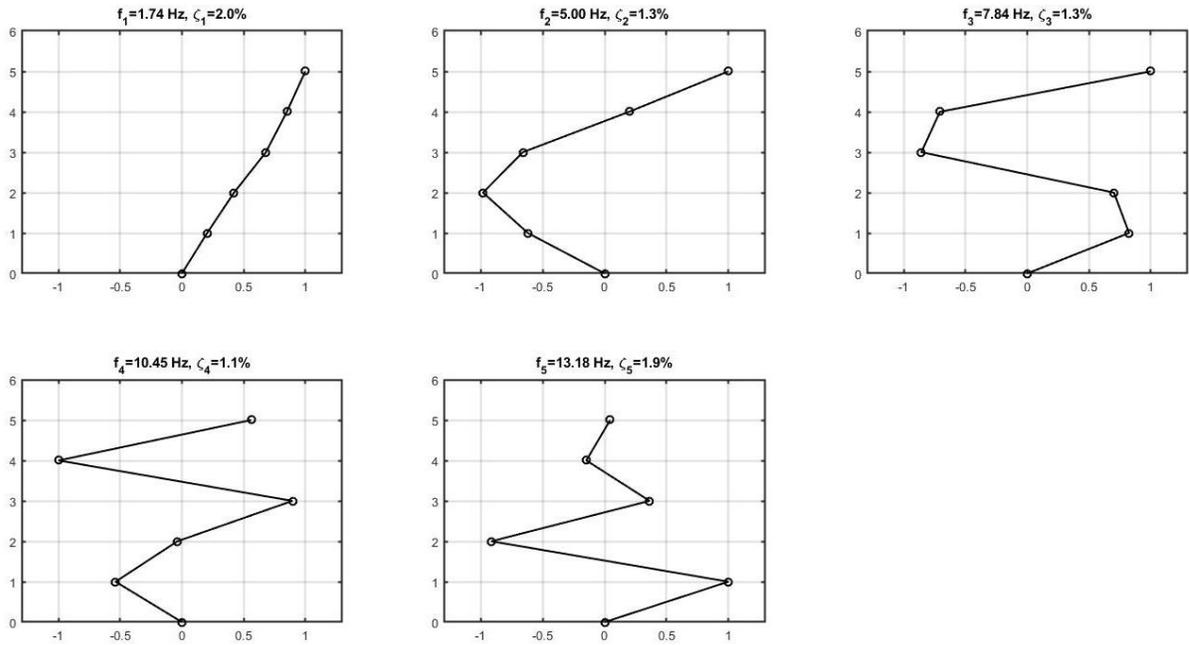


Figura 4.30. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración A.

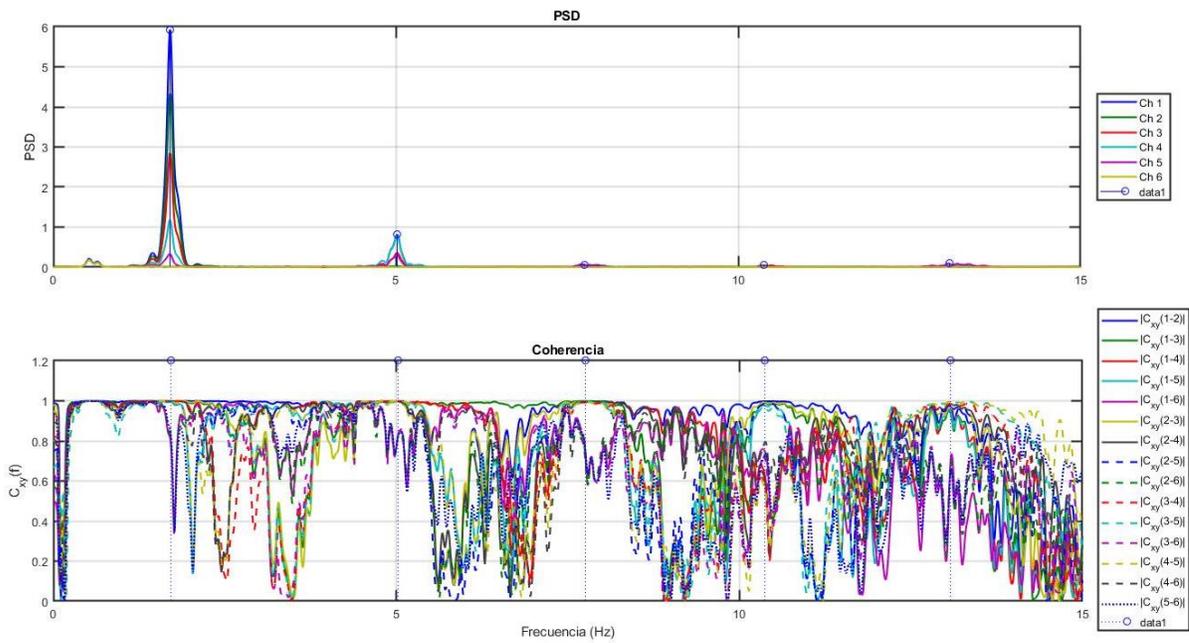


Figura 4.31. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración A.

4.3.1.2. Configuración B2 ³⁴

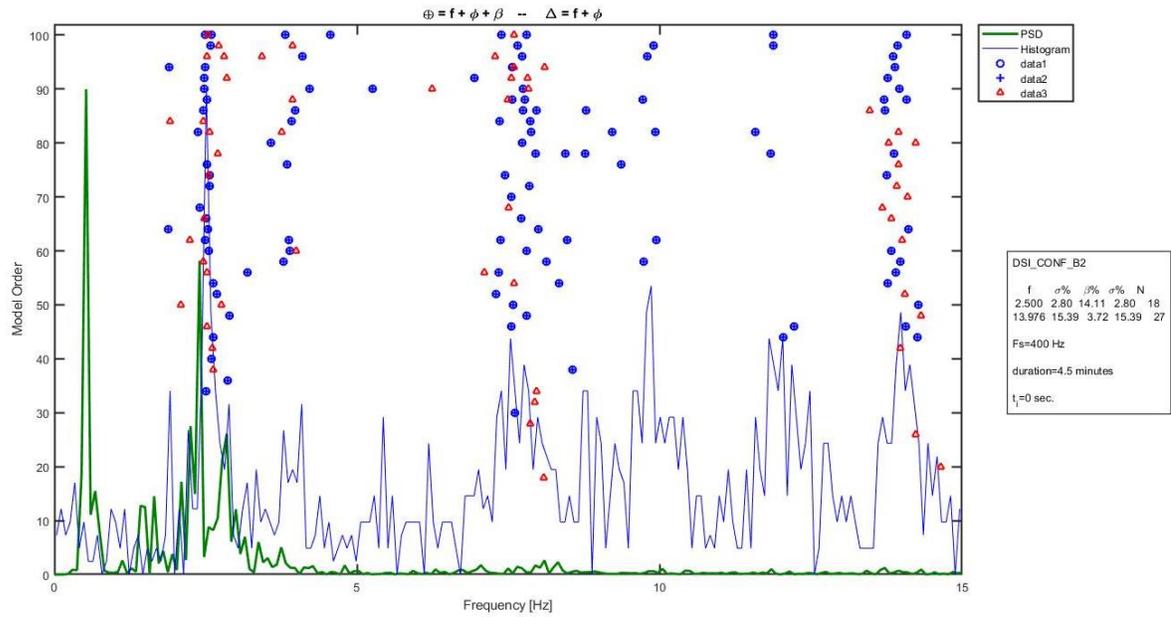


Figura 4.32. Diagrama de Estabilidad - Configuración B2.

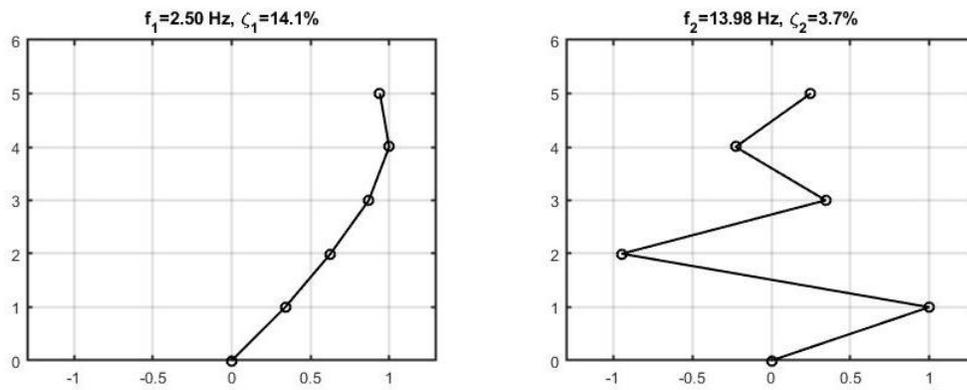


Figura 4.33. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración B2.

³⁴ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

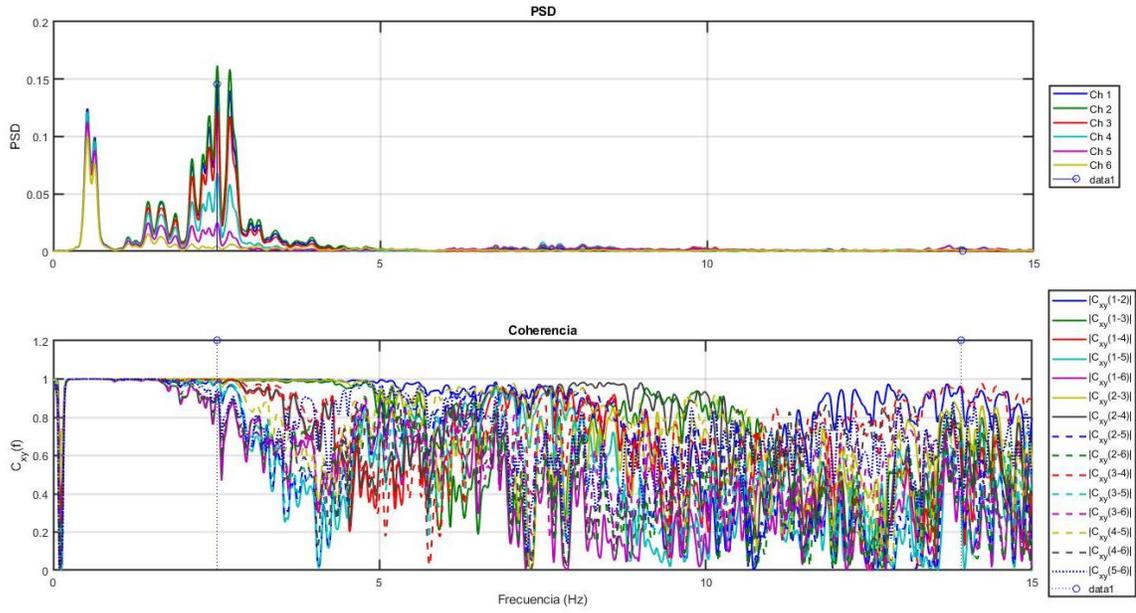


Figura 4.34. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración B2.

4.3.1.3. Configuración E2 ³⁵

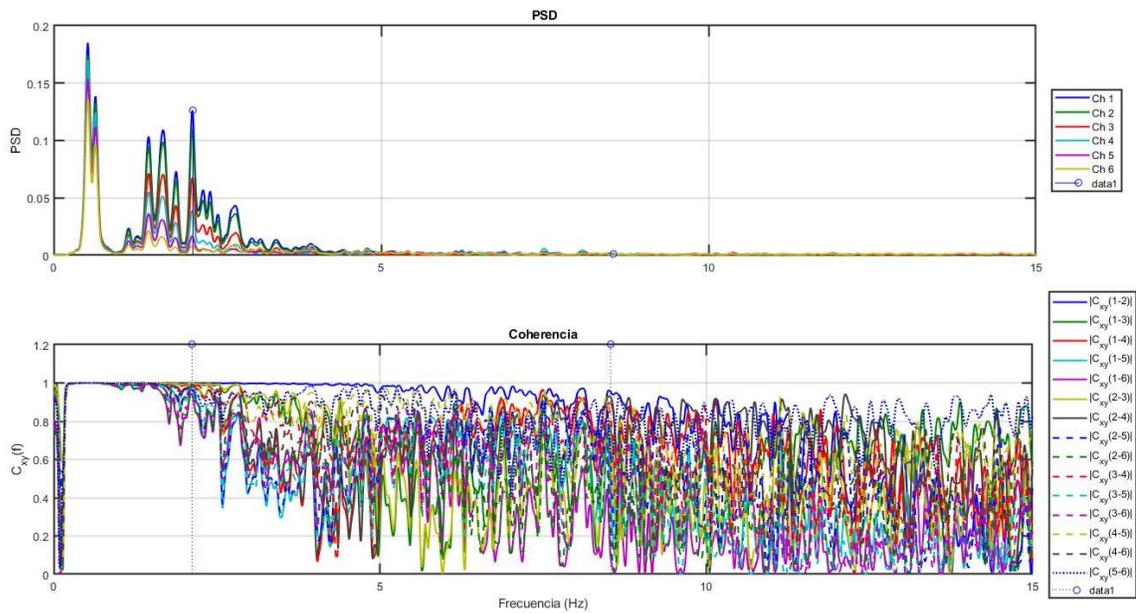


Figura 4.35. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración E2.

³⁵ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

4.3.1.4. Resumen y Comentarios de Resultados mediante Método DSI

La Tabla 4.6 presenta un resumen de los resultados obtenidos mediante el método DSI. Nótese que los modos presentados en esta tabla presentan gran similitud con los presentados en la Tabla 4.4, que resume los resultados obtenidos mediante Ibrahim.

Sin embargo, en los diagramas de estabilidad se puede apreciar que las frecuencias identificadas son más bien un ancho de banda de frecuencias identificadas, lo cual sugiere que el método DSI para la respuesta completa puede ser incorrecta para realizar el análisis de estructuras que presentan comportamientos no lineales. Este fenómeno, que se hace más evidente y se analiza en mayor profundidad en el Capítulo 4.3.2. **Mediante Método DSI para Pequeñas Ventanas de Tiempo** relacionado a la aplicación del método DSI para pequeñas ventanas de tiempo, indica la alta no linealidad que presentan las configuraciones en estudio, hecho que también se evidencia en las figuras de espectros de potencia dado que se observa como existen múltiples peaks en torno a las frecuencias fundamentales de las configuraciones estructurales analizadas (8.3. Anexo C: Resultados mediante DSI).

Nótese que los resultados del DSI indican que el primer modo de vibrar para todas las configuraciones tiene una frecuencia mayor a la frecuencia del primer modo de la configuración A, indicando que el cable y/o los disipadores aportan rigidez adicional a la estructura. Es más, para las configuraciones que presentan solo disipadores instalados, sean del tipo I o del tipo II, su primer modo es similar al de la estructura sin sistema de disipación, configuración A, en tanto, para las configuraciones con el sistema de cables y poleas con disipador en serie, configuraciones B y B2, su primer modo se asemeja más a las configuraciones que sólo tienen un cable con baja tensión y con alta tensión, configuraciones C y D, respectivamente, las cuales a su vez tienen frecuencias para su primer modo que se asemejan a la presentada por la configuración A. En síntesis, se observa que todas las configuraciones estudiadas tienen frecuencias para su primer modo que son levemente mayores que la configuración A (durante su movimiento fuerte).

Tabla 4.6. Resumen de Modos y Tasas de Amortiguamiento - DSI.

	Propiedad	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
Configuración A ³⁶	f [Hz]	1,74	5,00	7,84	10,45	13,18
	β	2,0%	1,3%	1,3%	1,1%	1,9%
Configuración B ³⁷	f [Hz]	1,87	5,37	8,39	10,88	13,56
	β	3,8%	2,9%	2,3%	2,2%	3,1%
Configuración B2 ³⁸	f [Hz]	2,50	-	13,98		
	β	14,1%	-	3,7%		
Configuración C ³⁹	f [Hz]	1,87	5,42	8,32	10,88	
	β	3,5%	2,5%	2,2%	2,2%	
Configuración D ⁴⁰	f [Hz]	2,66				
	β	8,8%				
Configuración E ⁴¹	f [Hz]	2,01				
	β	11,2%				
Configuración E2 ⁴²	f [Hz]	2,10				
	β	18,2%				
Configuración F ⁴³	f [Hz]	1,79	5,26			
	β	6,1%	5,7%			
Configuración F2 ⁴⁴	f [Hz]	1,99	6,23			
	β	8,2%	6,9%			

³⁶ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

³⁷ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

³⁸ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

³⁹ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

⁴⁰ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

⁴¹ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

⁴² Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

⁴³ Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

⁴⁴ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

Por otro lado, se observa la alta tasa de amortiguamiento que posee la configuración B2, la cual solo es superada por la configuración E2. En otras palabras, este resultado muestra que la configuración con el sistema de cables y poleas con un disipador en serie logra mejores tasas de amortiguamiento que la configuración con tres disipadores, y la disipación por amortiguamiento es comparable con la configuración con cinco disipadores. El por qué dicho resultado se da para la configuración B2 y no se replica para la configuración B se explica en el Capítulo 4.4. Corte y Desplazamientos, sobre corte y desplazamiento, donde se menciona que la mayor tensión del cable que permiten los disipadores Tipo II facilita la transmisión de la demanda sísmica al sistema de disipación y por ende permite un mejor desempeño del mismo, lo cual no ocurre de manera tan efectiva para la configuración B. En otras palabras, la pretensión inicial del cable permite que el cable trabajase en tracción durante todo el evento sísmico.

4.3.2. Mediante Método DSI para Pequeñas Ventanas de Tiempo

En el presente apartado se presentan los resultados obtenidos del análisis de las distintas configuraciones estructurales mediante el método DSI por pequeñas ventanas de tiempo, cuando dichas configuraciones son sometidas a la acción sísmica del registro de Concepción centro del 27F escalado al 50%. Las ventanas escogidas para el análisis difieren en cuanto al tiempo escogido, debido a las duraciones de cada ensayo, sin embargo, la elección de estas tres ventanas sigue la siguiente lógica: la primera corresponde al instante previo al inicio del registro sísmico, la segunda al instante de mayor acción sísmica del registro, en tanto la tercera corresponde al instante en el que está por finalizar la acción sísmica. En las figuras siguientes, t_1 , t_2 y t_3 hacen referencia a la primera, segunda y tercera ventana, respectivamente.

La tipología de los diagramas de estabilidad presentados en este apartado coincide con los presentados en el apartado 4.3.1. **Mediante Método DSI** Adicionalmente a los diagramas de estabilidad se presentan figuras con la evolución temporal de las propiedades dinámicas identificadas. Estas figuras se subdividen en tres figuras, la primera de éstas presenta la variación temporal de las frecuencias identificadas para cada modo, la segunda de éstas presenta la evolución temporal del amortiguamiento asociado a cada frecuencia identificada, en tanto que la tercera de éstas presenta la evolución del MAC (Modal Assurance Criterion) en el tiempo. El MAC (Allemang RJ, 1982) es un parámetro utilizado

para comparar dos vectores, entregando valores entre 0 y 1, siendo un MAC igual a 1 dos vectores linealmente dependientes. De este modo, el MAC es utilizado para comparar la semejanza entre dos formas modales para órdenes consecutivos.

Adicionalmente, se presenta la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo para cada configuración estructural. En cada uno de estos transferenciogramas se puede apreciar como varía la función de transferencia asociada a la evolución de las frecuencias identificadas para cada modo de vibrar en función de la acción sísmica provista por el registro sísmico.

La totalidad de los resultados obtenidos mediante el método DSI para pequeñas ventanas de tiempo se presentan en el 8.4. Anexo D: Resultados mediante DSI para Pequeñas Ventanas de Tiempo.

4.3.2.1. Configuración A ⁴⁵

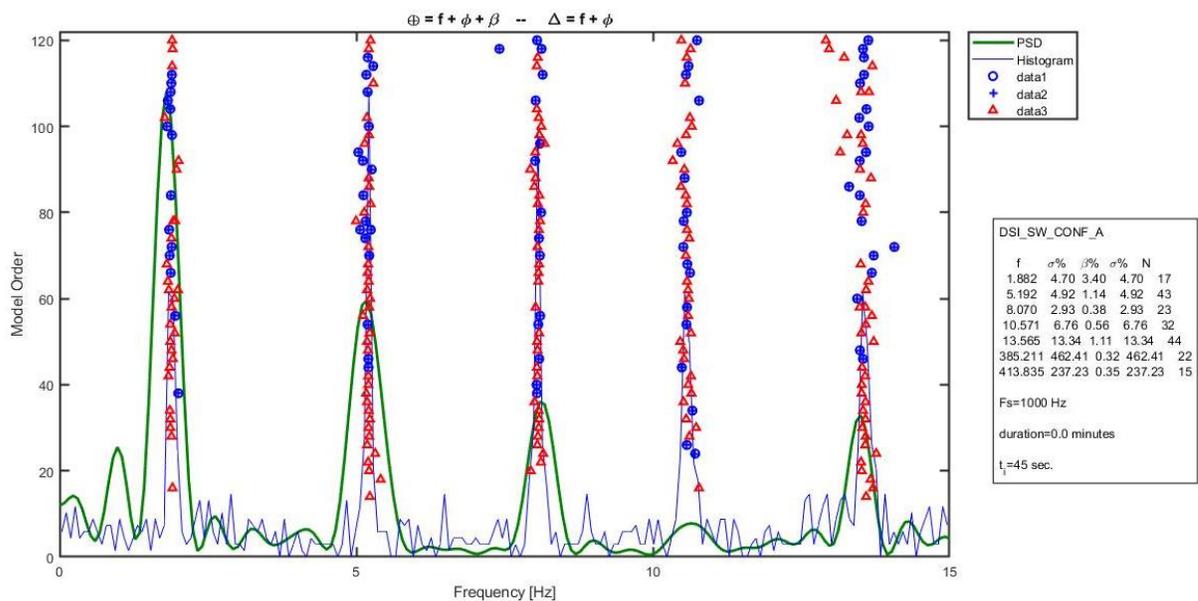


Figura 4.36. Diagrama de Estabilidad, $t_1=45$ [s] - Configuración A.

⁴⁵ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

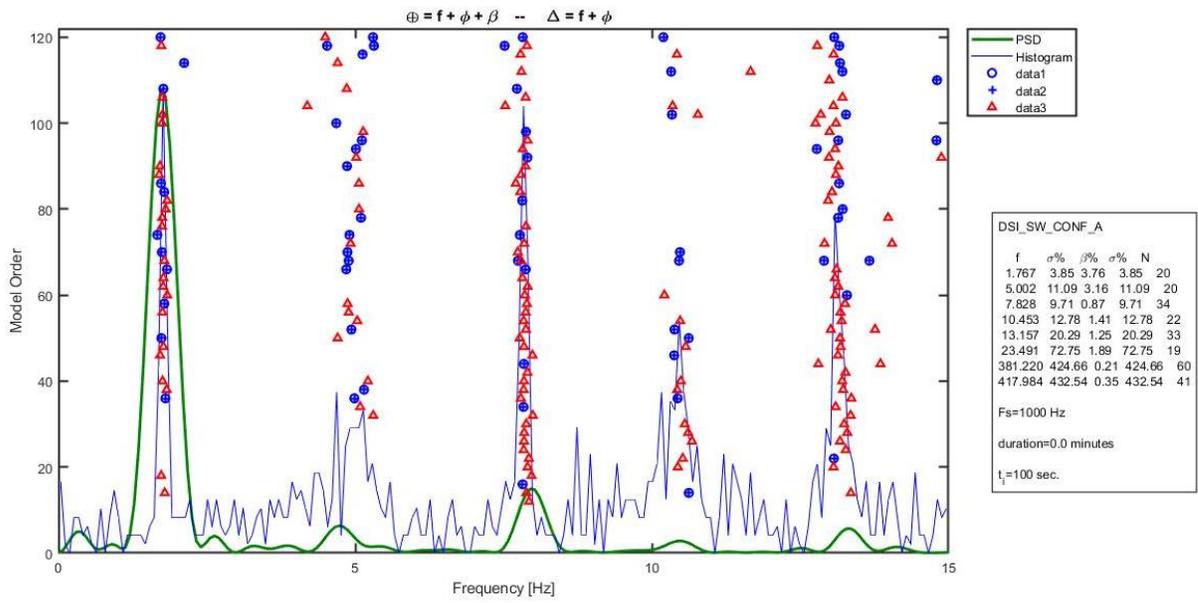


Figura 4.37. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración A.

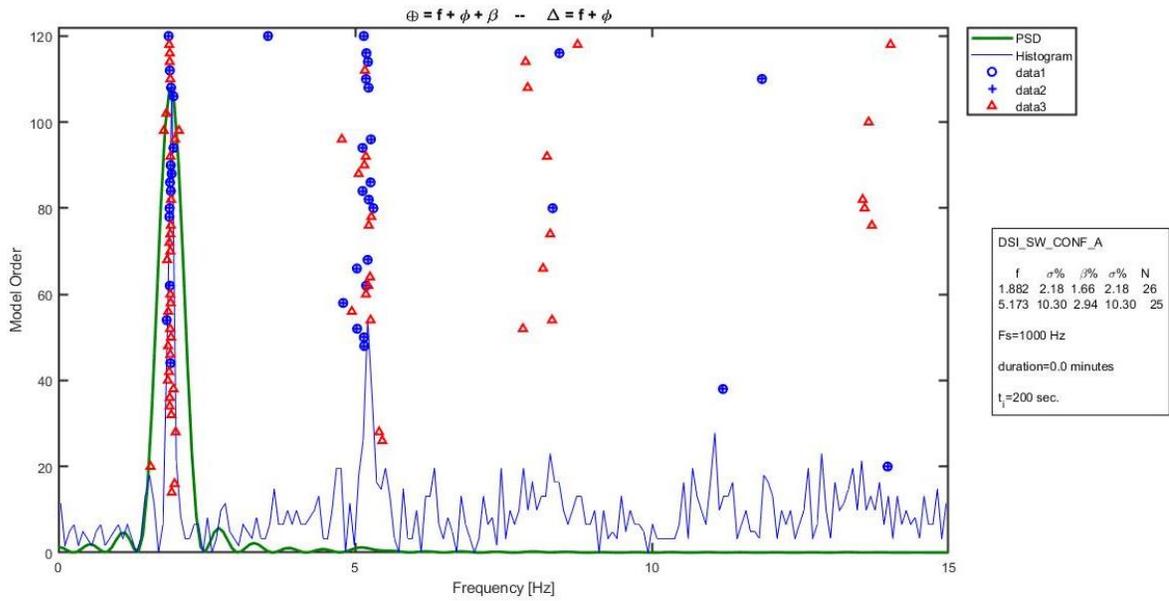


Figura 4.38. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración A.

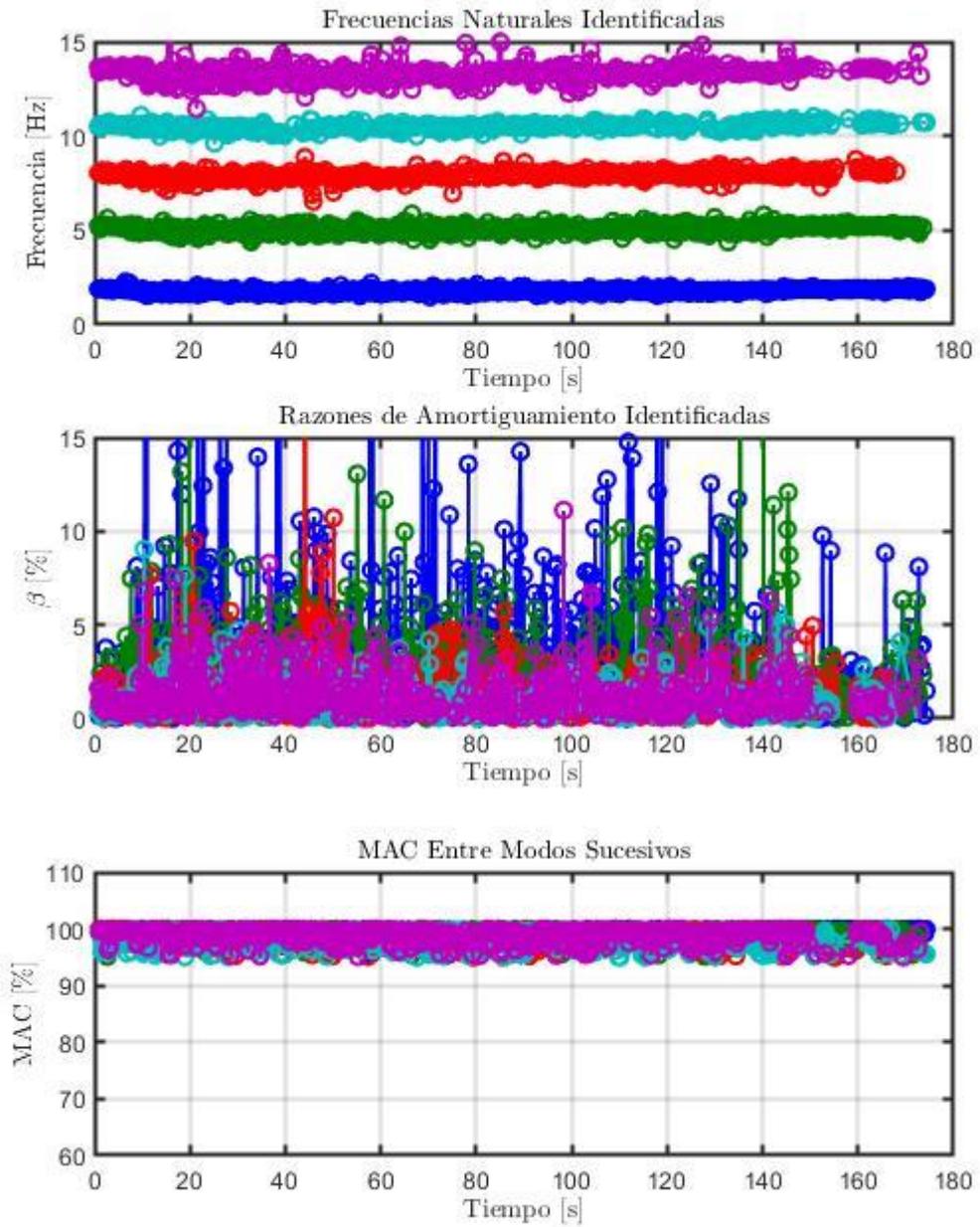


Figura 4.39. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración A.

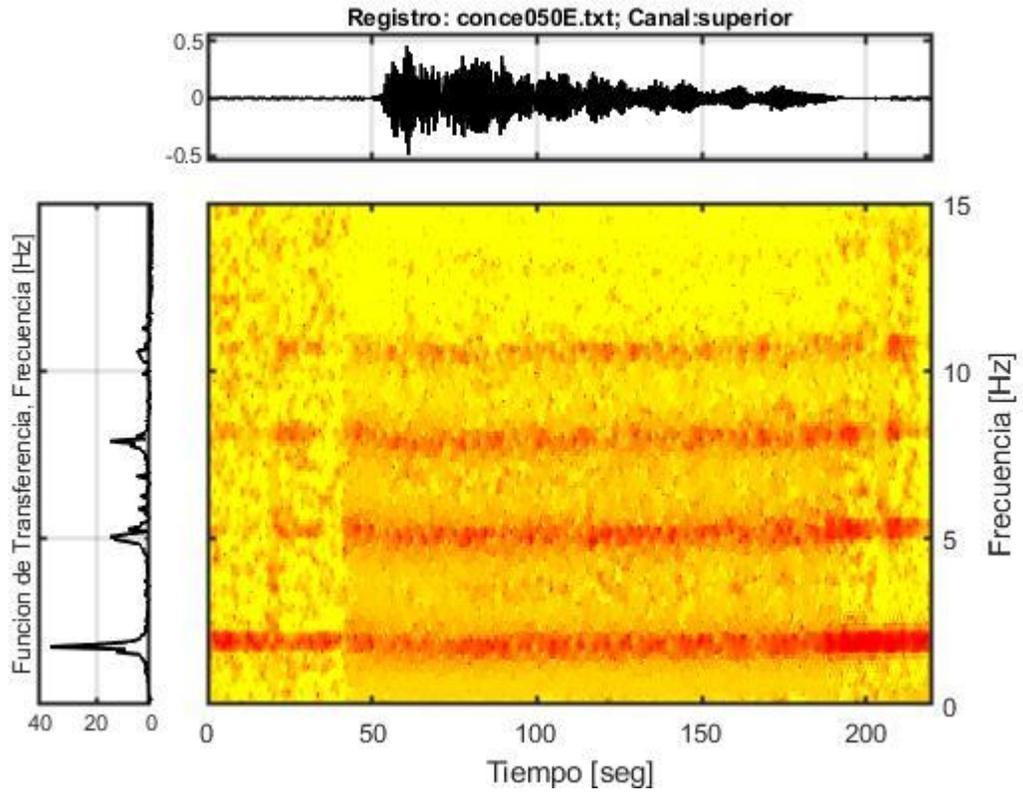


Figura 4.40. Función de Transferenciograma - Configuración A.

4.3.2.2. Configuración B ⁴⁶

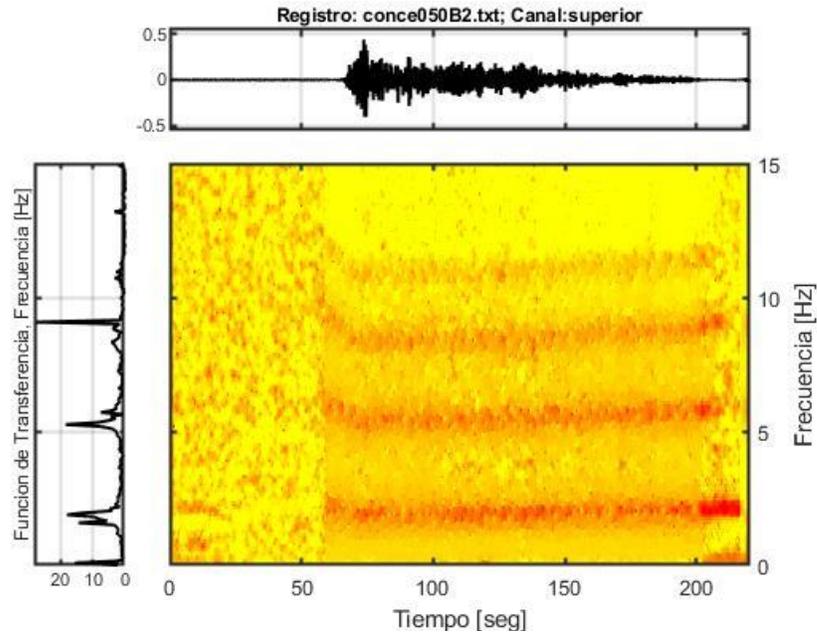


Figura 4.41. Función de Transferenciograma - Configuración B.

4.3.2.3. Configuración B2 ⁴⁷

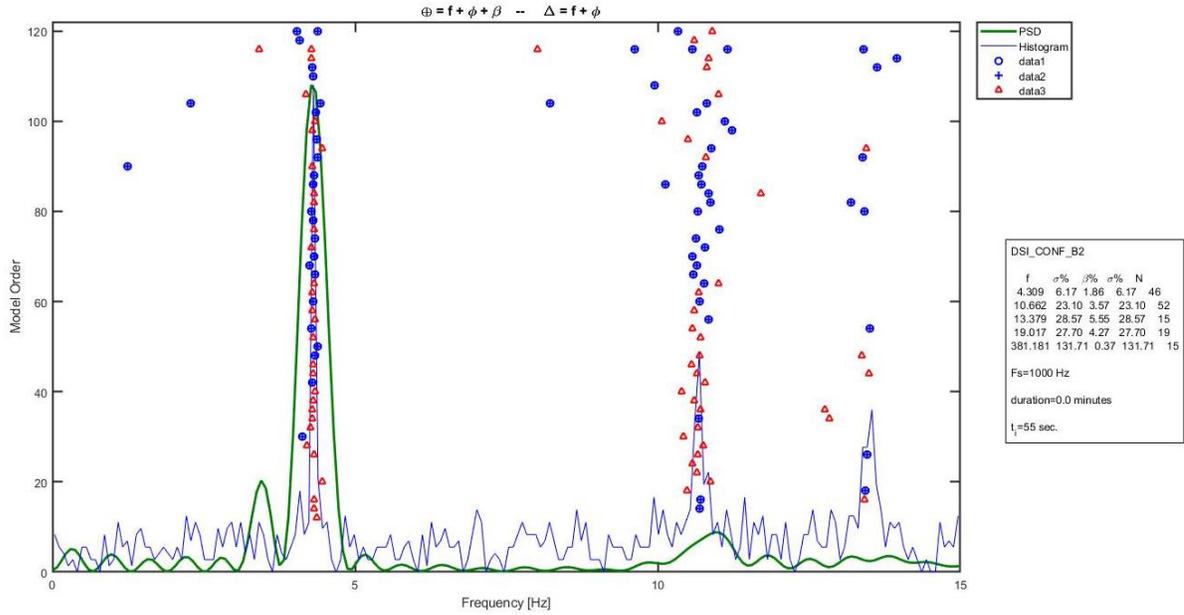


Figura 4.42. Diagrama de Estabilidad, t₁=55 [s] - Configuración B2.

⁴⁶ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

⁴⁷ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

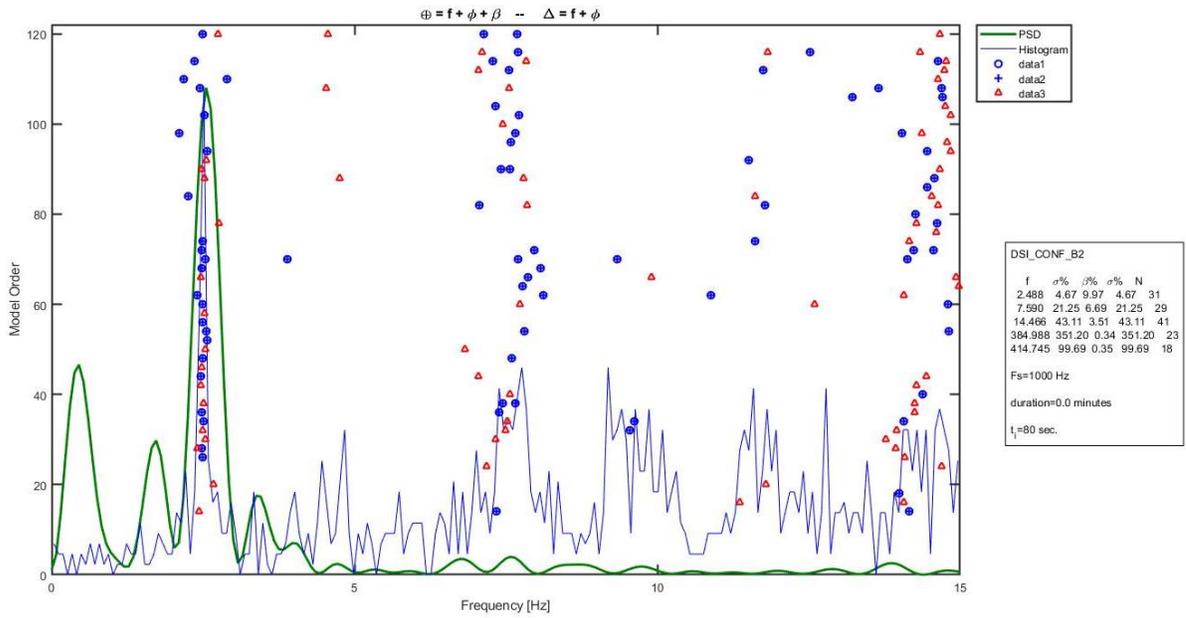


Figura 4.43. Diagrama de Estabilidad, $t_2=80$ [s] - Configuración B2.

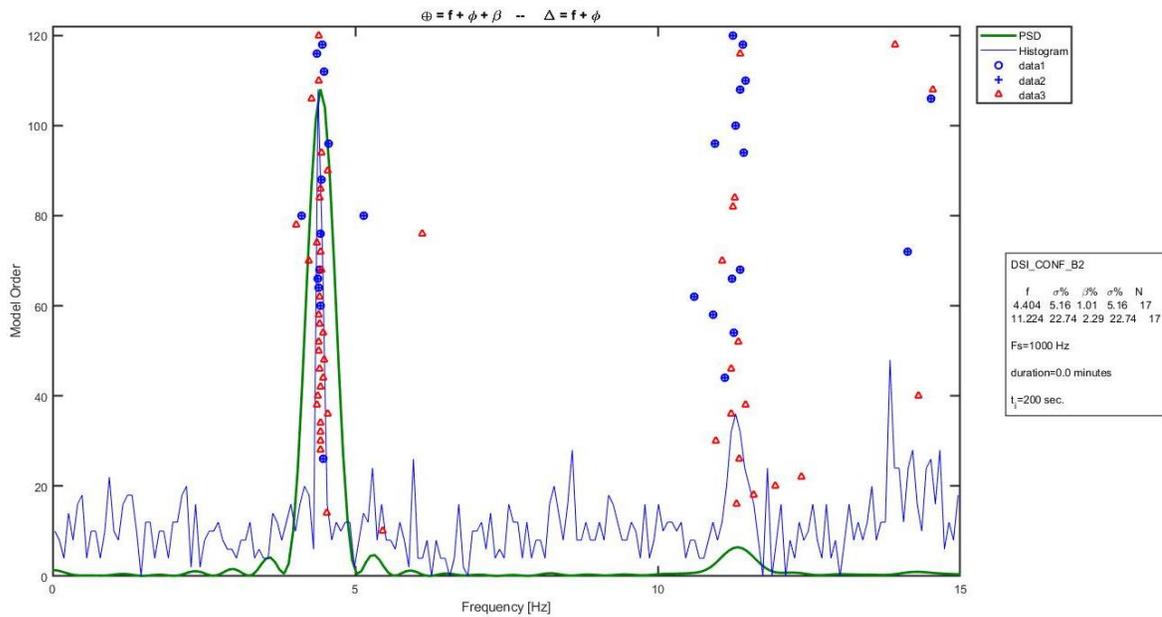


Figura 4.44. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración B2.

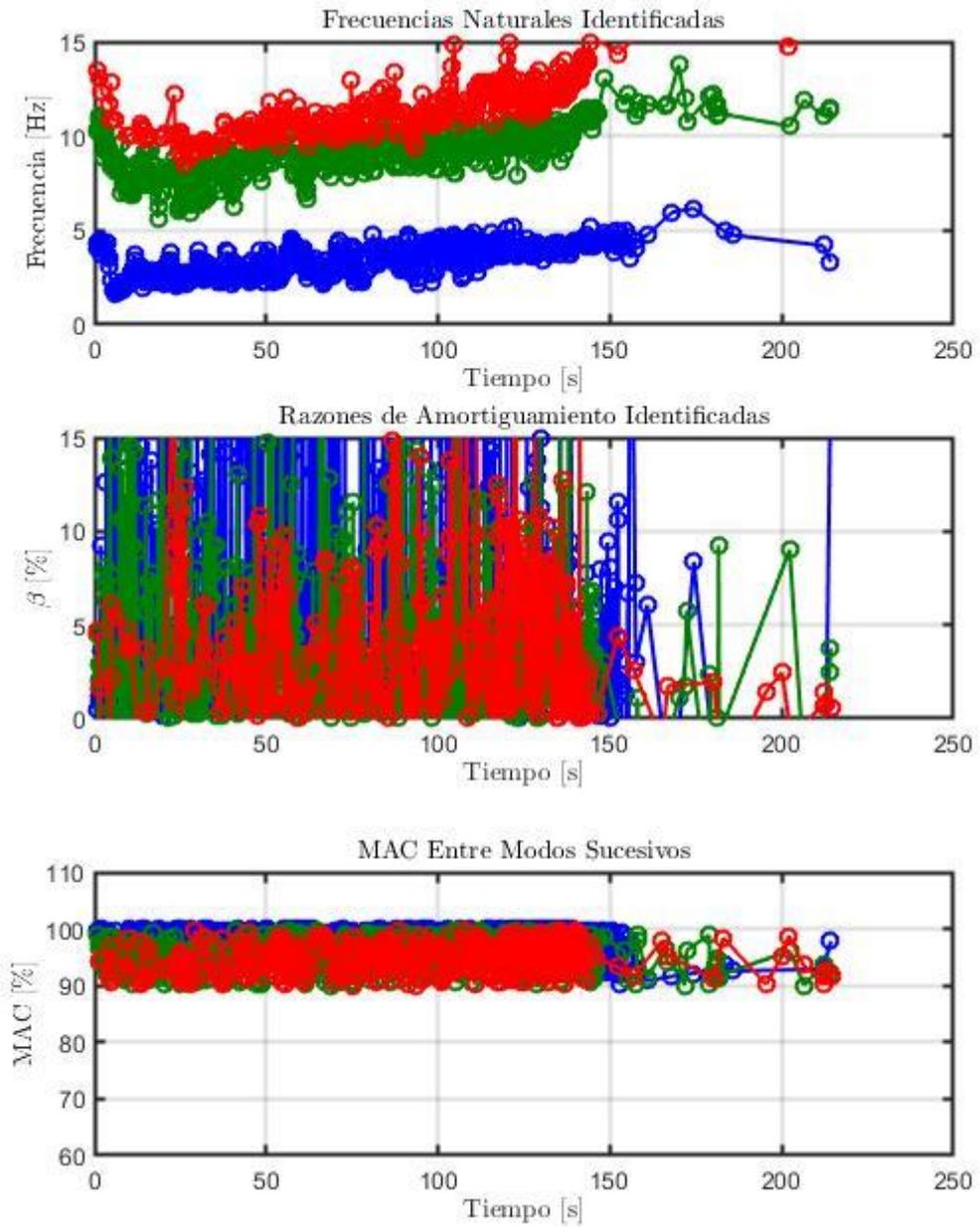


Figura 4.45. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración B2.

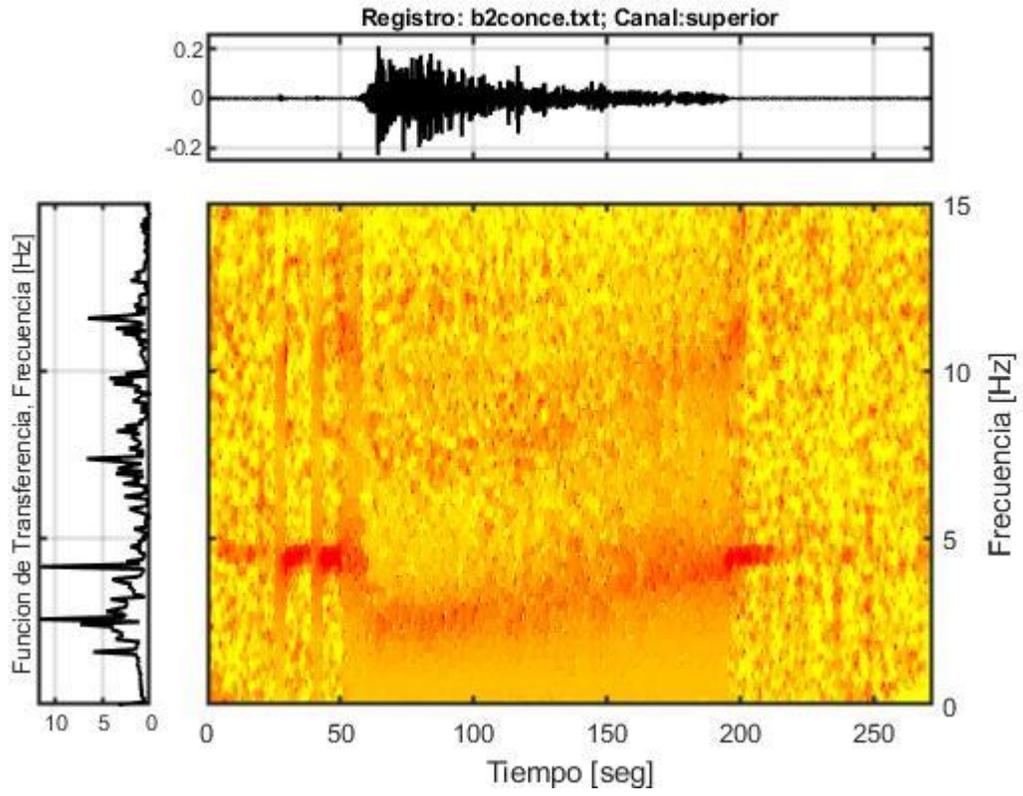


Figura 4.46. Función de Transferenciograma - Configuración B2.

4.3.2.4. Configuración C ⁴⁸

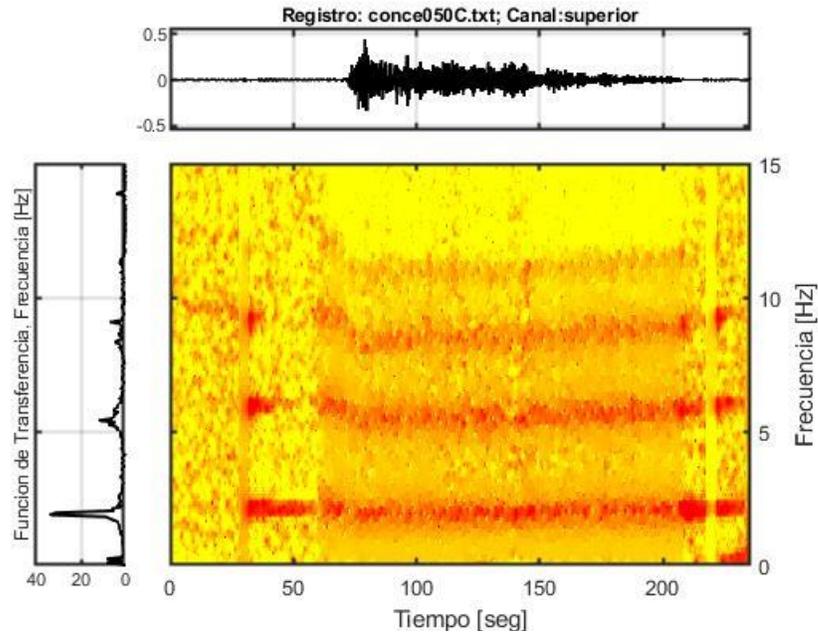


Figura 4.47. Función de Transferenciograma - Configuración C.

4.3.2.5. Configuración D ⁴⁹

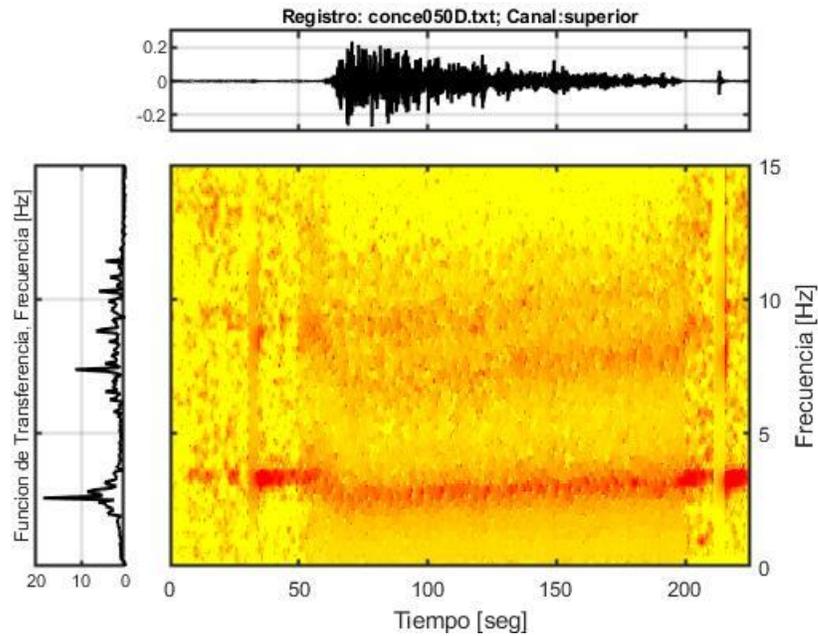


Figura 4.48. Función de Transferenciograma - Configuración D.

⁴⁸ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

⁴⁹ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

4.3.2.8. Configuración F ⁵²

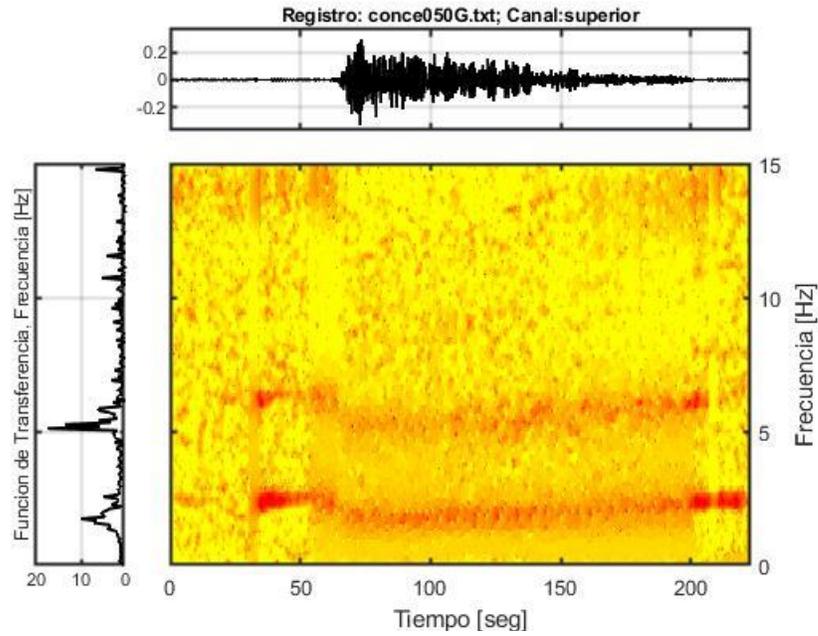


Figura 4.51. Función de Transferenciograma - Configuración F.

4.3.2.9. Configuración F2 ⁵³

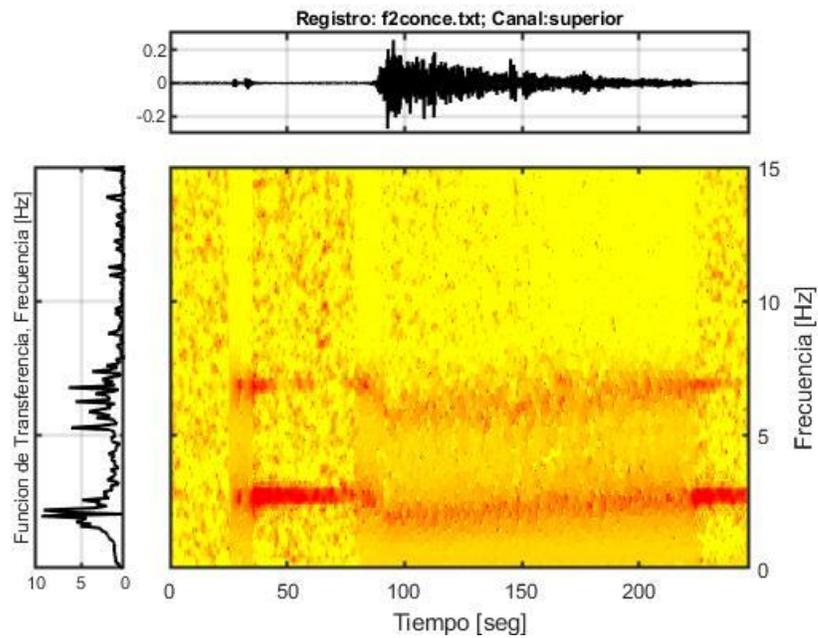


Figura 4.52. Función de Transferenciograma - Configuración F2.

⁵² Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

⁵³ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

4.3.2.10. Comentarios sobre resultados DSI para pequeñas ventanas de tiempo

Se observa la no linealidad de las configuraciones en estudio que se puede apreciar en las figuras de diagramas de estabilidad (8.4. Anexo D: Resultados mediante DSI para Pequeñas Ventanas de Tiempo), donde tanto el diagrama de estabilidad, como el espectro de potencia y el histograma identifican una banda de frecuencias, dentro de las cuales varían las frecuencias identificadas de las configuraciones en estudio. Adicionalmente, se observan que las propiedades identificadas para diversas ventanas de tiempo del registro se asocian a frecuencias distintas.

A pesar de ello, en las figuras del tipo “evolución de las propiedades dinámicas” como en las del tipo “función de transferenciograma”, se puede observar como para un modo de vibrar en particular la frecuencia de dicho modo desciende durante el momento de mayor acción sísmica para luego volver a su valor inicial a medida que la acción sísmica disminuye. Este fenómeno de que la frecuencia inicial varíe durante la acción sísmica y que la frecuencia final se reestablezca, alcanzando el mismo valor inicial, sugiere el comportamiento elástico de las configuraciones en estudio, a pesar de que se comporten de manera no lineal durante el sismo. Además, se ha de notar que al mismo tiempo en que la frecuencia de un determinado modo alcanza su valor mínimo, la tasa de amortiguamiento para ese modo alcanza su valor máximo; vale decir, existe una proporción inversa entre la evolución temporal de frecuencia y tasa de amortiguamiento. Análogamente a las propiedades anteriores, las formas modales también varían en el tiempo, aunque de forma menos significativa que las propiedades anteriores.

Por otro lado, para el caso particular de la configuración B2⁵⁴, se observa que su primer modo de vibrar, varía entre aproximadamente los 4,4 [Hz] y los 2,5 [Hz], en tanto, su tasa de amortiguamiento varía aproximadamente entre un 2% y un 11%. Desde este punto en adelante la fase previa a la acción sísmica será denominada “fase pasiva”, en tanto que la fase de mayor acción sísmica será denominada “fase activa”. Al contrastar estos resultados con los de la configuración A⁵⁵, cuyas propiedades dinámicas presentan una variabilidad mínima tal que se pueden considerar constantes. En cambio en la configuración B2 se observa una frecuencia natural del primer modo alta (4,4 [Hz]) así como una tasa de amortiguamiento relativamente baja (2%) para la fase pasiva; sin embargo, las diferencias cambian radicalmente para la fase activa, donde la frecuencia natural del primer modo

⁵⁴ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

⁵⁵ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

presenta una variación de aproximadamente un 57% (1,9 [Hz]), en tanto, la tasa de amortiguamiento aumenta en aproximadamente un 220% (2% a 11%). Estos valores sugieren la bondad del sistema de disipación de energía propuesto para la fase activa, donde este sistema de disipación aumenta levemente la frecuencia natural de la estructura respecto a la estructura base, debido al aumento en la rigidez que implica la instalación de un sistema de cables, pero a la vez conlleva un notable aumento en la tasa de amortiguamiento. Finalmente, se observa que la tasa de amortiguamiento que indica la Figura 4.40 es de aproximadamente un 2%, valor que coincide con los resultados obtenidos mediante DSI para la ventana completa de la respuesta para la configuración A. Esto indica que para bajas vibraciones la configuración A aporta un nivel de amortiguamiento similar al de la configuración A en el movimiento fuerte. Esto muestra que incluso en bajas deformaciones el sistema de disipación aporta un alto nivel de disipación, en tanto que la tasa de amortiguamiento provista por la configuración B2 siempre iguala o supera a la provista por la configuración A (Conf. A, $f_1= 1,9$ [Hz] y $\beta_1= 2\%$; Conf. B durante la fase activa, $f_1= 2,5$ [Hz] y $\beta_1= 11\%-14\%$).

Por otra parte, debido a la alta variabilidad de las frecuencias y tasas de amortiguamiento de las configuraciones (exceptuando la configuración A), tanto las tasas de amortiguamiento y el seguimiento de las propiedades asociadas a algún modo particular presentan una alta variación e incerteza cuando el método DSI por pequeñas ventanas es utilizado. En este contexto, se propone una nueva metodología descrita en el Capítulo 5, que permite tener una estimación más exacta de la evolución temporal de las tasas de amortiguamiento de cada configuración.

4.4. Corte y Desplazamientos

La representación de los resultados de corte y desplazamiento es realizada mediante gráficos de tiempo-historia y mediante gráficos de barras que representan los valores máximos de corte y desplazamiento que alcanza cada configuración estructural estudiada.

El cálculo del corte se realiza haciendo uso de la aceleración total registrada para cada nivel y multiplicándola por el peso correspondiente de dicho nivel, en tanto que para el cálculo de los drift se utilizan las aceleraciones relativas de entre piso, de tal forma que

integrando dos veces esta diferencia se obtienen los desplazamientos relativos de entre piso.

En los gráficos tiempo-historia se presenta la evolución temporal del corte y del desplazamiento relativo de entre piso cuando la configuración en estudio es sometida a la acción sísmica del registro de Concepción centro 27F escalado al 50%; en tanto, los gráficos del tipo barra presentan los valores máximos de corte y desplazamiento relativo de entre piso alcanzado por la configuración durante el evento sísmico.

Finalmente, en el apartado 4.4.10. **Comparación entre Configuraciones** se presentan gráficos comparativos de los valores máximos alcanzados, de corte y desplazamiento relativo de entre piso, por cada configuración, así como comentarios de los resultados obtenidos para corte y desplazamiento relativo de entre piso.

4.4.1. Configuración A ⁵⁶

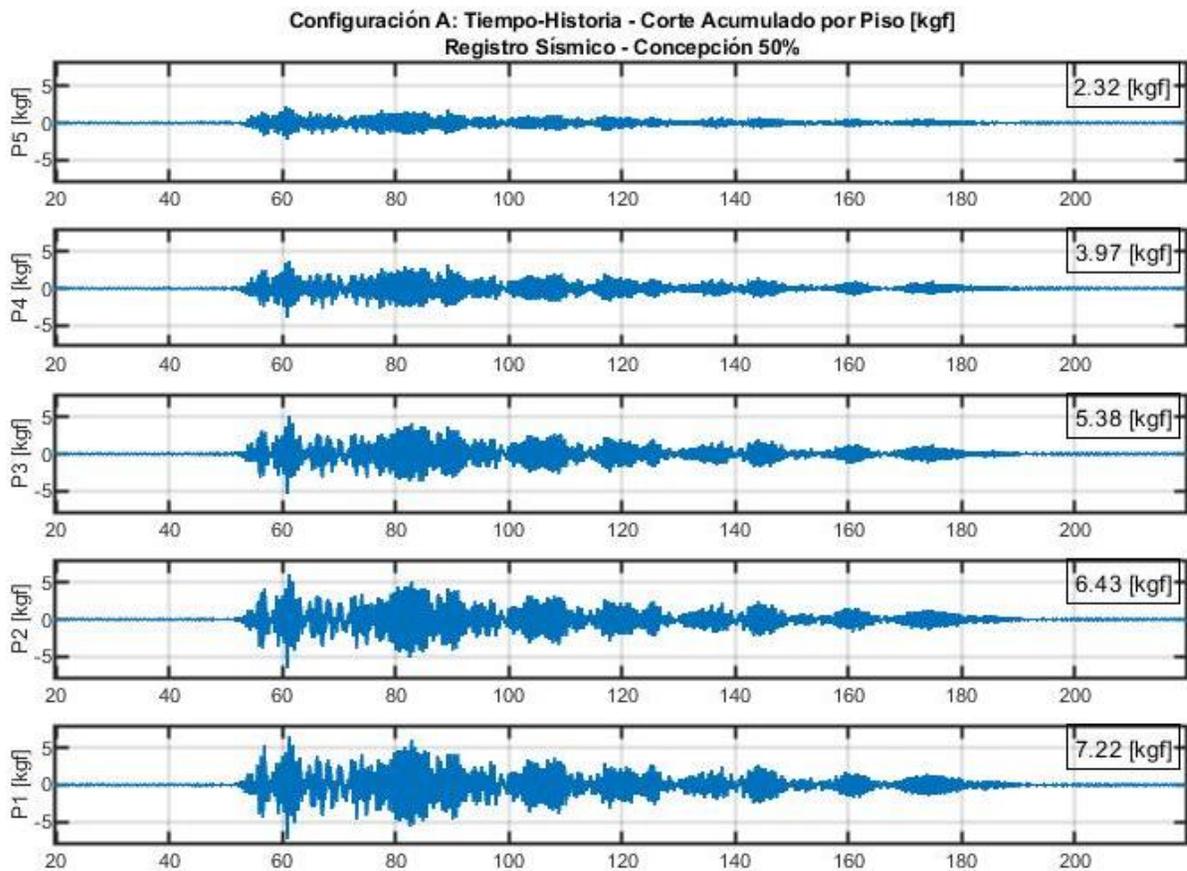


Figura 4.53. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración A.

⁵⁶ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

Configuración A: Máximo Corte Acumulado por Piso [kgf]
Registro Sísmico - Concepción 50%

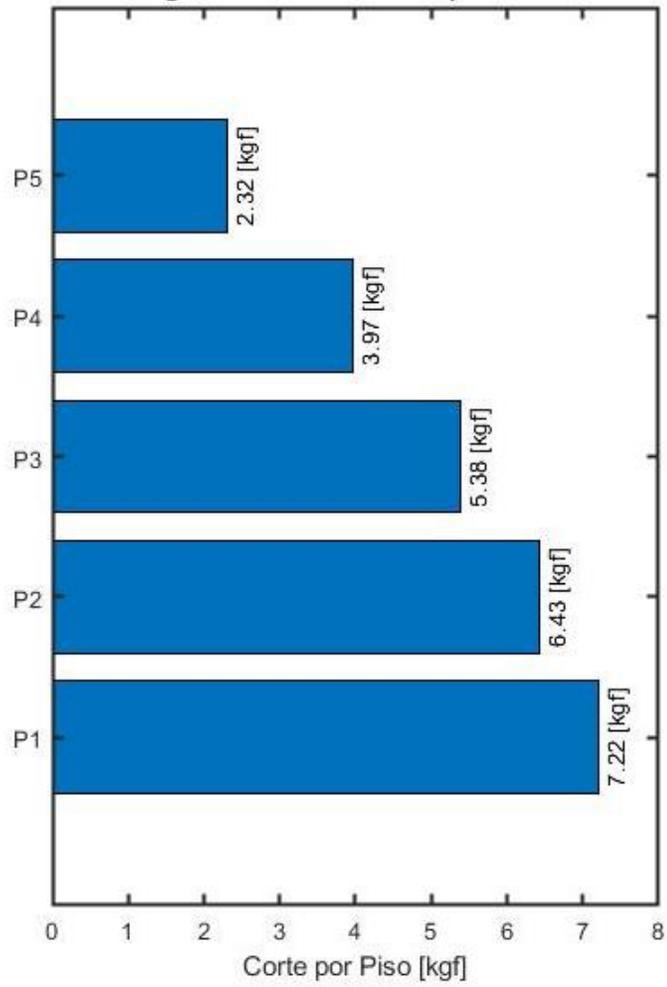


Figura 4.54. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración A.

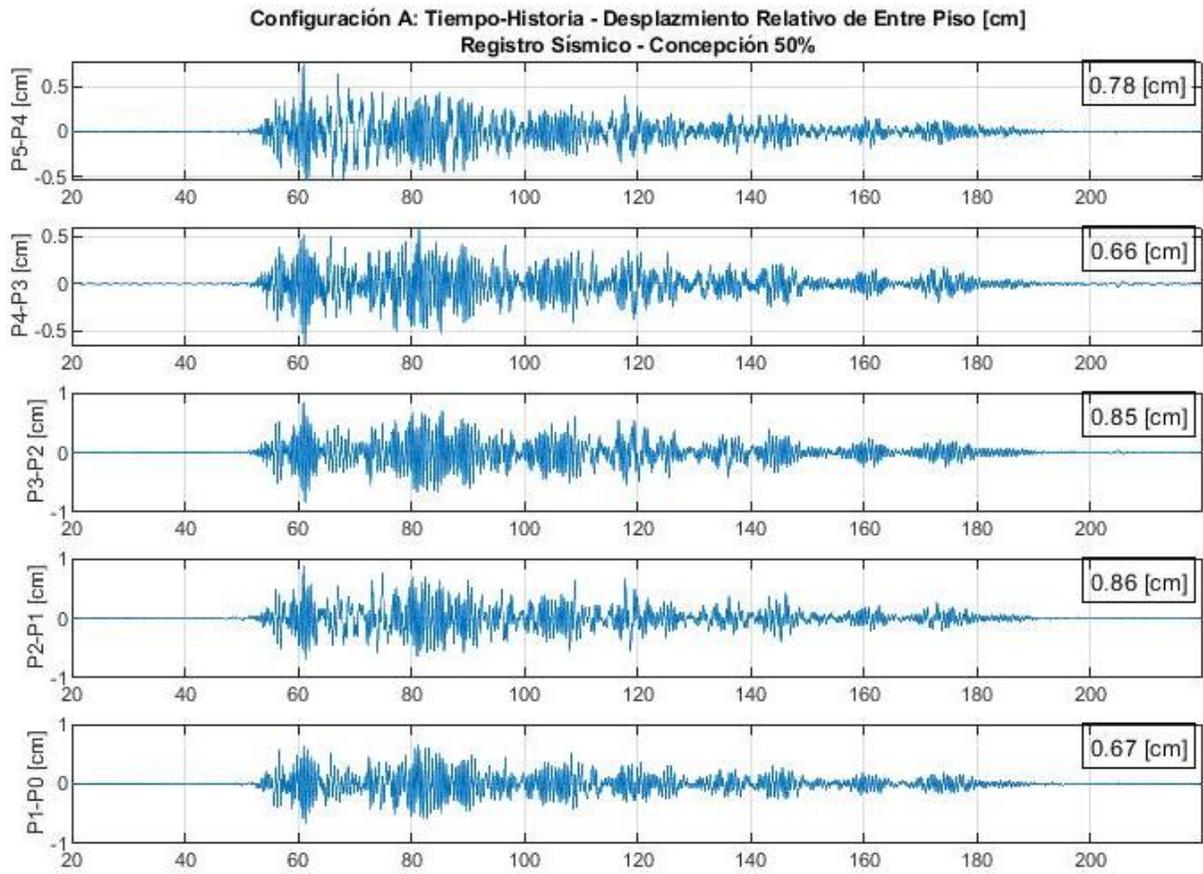


Figura 4.55. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración A.

**Configuración A: Desplazamiento Máximo Relativo de Entre Piso[cm]
Registro Sísmico - Concepción 50%**

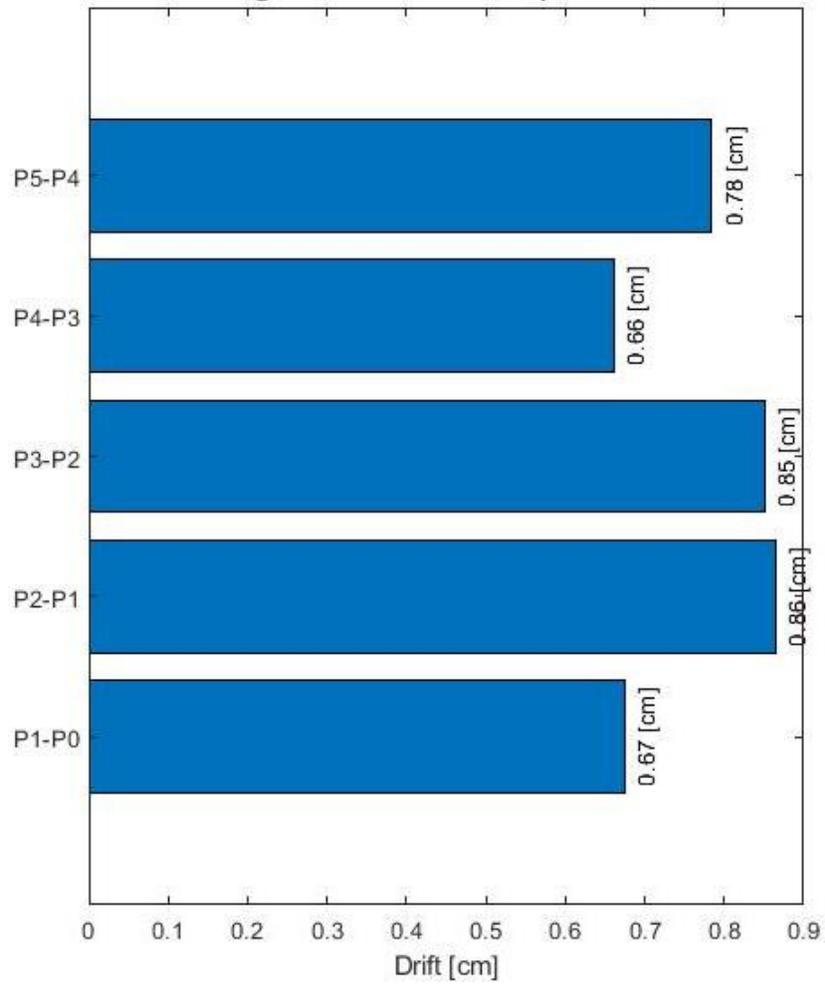


Figura 4.56. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración A.

4.4.2. Configuración B ⁵⁷

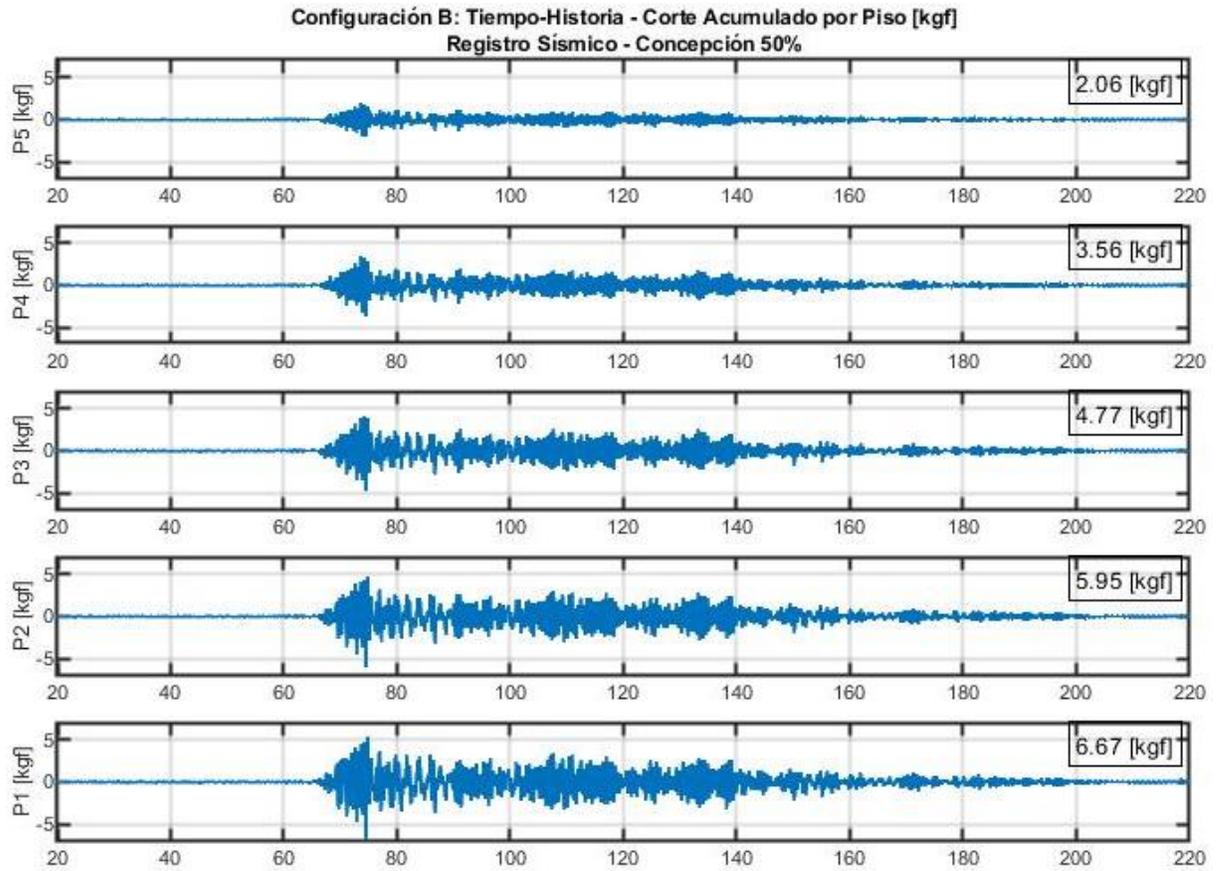


Figura 4.57. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración B.

⁵⁷ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

Configuración B: Máximo Corte Acumulado por Piso [kgf]
Registro Sísmico - Concepción 50%

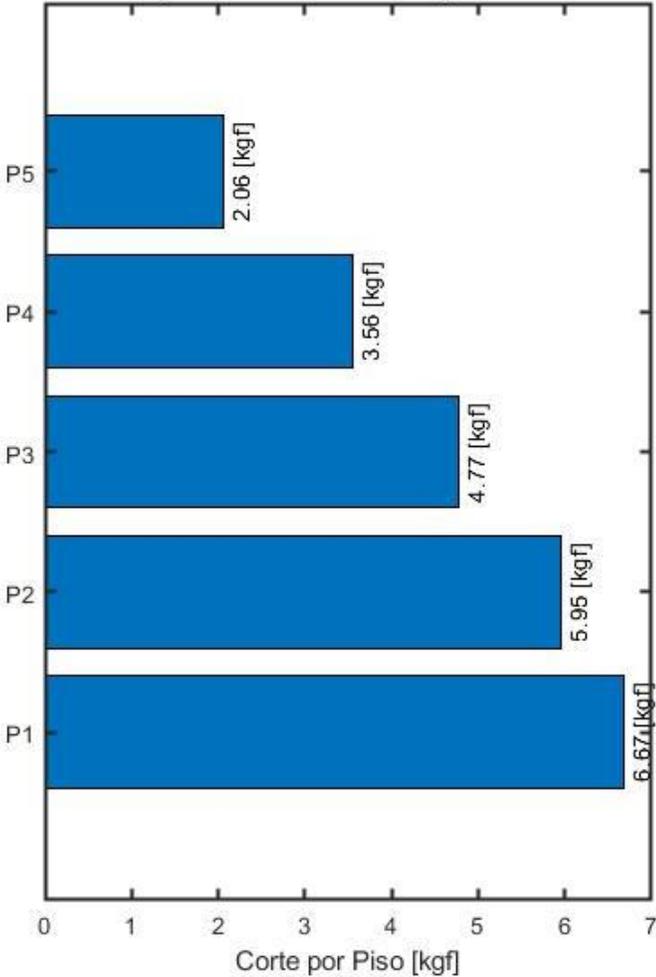


Figura 4.58. Corte Máximo por Piso - Configuración B.

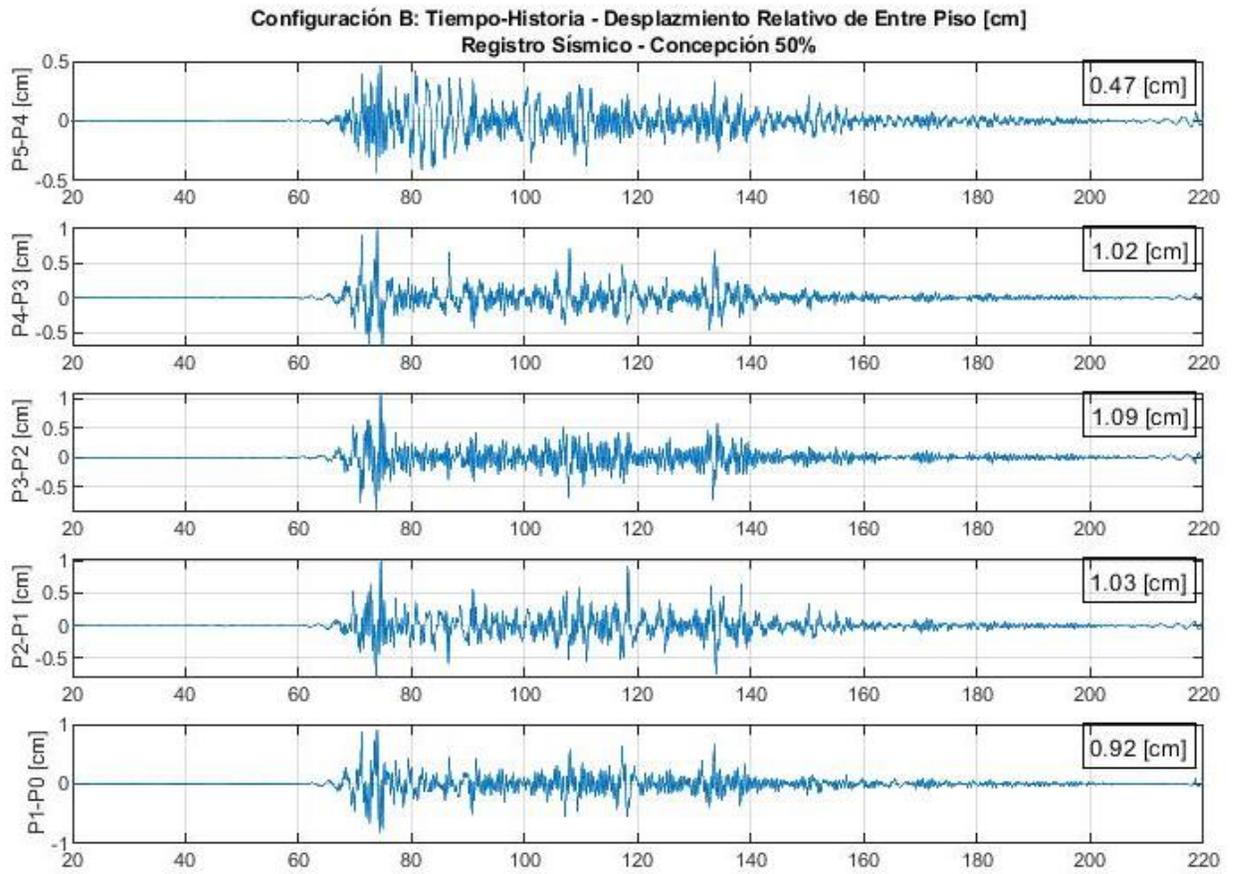


Figura 4.59. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración B.

**Configuración B: Desplazamiento Máximo Relativo de Entre Piso[cm]
Registro Sísmico - Concepción 50%**

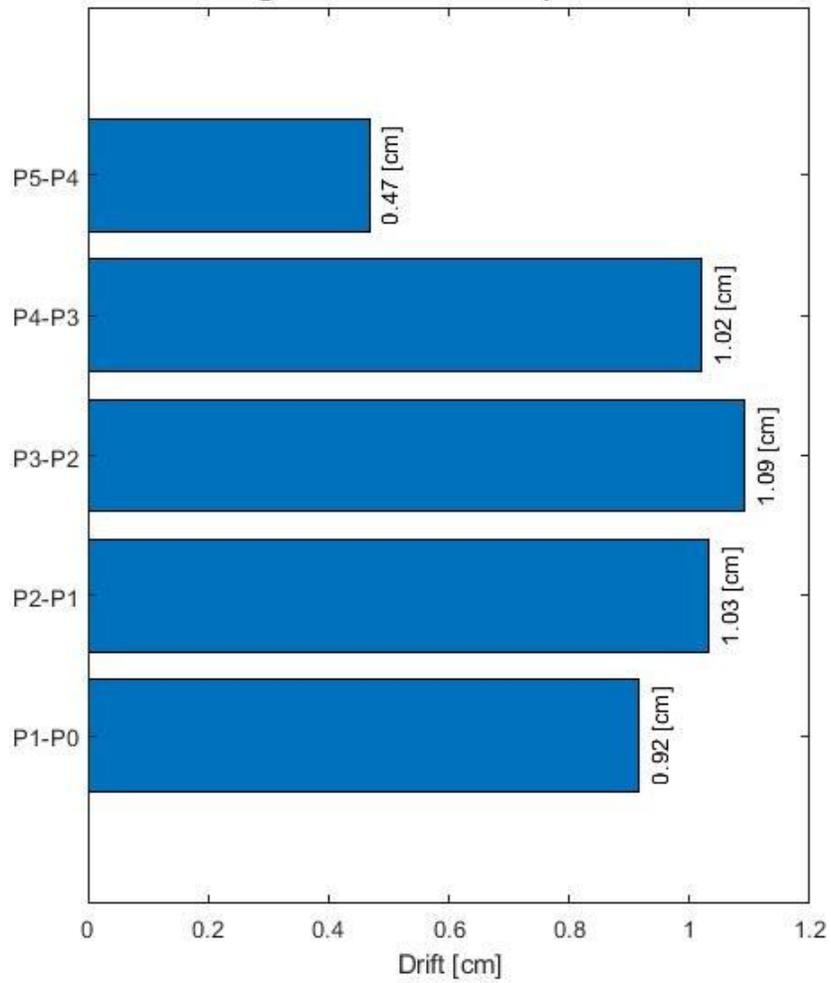


Figura 4.60. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración B.

4.4.3. Configuración B2 ⁵⁸

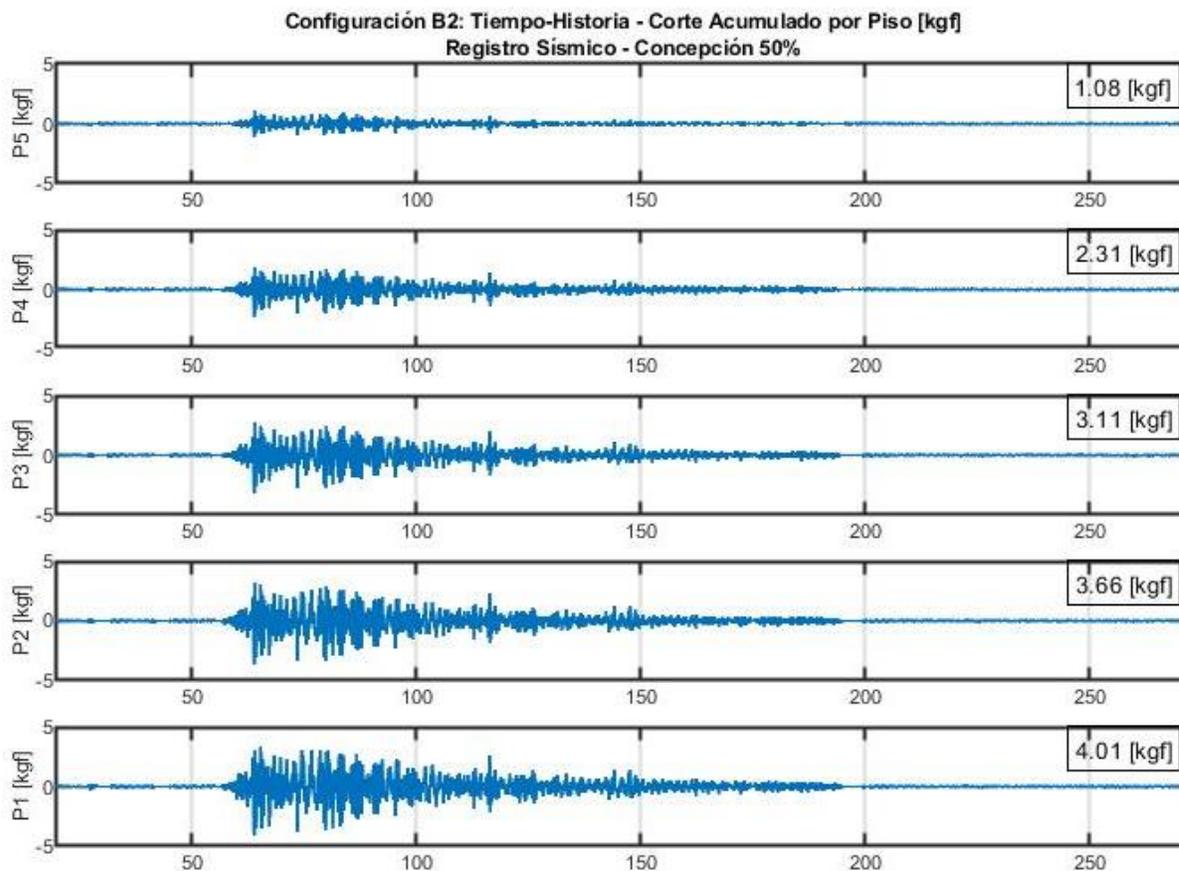


Figura 4.61. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración B2.

⁵⁸ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

Configuración B2: Máximo Corte Acumulado por Piso [kgf]
Registro Sísmico - Concepción 50%

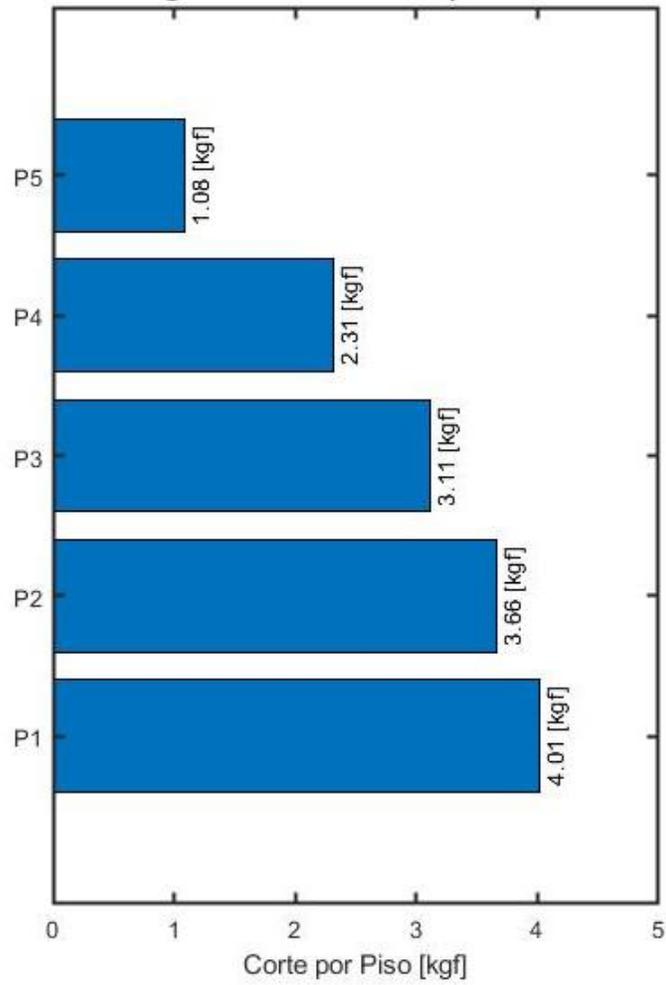


Figura 4.62. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración B2.

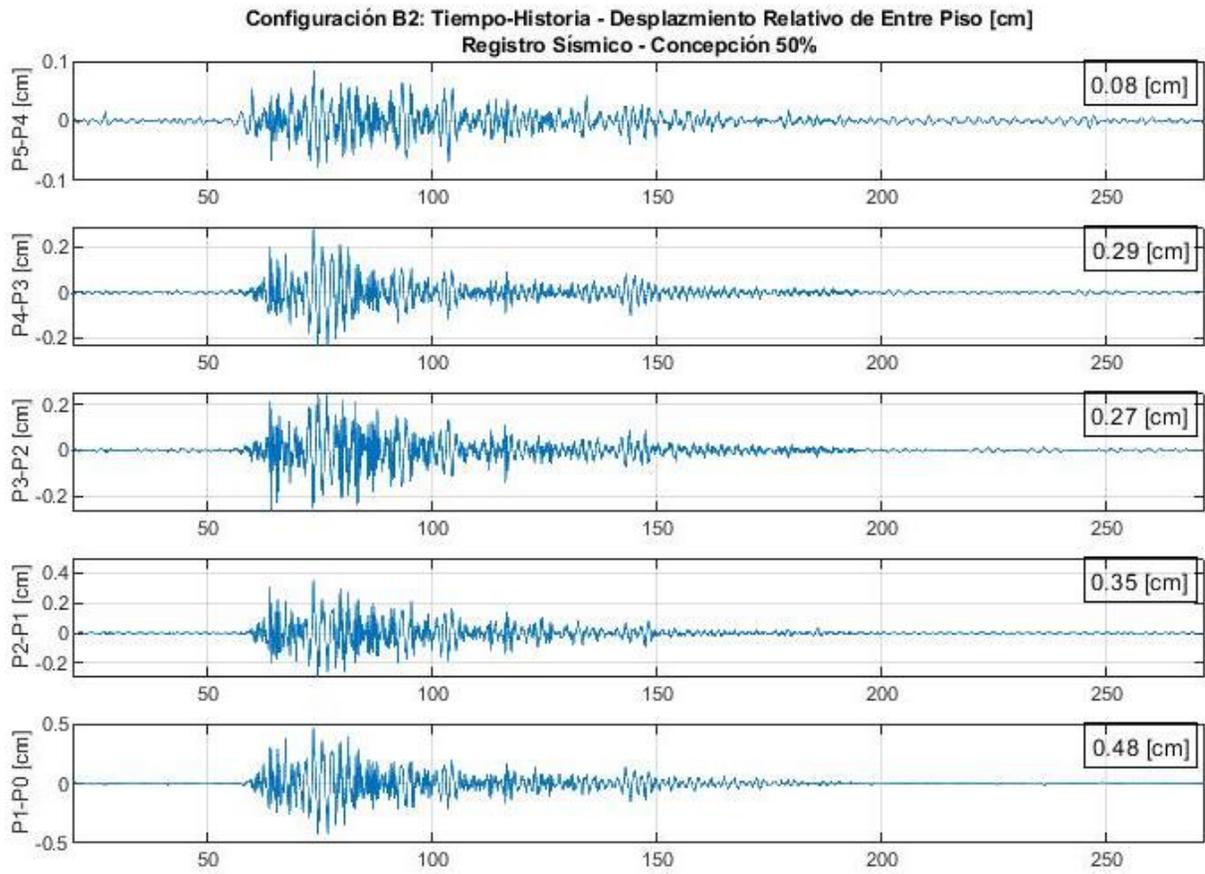


Figura 4.63. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración B2.

**Configuración B2: Desplazamiento Máximo Relativo de Entre Piso[cm]
Registro Sísmico - Concepción 50%**

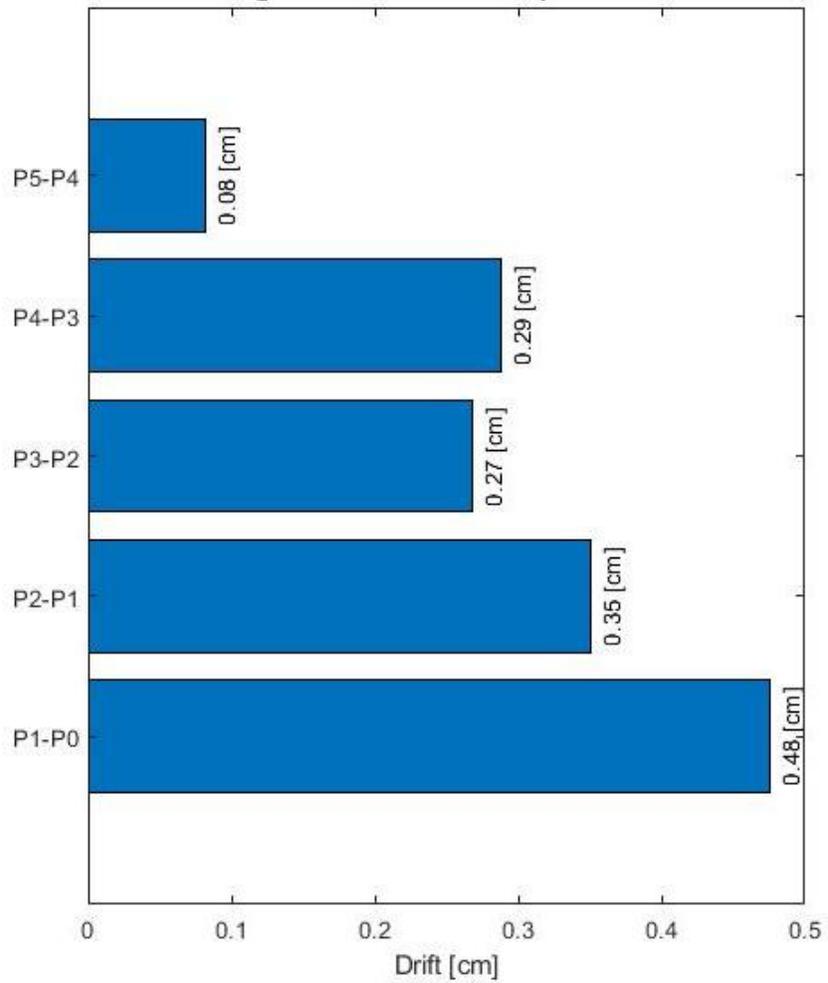


Figura 4.64. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración B2.

4.4.4. Configuración C⁵⁹

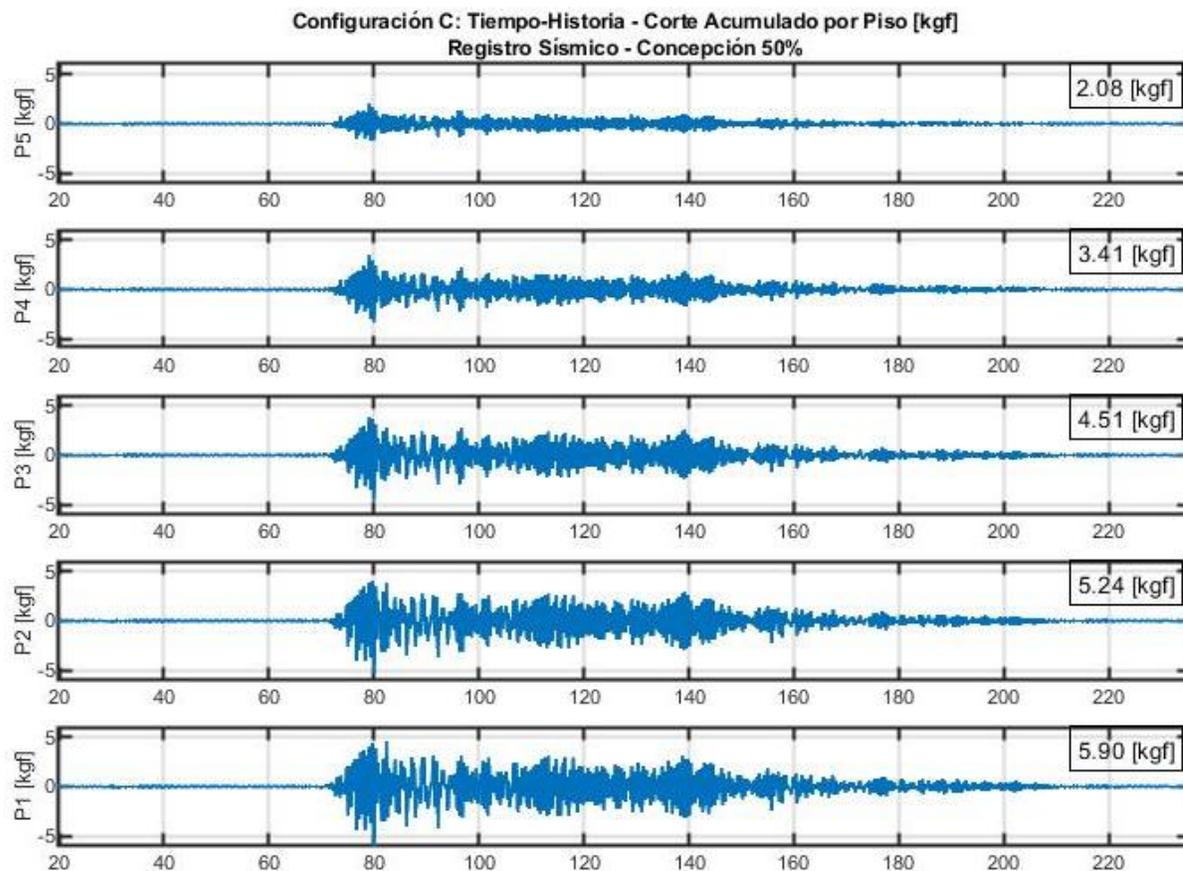


Figura 4.65. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración C.

⁵⁹ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

Configuración C: Máximo Corte Acumulado por Piso [kgf]
Registro Sísmico - Concepción 50%

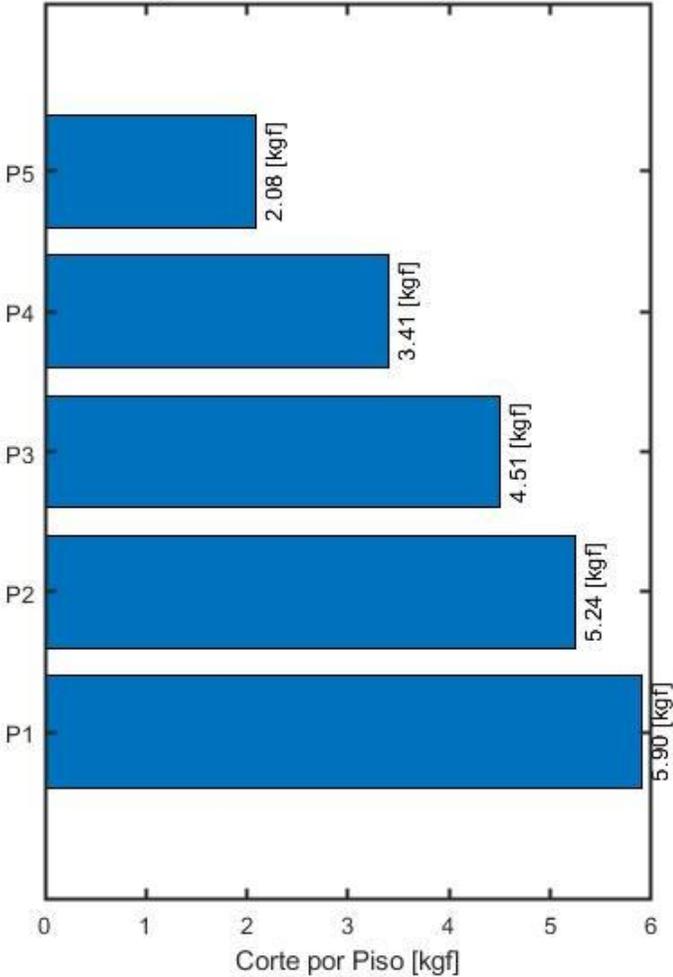


Figura 4.66. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración C.

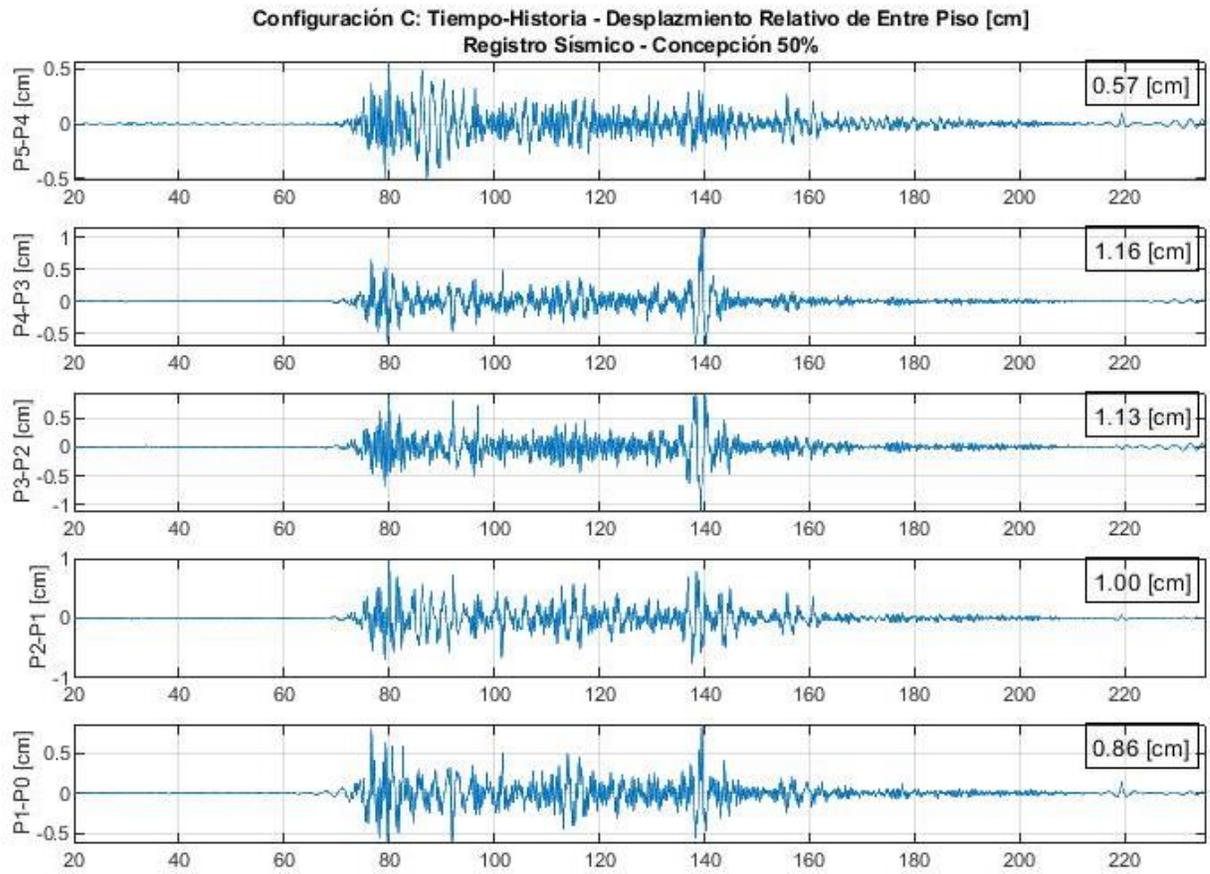


Figura 4.67. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración C.

**Configuración C: Desplazamiento Máximo Relativo de Entre Piso[cm]
Registro Sísmico - Concepción 50%**

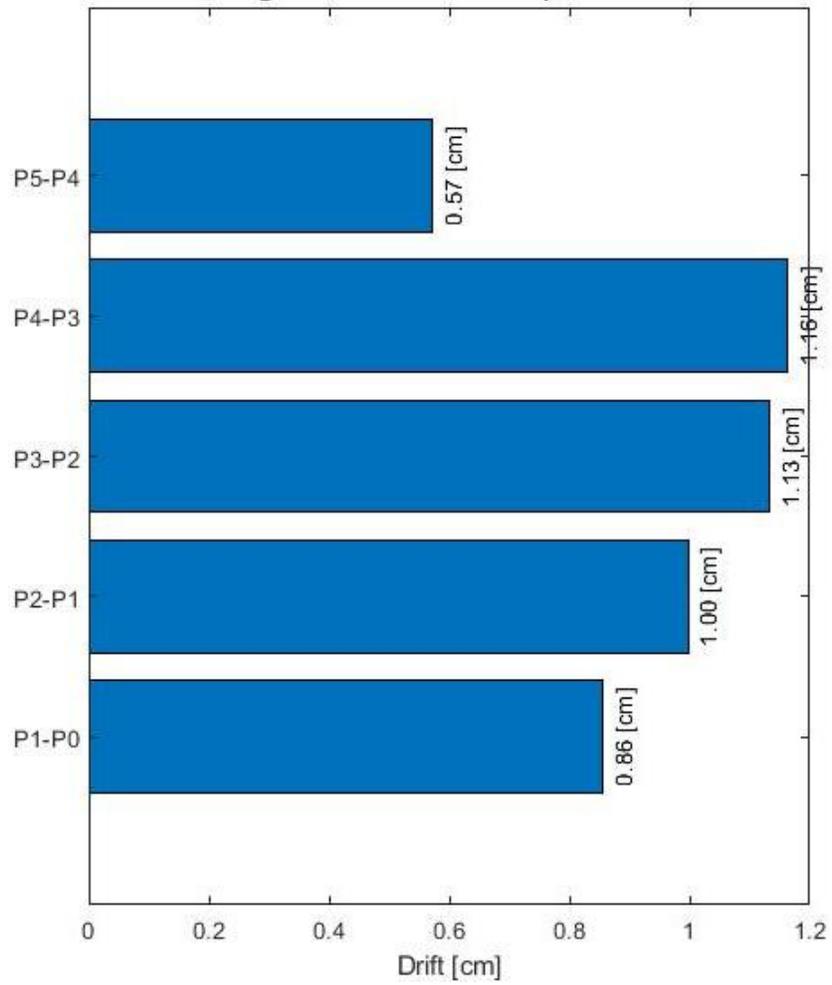


Figura 4.68. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración C.

4.4.5. Configuración D ⁶⁰

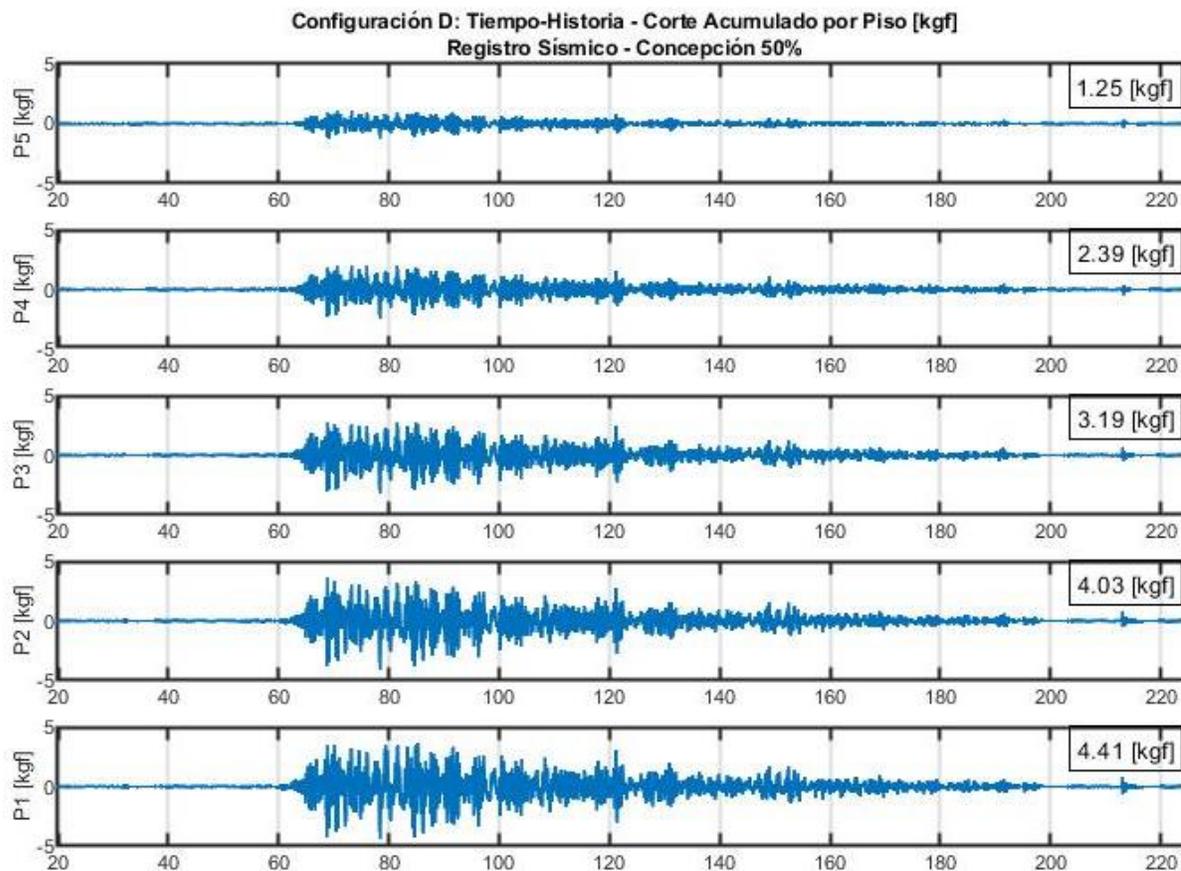


Figura 4.69. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración D.

⁶⁰ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

Configuración D: Máximo Corte Acumulado por Piso [kgf]
Registro Sísmico - Concepción 50%

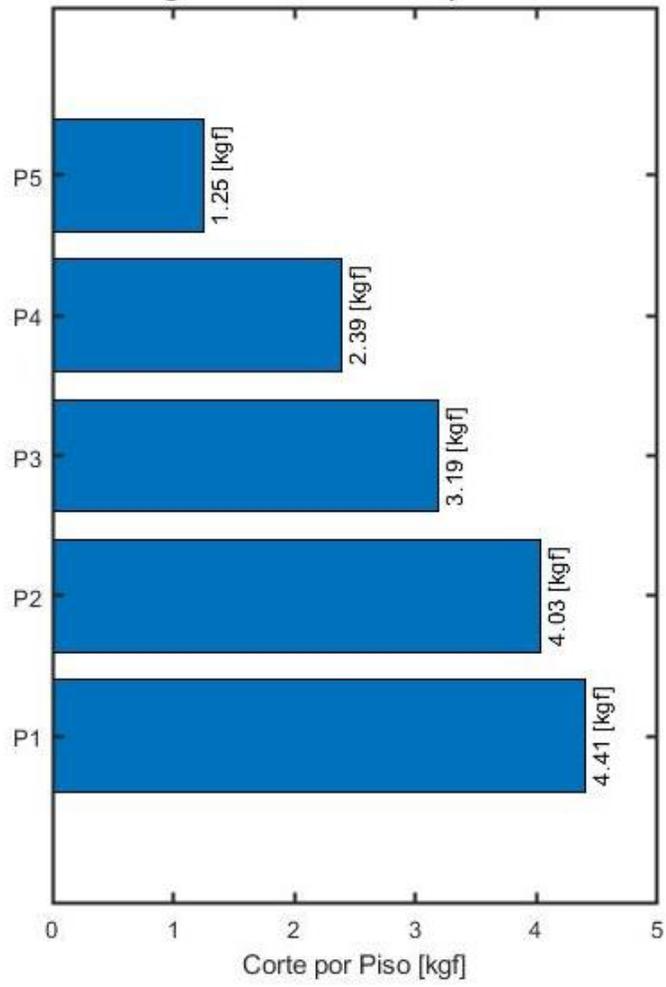


Figura 4.70. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración D.

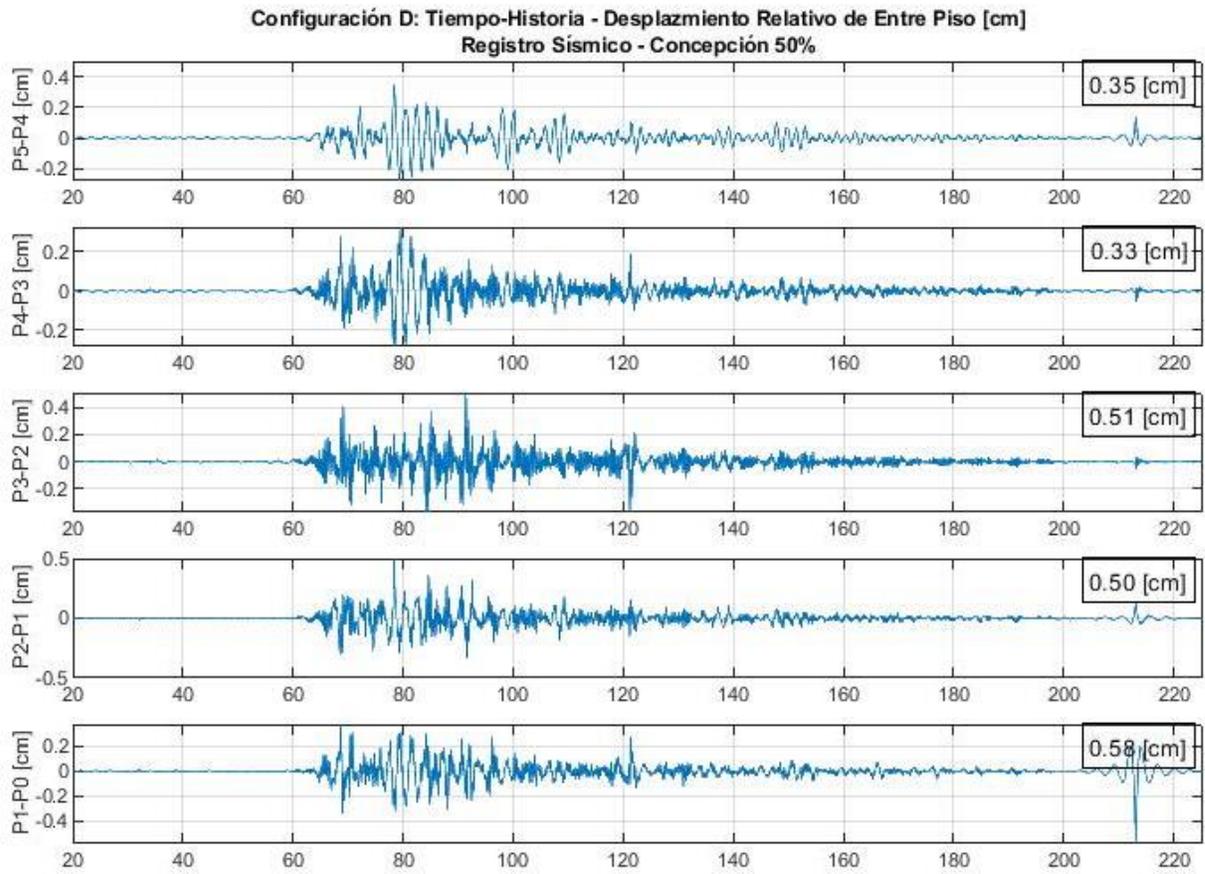


Figura 4.71. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración D.

**Configuración D: Desplazamiento Máximo Relativo de Entre Piso[cm]
Registro Sísmico - Concepción 50%**

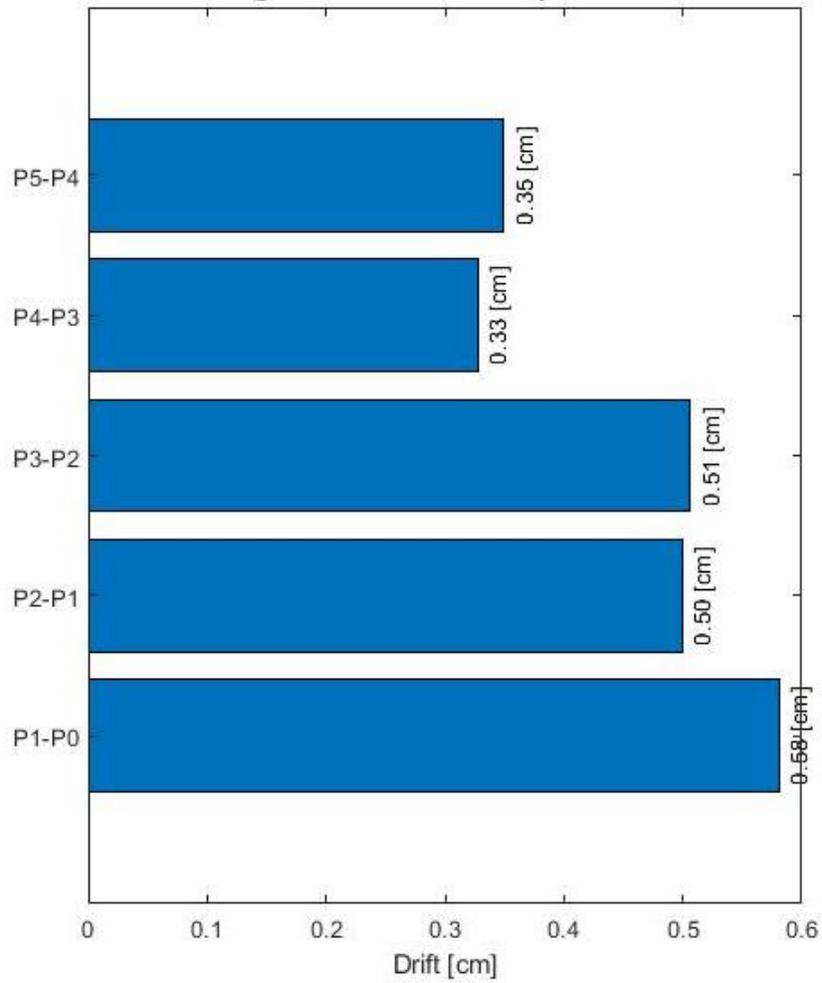


Figura 4.72. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración D.

4.4.6. Configuración E ⁶¹

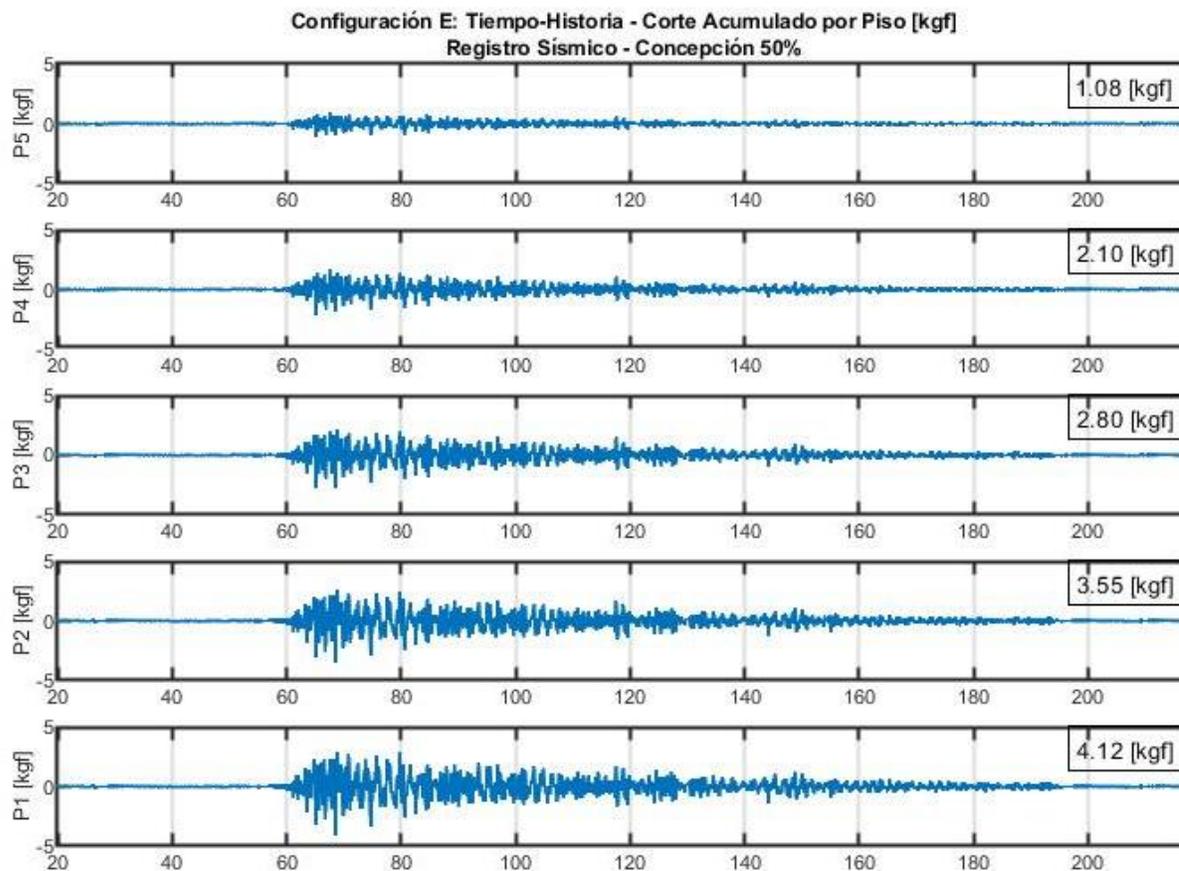


Figura 4.73. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración E.

⁶¹ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

Configuración E: Máximo Corte Acumulado por Piso [kgf]
Registro Sísmico - Concepción 50%

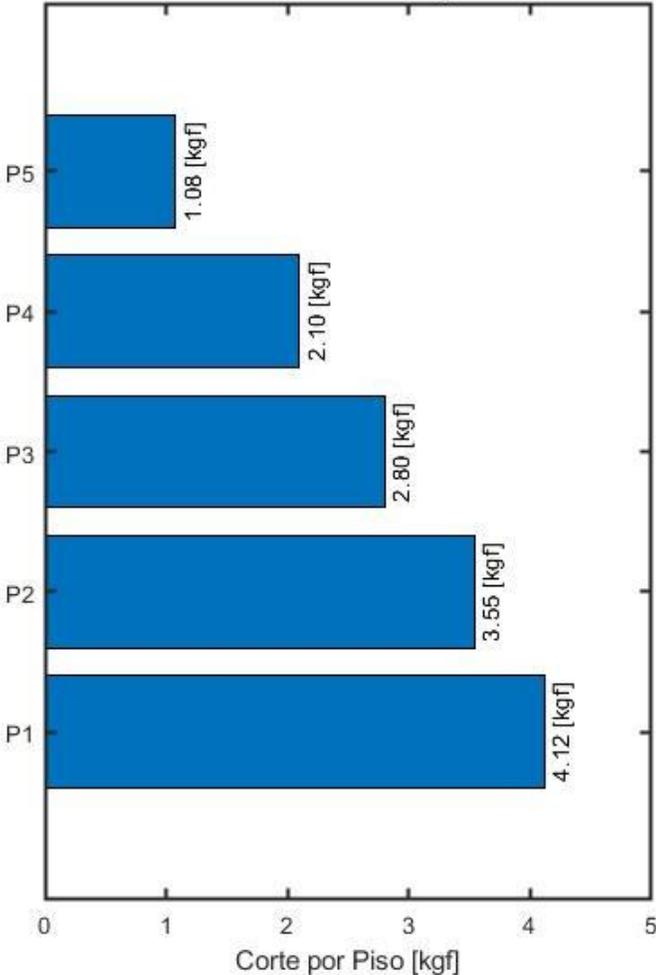


Figura 4.74. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración E.

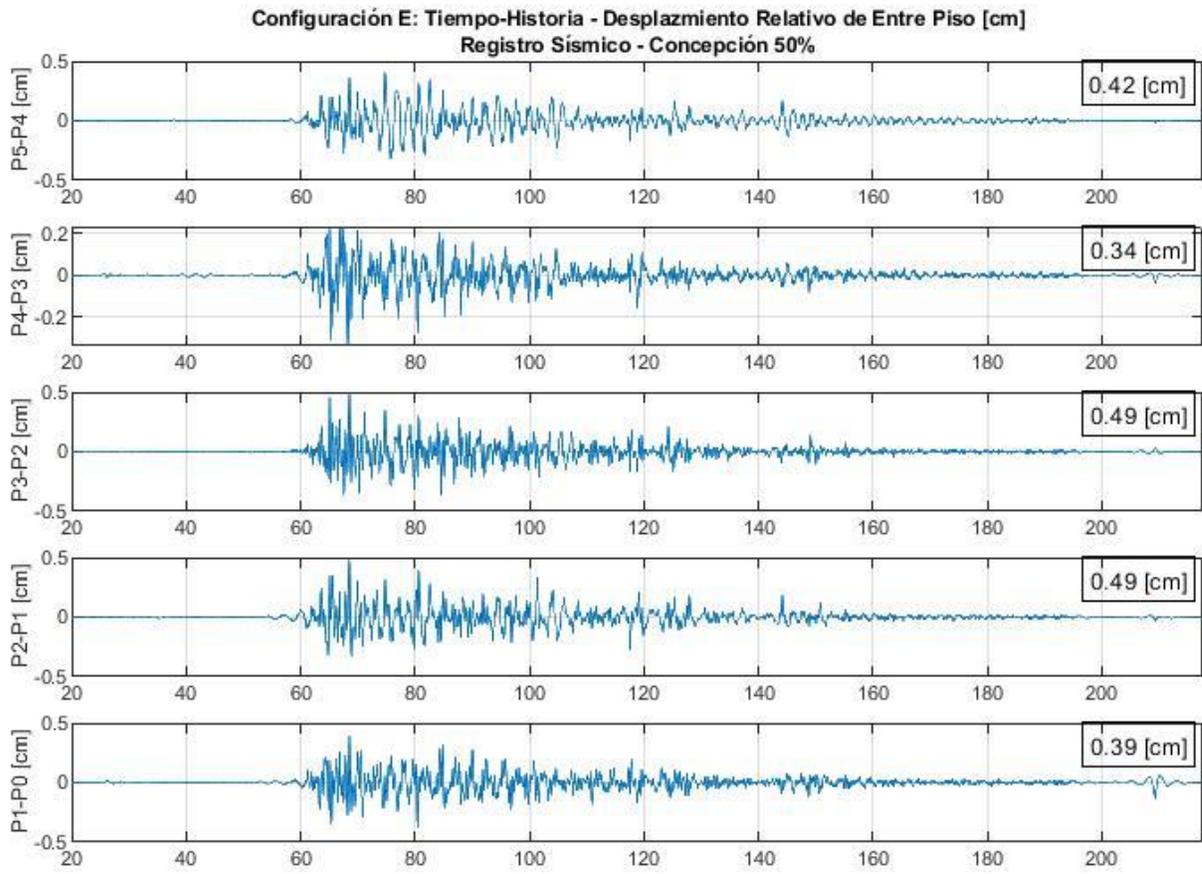


Figura 4.75. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración E.

**Configuración E: Desplazamiento Máximo Relativo de Entre Piso[cm]
Registro Sísmico - Concepción 50%**

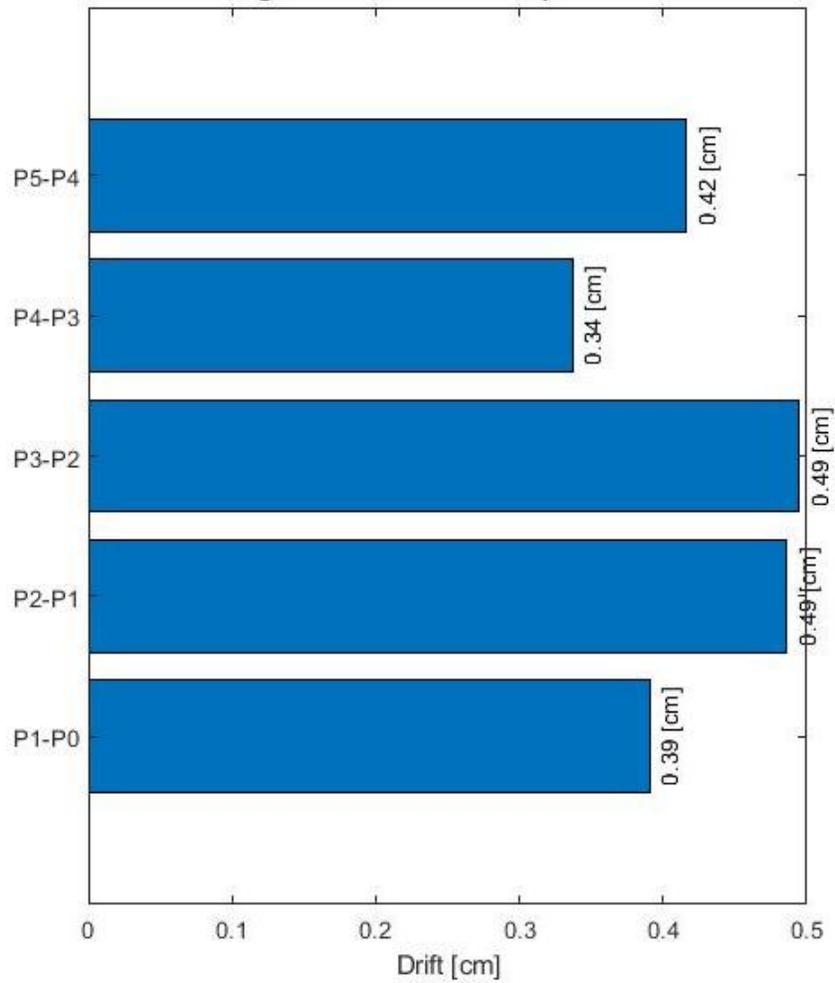


Figura 4.76. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración E.

4.4.7. Configuración E2 ⁶²

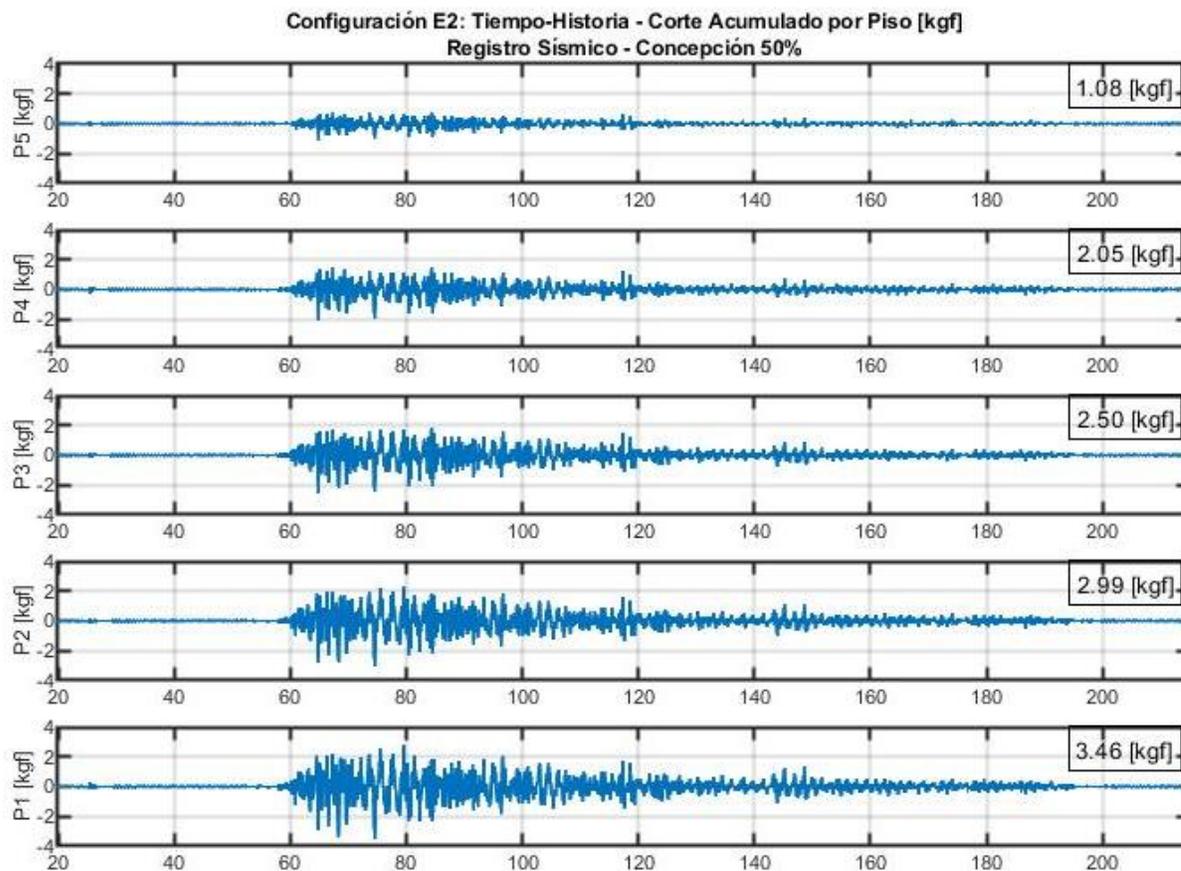


Figura 4.77. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración E2.

⁶² Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

Configuración E2: Máximo Corte Acumulado por Piso [kgf]
Registro Sísmico - Concepción 50%

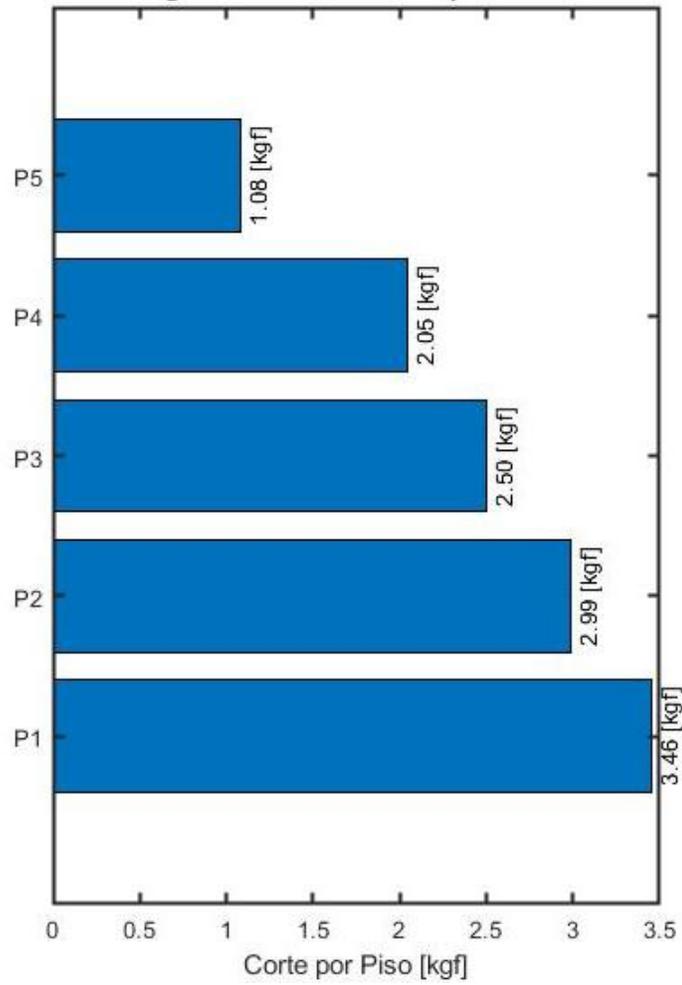


Figura 4.78. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración E2.

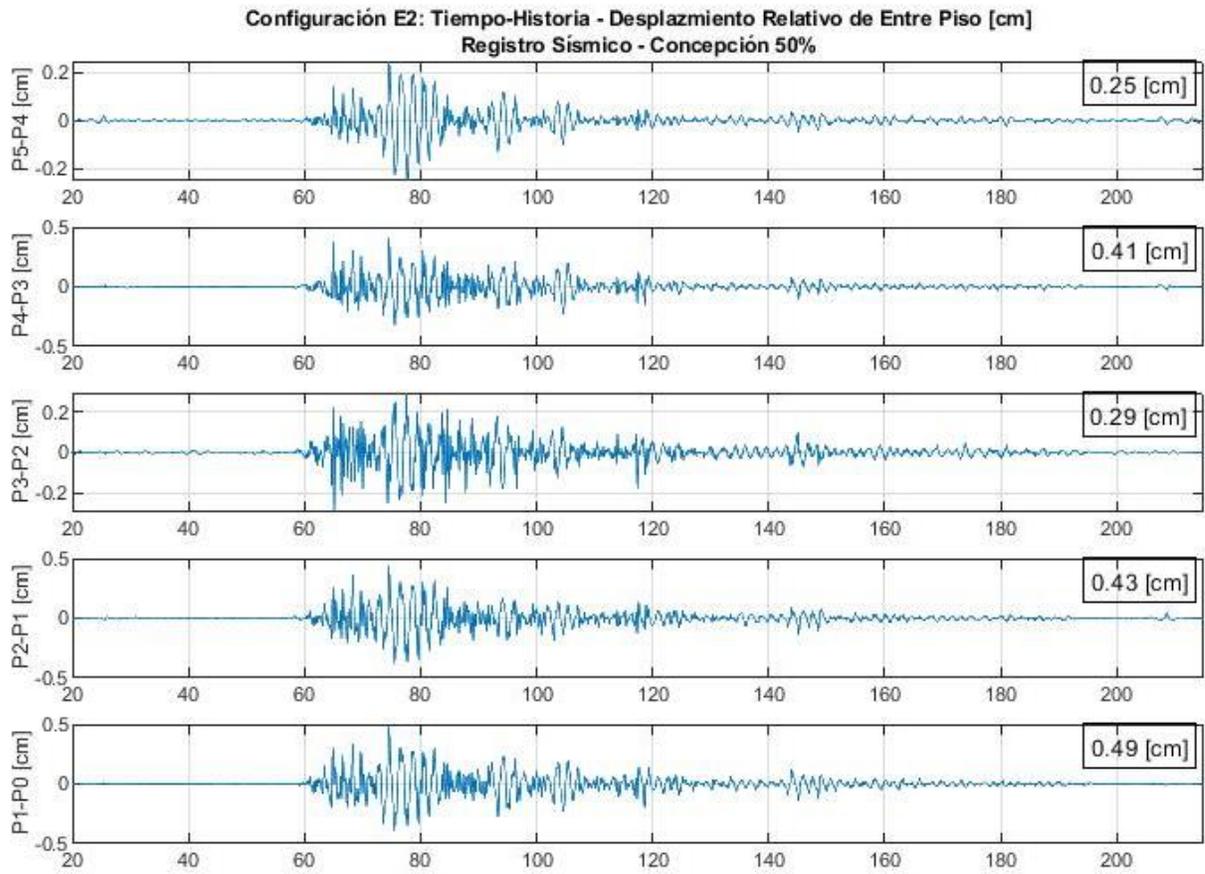


Figura 4.79. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración E2.

**Configuración E2: Desplazamiento Máximo Relativo de Entre Piso[cm]
Registro Sísmico - Concepción 50%**

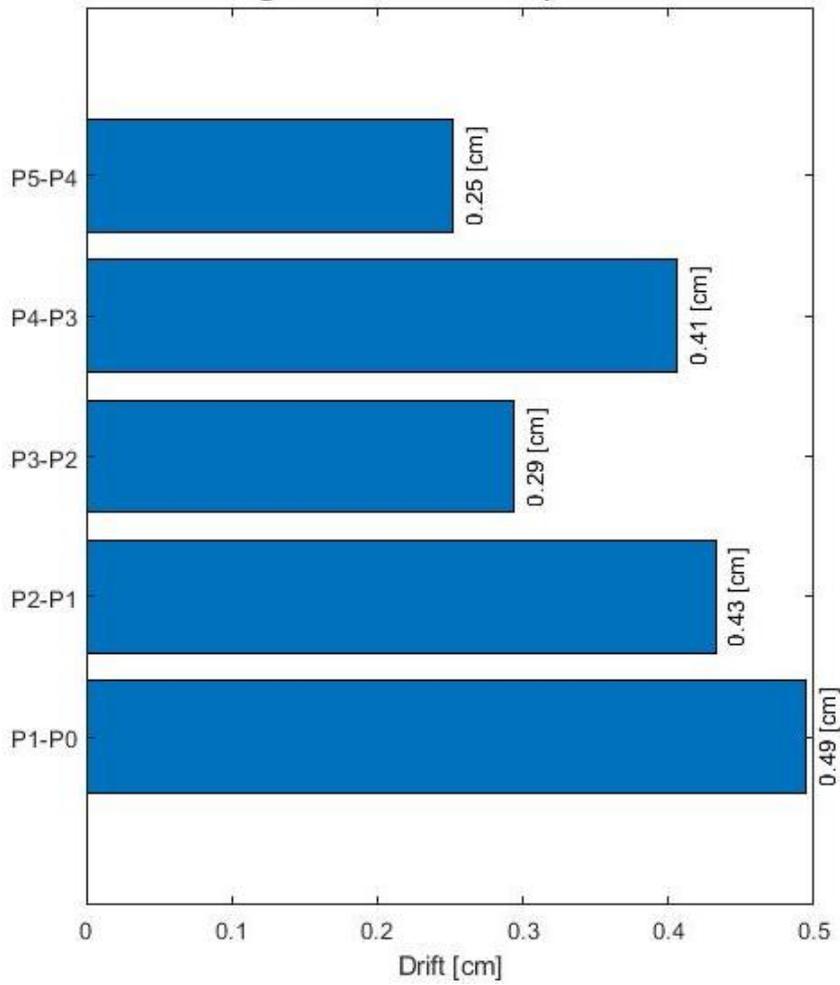


Figura 4.80. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración E2.

4.4.8. Configuración F ⁶³

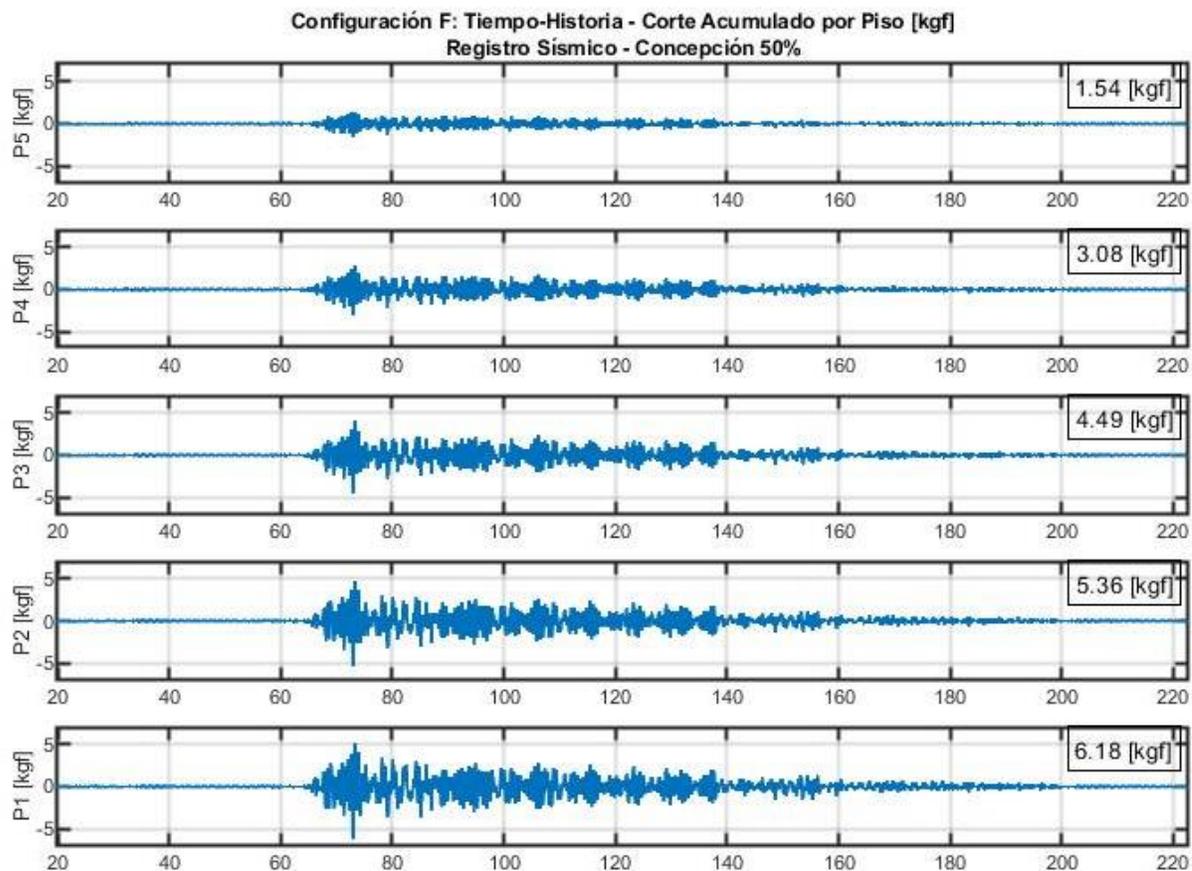


Figura 4.81. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración F.

⁶³ Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

Configuración F: Máximo Corte Acumulado por Piso [kgf]
Registro Sísmico - Concepción 50%

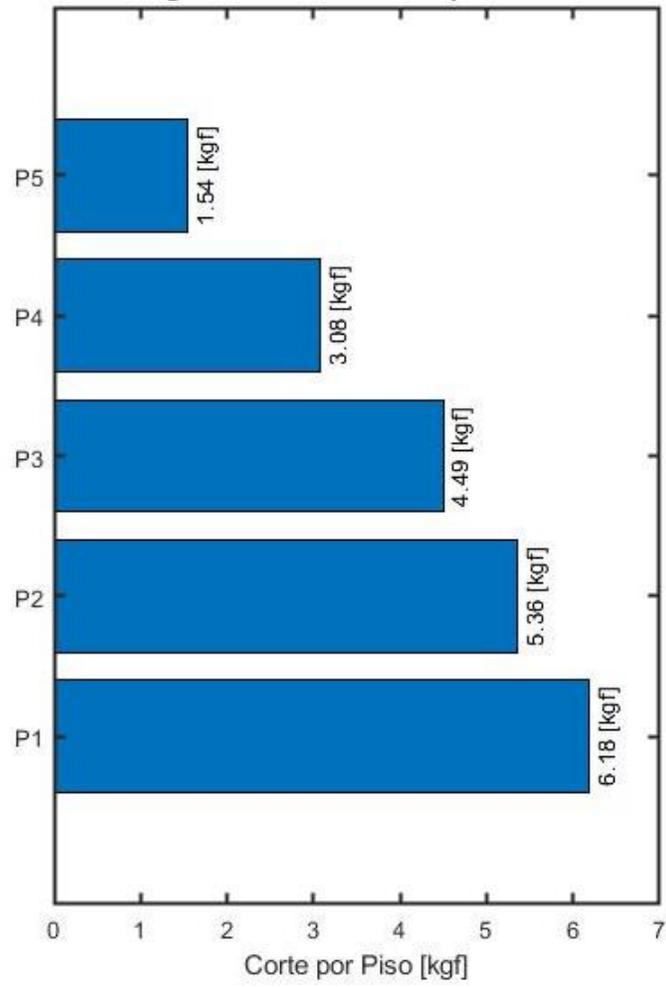


Figura 4.82. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración F.

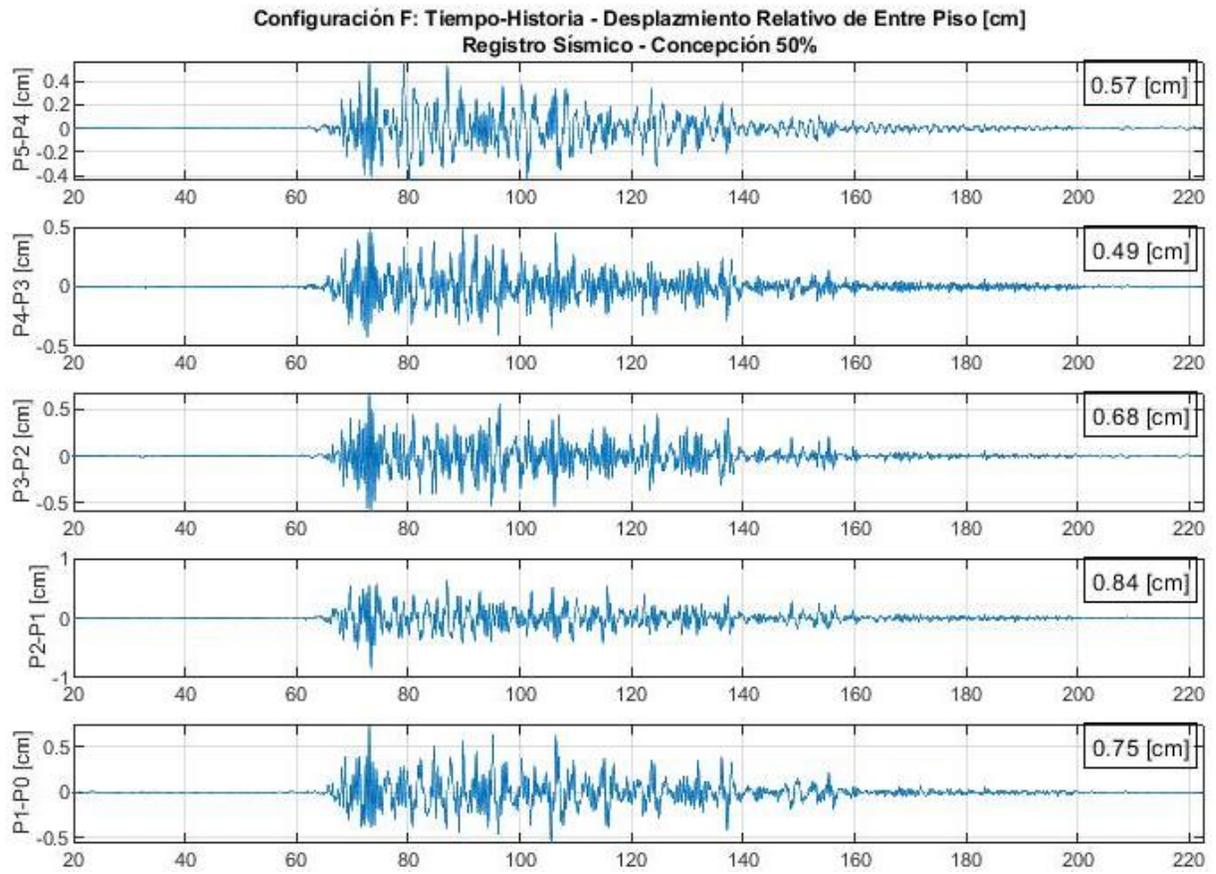


Figura 4.83. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración F.

**Configuración F: Desplazamiento Máximo Relativo de Entre Piso[cm]
Registro Sísmico - Concepción 50%**

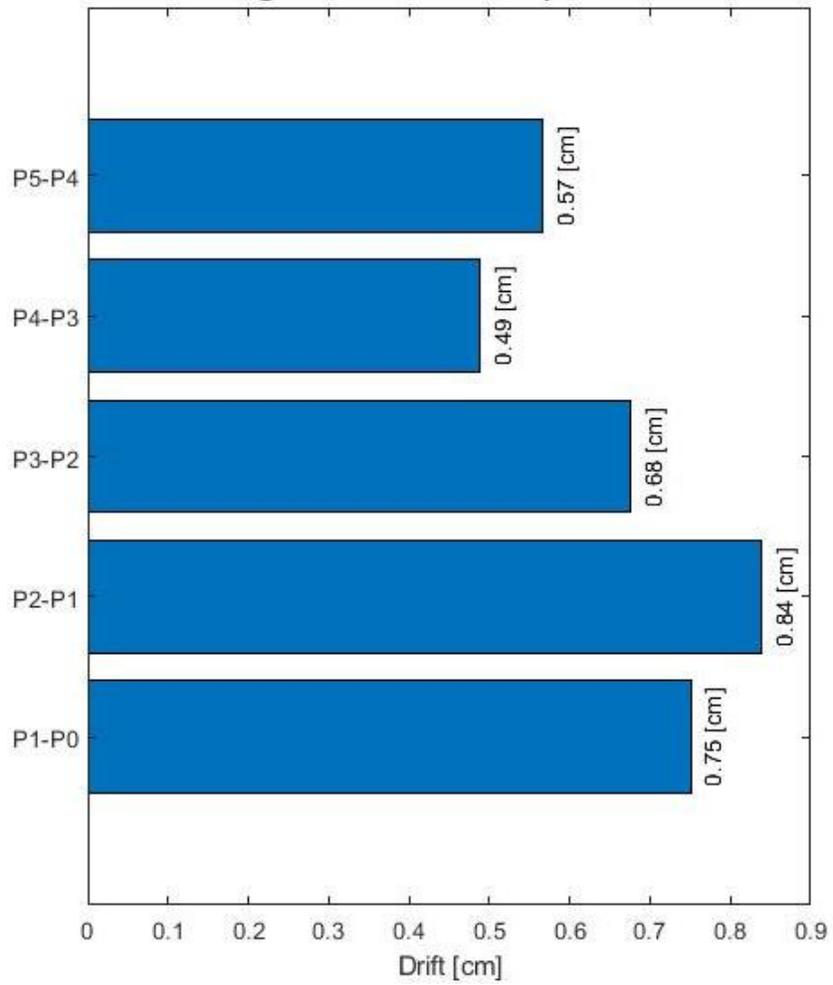


Figura 4.84. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración F.

4.4.9. Configuración F2 ⁶⁴

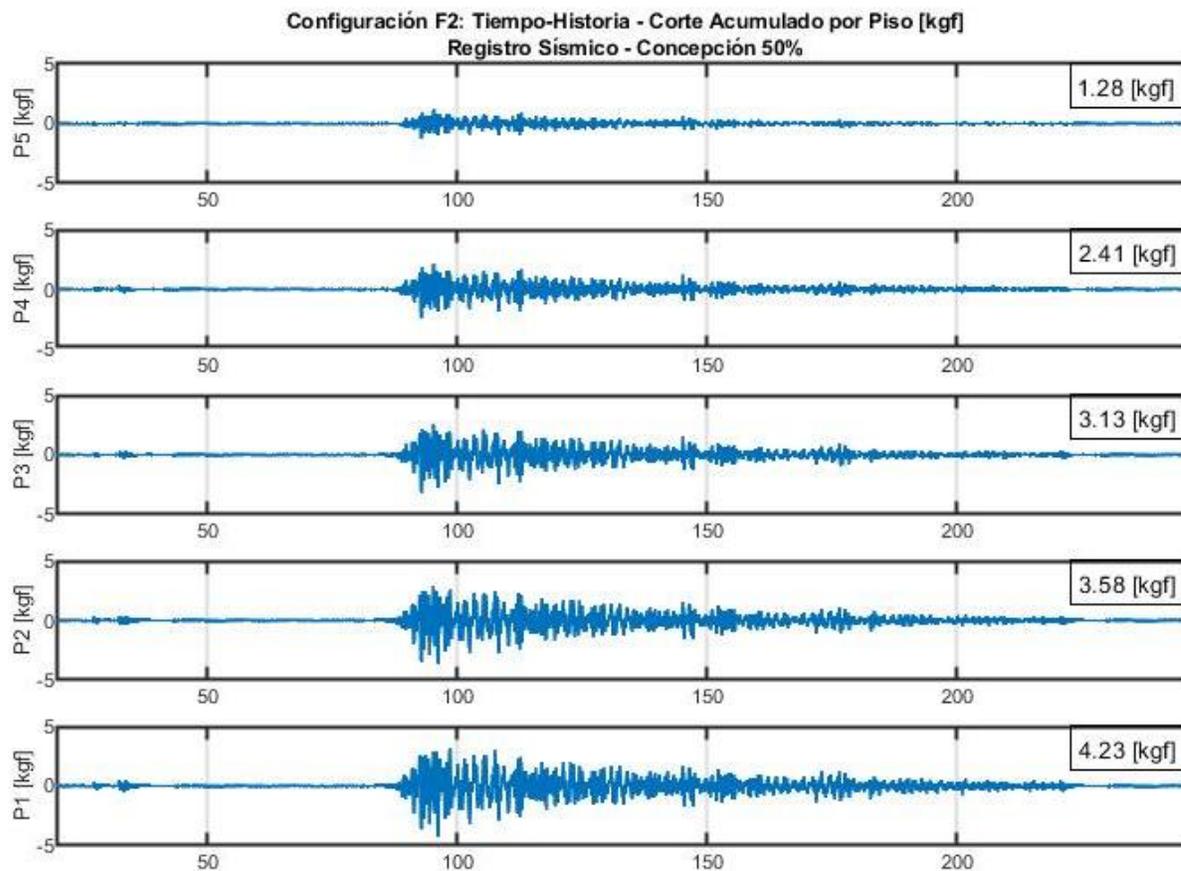


Figura 4.85. Tiempo-Historia Corte Acumulado por Piso - Configuración F2.

⁶⁴ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

Configuración F2: Máximo Corte Acumulado por Piso [kgf]
Registro Sísmico - Concepción 50%

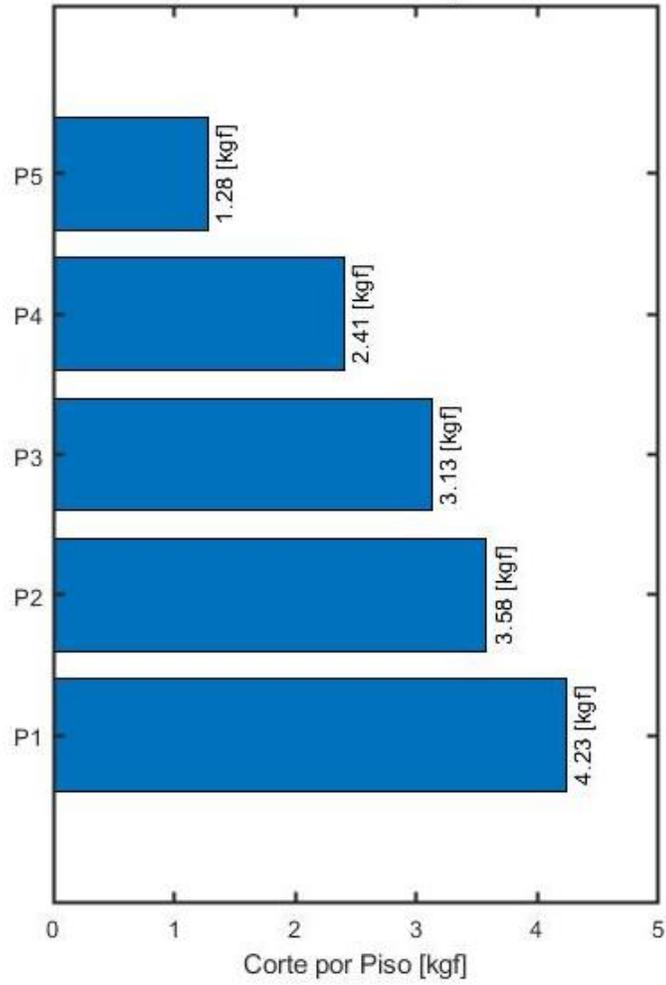


Figura 4.86. Corte Acumulado Máximo por Piso - Configuración F2.

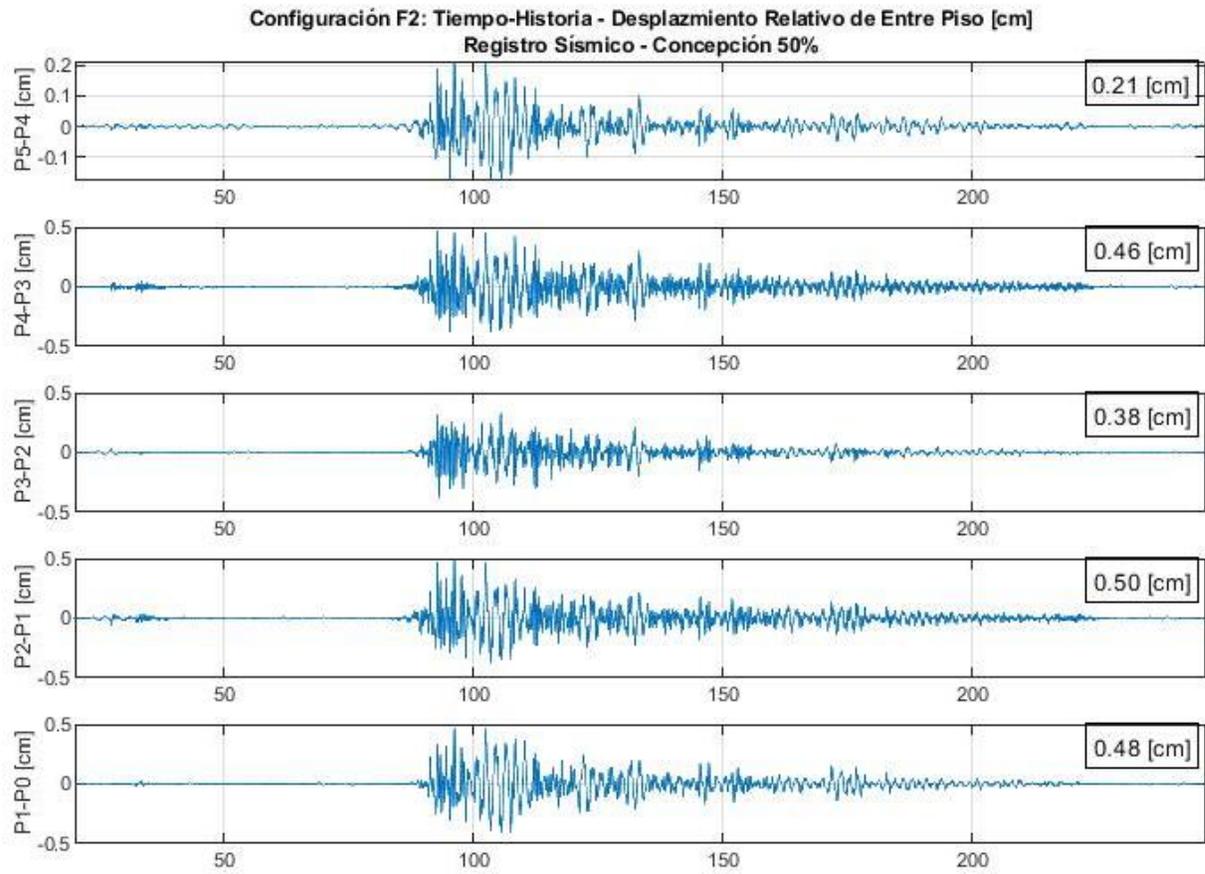


Figura 4.87. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración F2.

**Configuración F2: Desplazamiento Máximo Relativo de Entre Piso[cm]
Registro Sísmico - Concepción 50%**

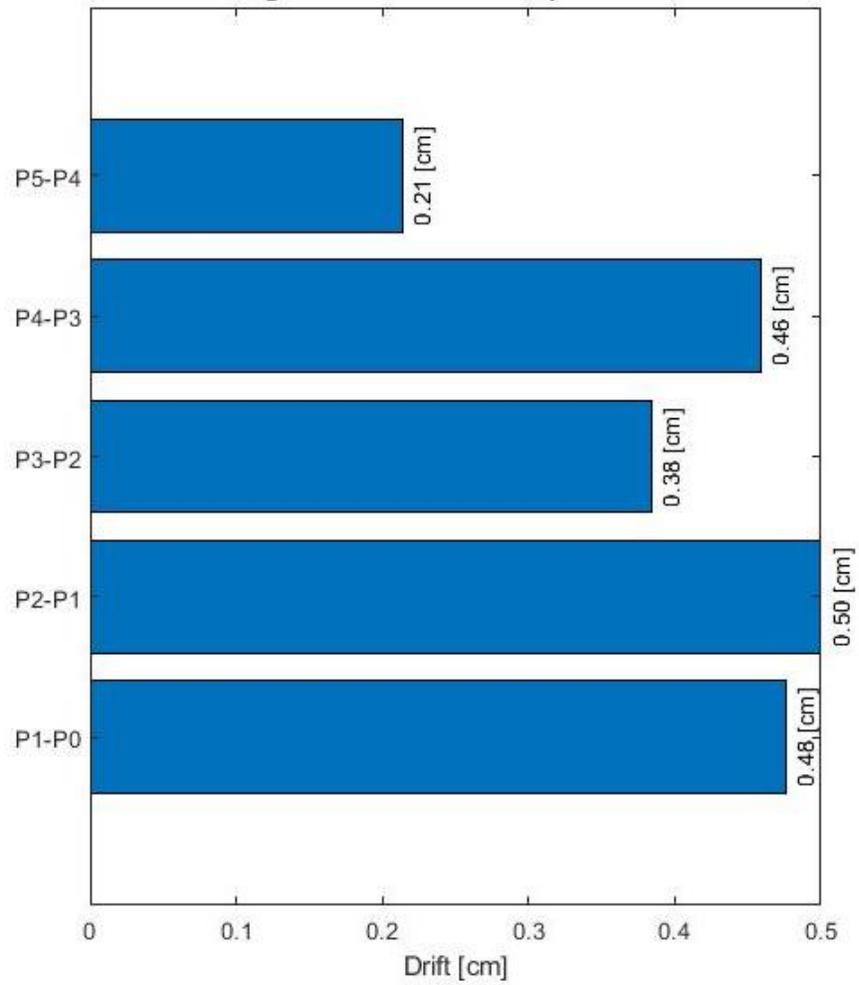


Figura 4.88. Desplazamiento Máximo Relativo de entre Piso - Configuración F2.

4.4.10. Comparación entre Configuraciones

4.4.10.1. Corte

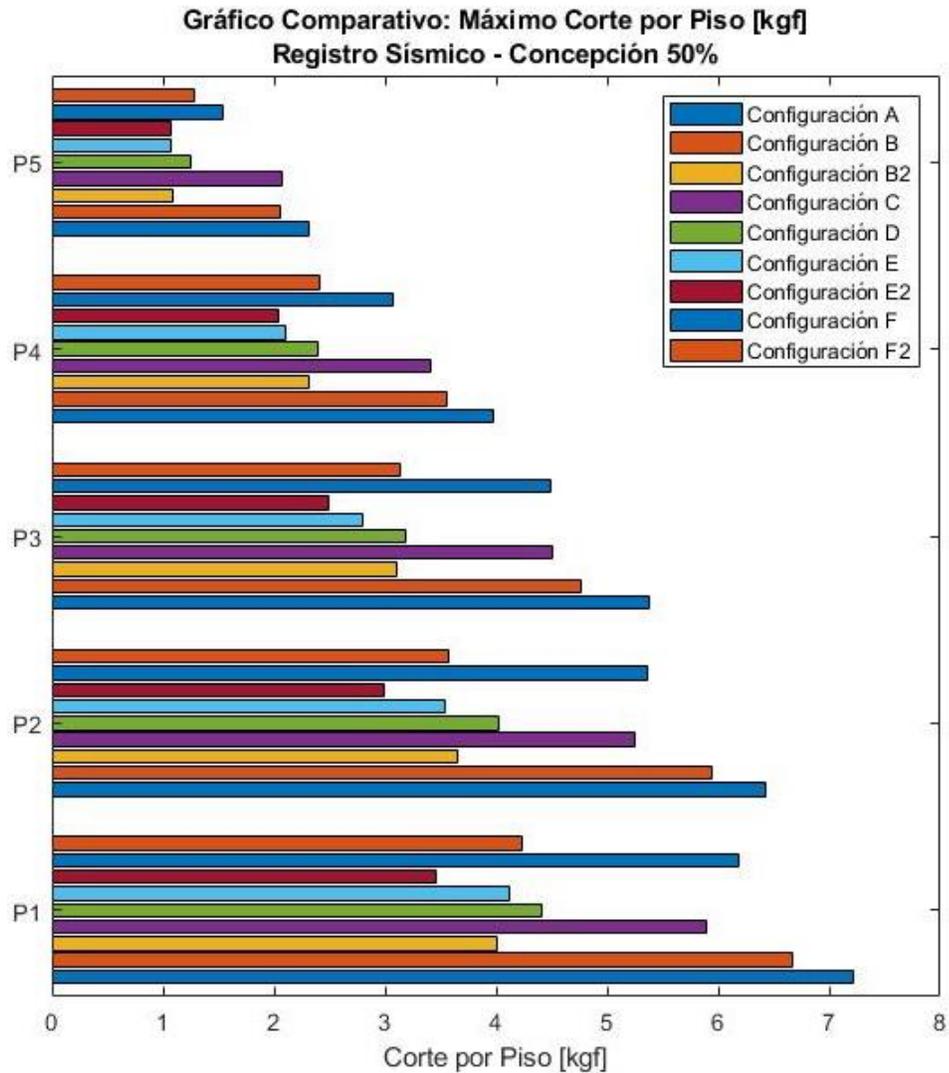


Figura 4.89. Gráfico Comparativo: Máximo Corte Acumulado por Piso. ^{65 66 67 68 69 70 71 72 73}

⁶⁵ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

⁶⁶ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

⁶⁷ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

⁶⁸ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

⁶⁹ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

⁷⁰ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

⁷¹ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

⁷² Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

⁷³ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

En la Figura 4.89 se puede apreciar una vista comparativa de los valores máximos de corte por piso entre las distintas configuraciones en estudio. Nótese que todas las configuraciones mejoran los resultados obtenidos para la configuración A, obteniéndose los mejores resultados para la configuración E2; sin embargo, es de destacarse que los resultados obtenidos para la configuración B2 mejoran a los obtenidos por la configuración F2 y son, en cierta medida, comparables con los obtenidos por las configuraciones E y E2.

Ahora bien, se observa que esta característica del sistema de cables y poleas con un disipador en serie (configuraciones B y B2) no solo es apreciable para la configuración B2; en la Figura 4.90 se presenta la comparación de los resultados de corte máximo para aquellas configuraciones que utilizan disipadores Tipo I ⁷⁴; los valores porcentuales presentados corresponden al porcentaje respecto a la configuración sin sistema de disipación, configuración A, alcanza la configuración en estudio. Para las configuraciones con este tipo de disipador se puede apreciar que la configuración con el sistema de cables y poleas con un disipador en serie instalado, configuración B, tiene un desempeño comparable al de la configuración con tres disipadores instalados, configuración F, pero es superada ampliamente por la configuración con cinco disipadores, configuración E, y por la configuración con el cable tensado, configuración D, en tanto que en comparación con la configuración con el cable menos tensado, configuración C, arroja resultados levemente inferiores.

⁷⁴ Disipador Tipo I: Disipador menos rígido, con $c= 12,62$ [kgf · s/m].

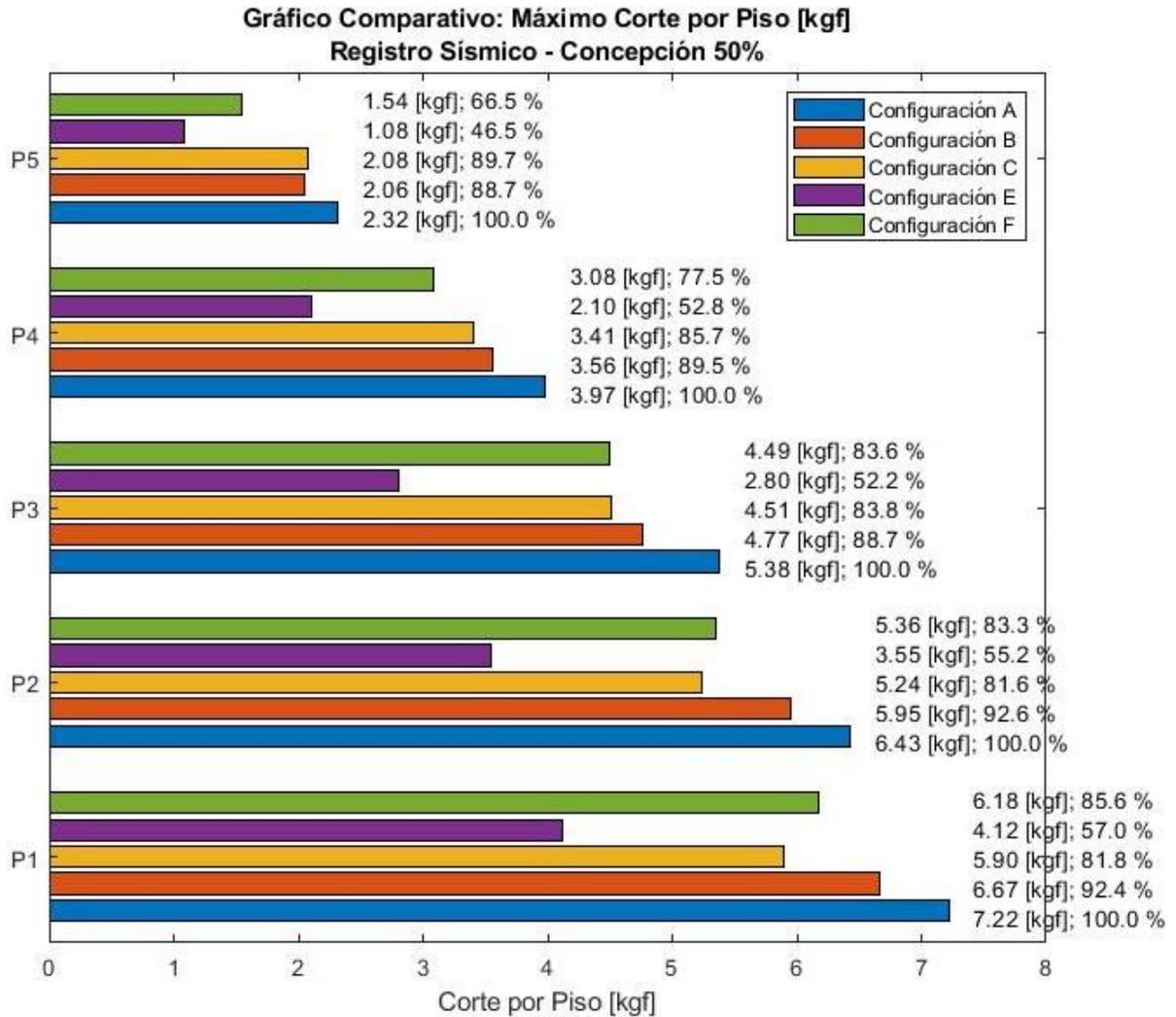


Figura 4.90. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo I.

La explicación para este fenómeno puede hallarse en los gráficos tiempo-historia de corte presentados anteriormente, en los cuales es posible notar que las configuraciones B y C, y en menor medida la configuración F, tienen sus resultados controlados por un valor peak que se hace presente casi al inicio de los registros. Este efecto, conocido como efecto látigo, se produce debido a que la carga no logra ser transmitida inmediatamente al sistema de disipación provocando la aparición de dichos valores peak que, finalmente, controlan la respuesta de la configuración. Este efecto látigo se aprecia de mejor manera en los gráficos tiempo-historia de desplazamiento relativo de entre piso, cuyos comentarios se presentan en la sección siguiente.

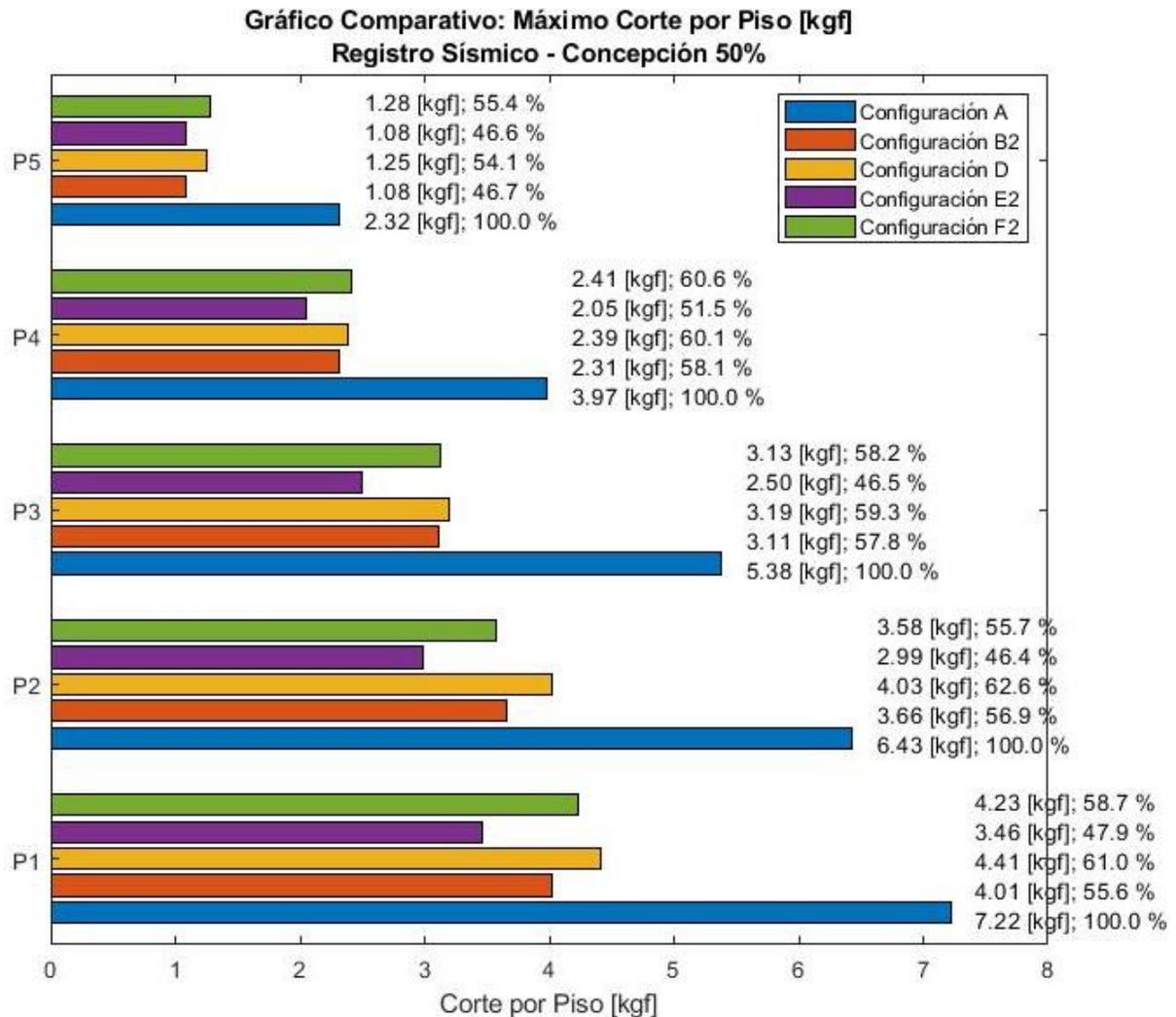


Figura 4.91. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo II.

La Figura 4.91 presenta los cortes máximos para las configuraciones que utilizan disipadores Tipo II ⁷⁵; nuevamente, los porcentajes representan el valor porcentual respecto a la configuración sin sistema de disipación de la configuración en estudio. En esta figura se puede apreciar de manera más clara que la configuración B2 alcanza mejores resultados que la configuración D, y que éstos son similares y comparables con los resultados de las configuraciones F2 y E2, respectivamente.

Finalmente, la Figura 4.92 presenta una comparación de resultados entre las configuraciones con disipadores Tipo I con aquellas con disipadores Tipo II. A diferencia de las figuras anteriores, los porcentajes se realizan entre configuraciones homónimas, vale decir, la configuración B se compara con la B2, la configuración E con la E2 y la

⁷⁵ Disipador Tipo II: Disipador más rígido, con $c= 29,93$ [kgf · s/m].

configuración F con la F2, siendo las configuraciones que utilizan disipadores Tipo I con las que se realizan las comparaciones. Nótese el buen comportamiento que tienen las configuraciones que utilizan disipadores Tipo II, en particular, la configuración B2 tiene un desempeño que sólo se ve superado por el de la configuración E2 para los resultados de corte en el primer piso.

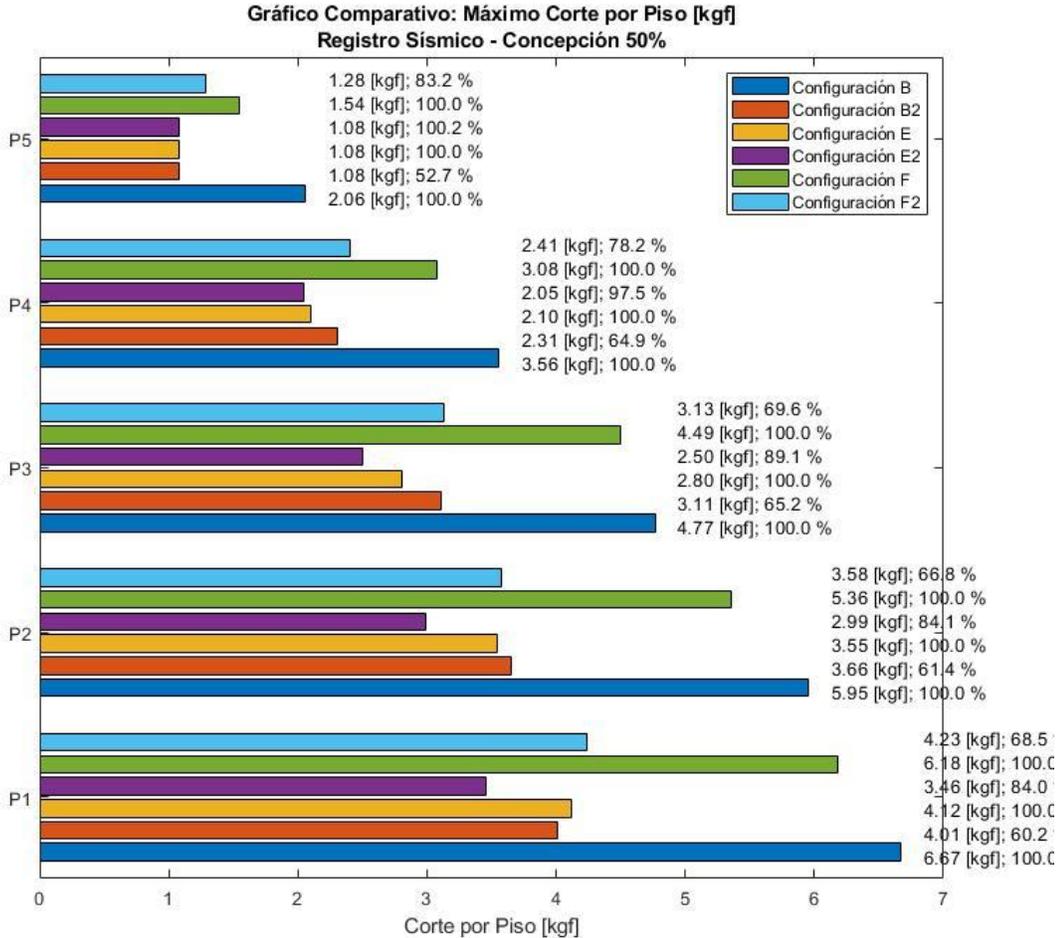


Figura 4.92. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo I y Tipo II.

4.4.10.2. Desplazamiento Relativo de Entre Piso

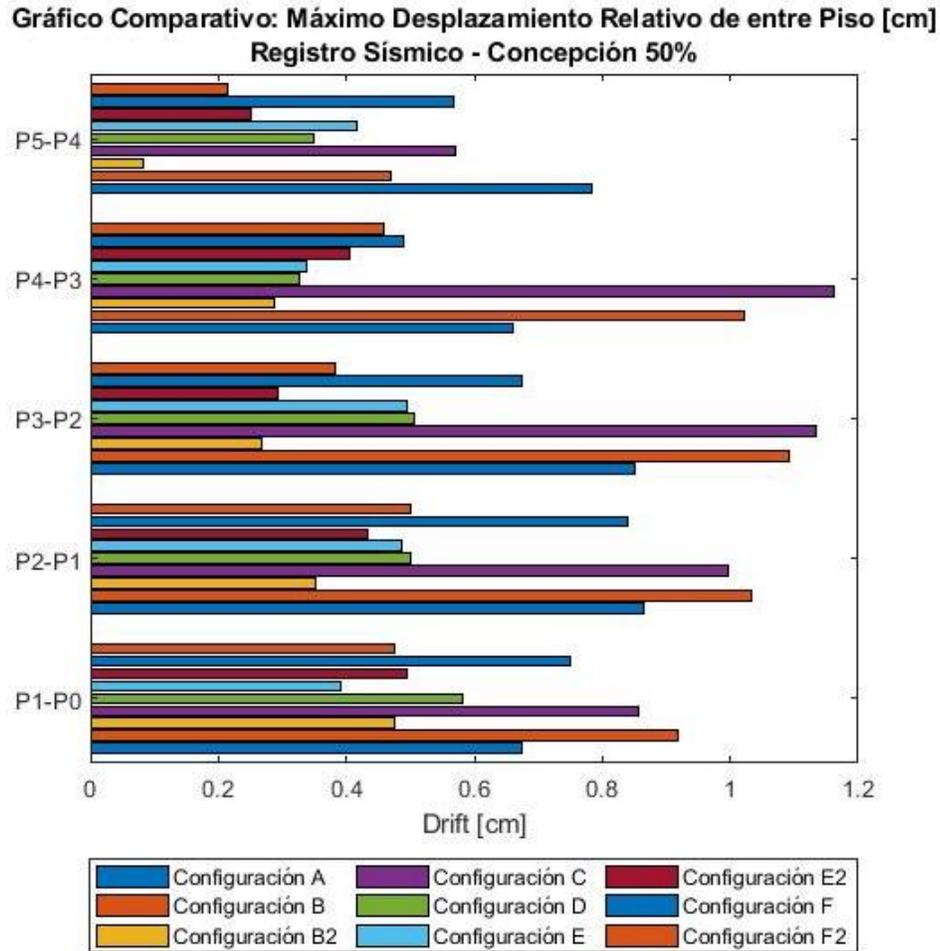


Figura 4.93. Gráfico Comparativo: Máximo Desplazamiento Relativo de entre Piso. ^{76 77 78 79 80 81 82 83 84}

En la Figura 4.93 se puede apreciar una vista comparativa de los valores máximos de desplazamiento relativo de entre piso entre las distintas configuraciones en estudio. Nótese que, a diferencia de lo que ocurre con el corte, aquí los resultados son más variables, aun así, los mejores resultados pertenecen a la configuración B2, la cual mejora notablemente los resultados de la configuración A.

⁷⁶ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

⁷⁷ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

⁷⁸ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

⁷⁹ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

⁸⁰ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

⁸¹ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

⁸² Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

⁸³ Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

⁸⁴ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

En la Figura 4.94 se presenta la comparación con aquellas configuraciones que utilizan disipadores del Tipo I⁸⁵. En esta figura se aprecia que las configuraciones B y C no mejoran los resultados de la configuración A, a excepción de lo que ocurre entre la base y el primer piso donde todas las configuraciones mejoran a la configuración A. La razón por la que las configuraciones B y C no mejoran los resultados de la configuración A puede hallarse en los gráficos tiempo-historia de desplazamiento relativo de entre piso, en los cuales se aprecia claramente el efecto látigo que existe en dichas estructuras. Este efecto látigo tiene su explicación en que ambas configuraciones presentan baja tensión en sus cables, por lo que la transmisión de la carga hacia el sistema de disipación ocurre después de que los cables se tensan que es el instante en el que se hace visible el efecto látigo.

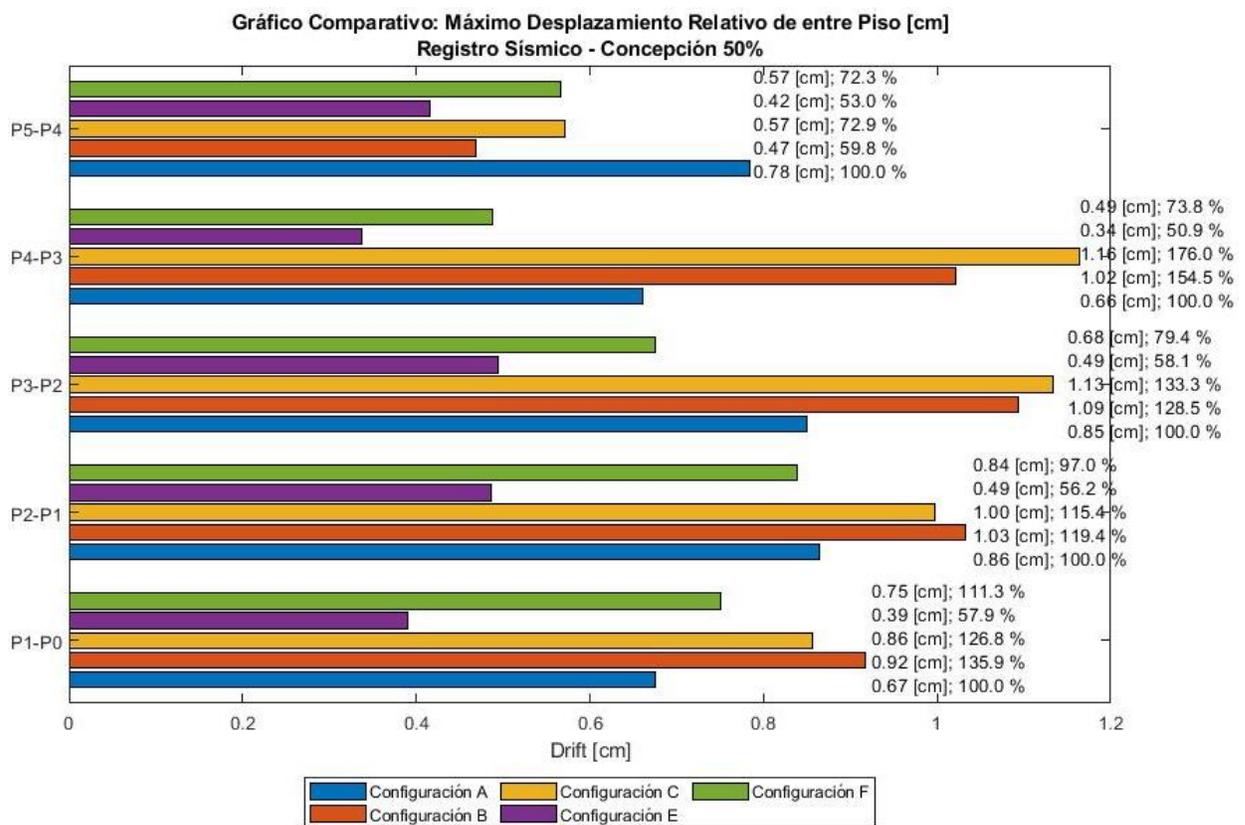


Figura 4.94. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo I.

Esta explicación se ve respaldada con por los resultados de la Figura 4.95, donde se presenta la comparación de resultados con aquellas configuraciones que utilizan disipadores Tipo II⁸⁶. En esta figura se aprecia que las configuraciones que presentan disipadores Tipo

⁸⁵ Disipador Tipo I: Disipador menos rígido, con $c= 12,62$ [kgf · s/m].

⁸⁶ Disipador Tipo II: Disipador más rígido, con $c= 29,93$ [kgf · s/m].

II mejoran notablemente los resultados obtenidos de las configuraciones A y C. Esta mejoría en los resultados es gracias a la mayor rigidez, lo cual permite aplicar mayor tensión a los cables, y por ende facilita la transmisión de carga de la estructura a los sistemas de disipación evitando que ocurra el efecto látigo. Esto puede ser comprobado al observar los gráficos tiempo-historia de desplazamiento relativo de entre piso de estas configuraciones, en los cuales no se aprecia el efecto látigo presente en las configuraciones B y C.

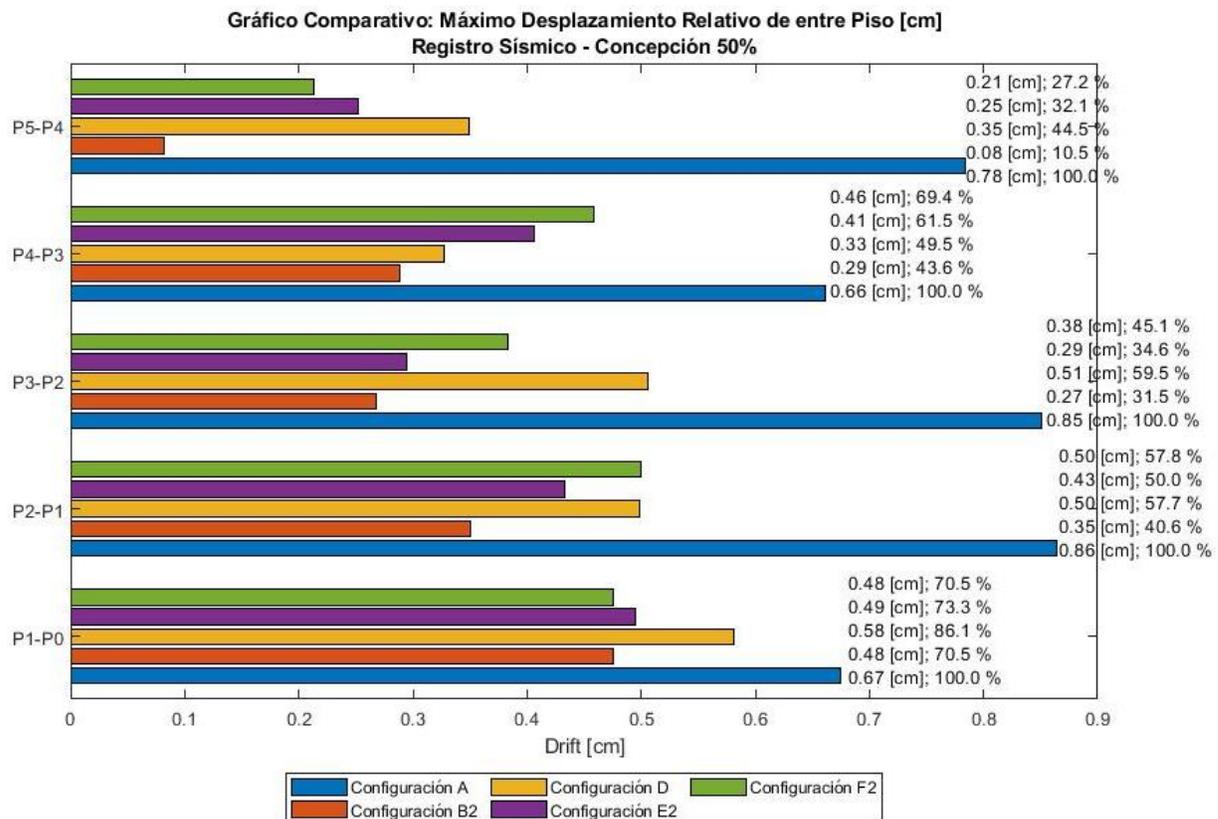


Figura 4.95. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo II.

Se ha de destacar que, con el efecto látigo suprimido, las configuraciones B2, E2 y F2 mejoran los resultados de la configuración A, siendo la configuración con el sistema de cables y poleas con un disipador tipo II en serie, configuración B2, la que mejor desempeño presenta.

Finalmente, en la Figura 4.96 se presenta una comparación entre las configuraciones que utilizan disipadores Tipo I y Tipo II. En esta figura las comparaciones realizadas son entre las configuraciones B y B2, E y E2, y F y F2, tomando como base de la comparación aquellas configuraciones con disipadores Tipo I, es decir, las configuraciones B, E y F. Nuevamente se a de destacar que las configuraciones B2, E2 y F2 mejoran notablemente los desempeños de sus pares homónimos.

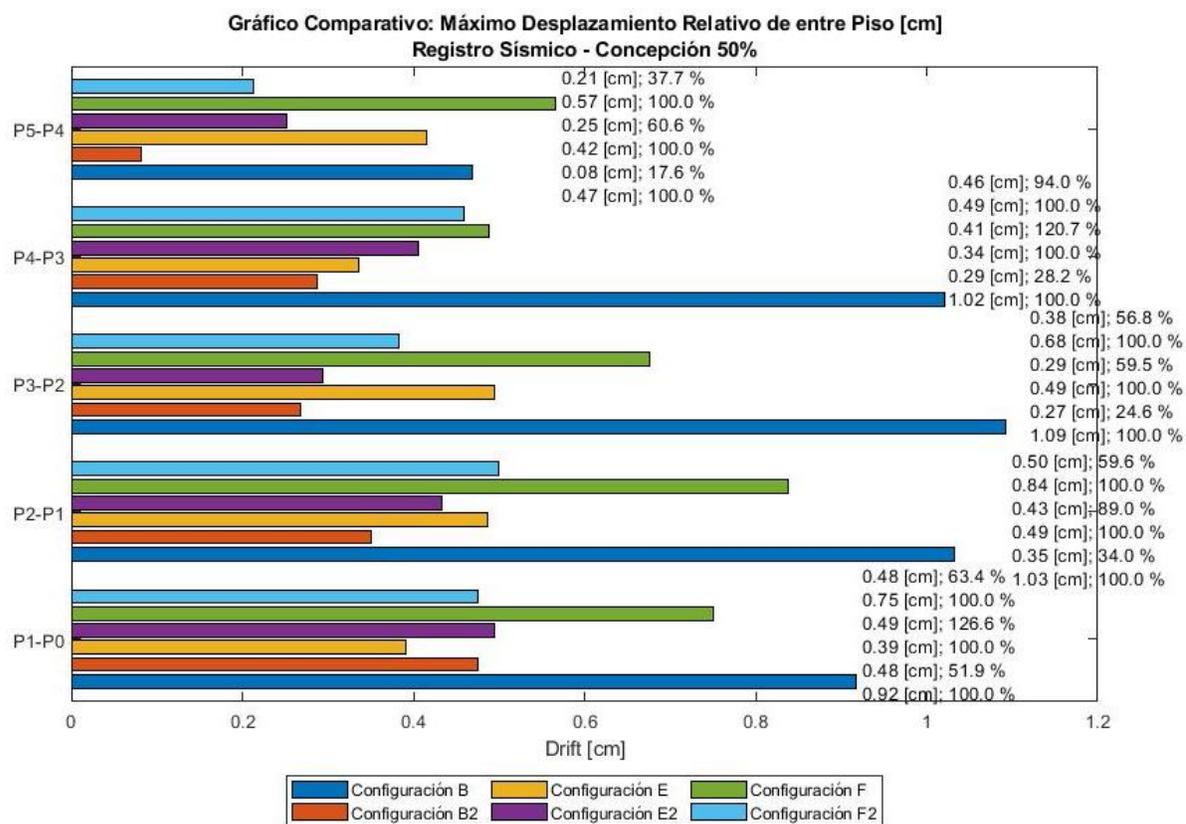


Figura 4.96. Gráfico Comparativo: Configuraciones con Disipadores Tipo I y Tipo II.

Capítulo 5 Ajuste Teórico – Método Z(var)

En el presente capítulo se presenta un ajuste teórico de las configuraciones estructurales A⁸⁷, B2⁸⁸, D⁸⁹ y E2⁹⁰, para lo cual se ha desarrollado un método basado en las ecuaciones de movimiento y que considera la evolución temporal de las propiedades dinámicas de las configuraciones en estudio. Matemáticamente este método se deduce a partir de las Eqs. (5.1), (5.2) y (5.3), donde se considera que cada paso de tiempo se basa en una aceleración promedio constante.

$$\begin{aligned}\Delta\ddot{v}_n &= \ddot{v}_{n+1} - \ddot{v}_n \\ \ddot{v}_{prom.} &= \ddot{v}_n + \frac{\Delta\ddot{v}_n}{2}\end{aligned}\quad (5.1)$$

$$\begin{aligned}\dot{v}_{n+1} &= \dot{v}_n + \Delta\dot{v}_n \\ \Delta\dot{v}_n &= \Delta t \cdot \ddot{v}_{prom.} = \ddot{v}_n \cdot \Delta t + \frac{\Delta t}{2} \cdot \Delta\ddot{v}_n\end{aligned}\quad (5.2)$$

$$\begin{aligned}v_{n+1} &= v_n + \Delta v_n \\ \Delta v_n &= \frac{\Delta t}{2} \cdot \Delta\dot{v}_n + \Delta t \cdot \dot{v}_n \\ \Delta v_n &= \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \ddot{v}_n + \frac{\Delta t^2}{4} \cdot \Delta\ddot{v}_n + \Delta t \cdot \dot{v}_n\end{aligned}\quad (5.3)$$

Resolviendo las primeras dos ecuaciones de la Eq. (5.3) se obtienen \dot{v}_{n+1} y \ddot{v}_{n+1} en términos de v_{n+1} , respectivamente.

$$\ddot{v}_{n+1} = \ddot{v}_n + \Delta\ddot{v}_n = \frac{4}{\Delta t^2} \cdot \Delta v_n - \frac{4}{\Delta t} \cdot \Delta\dot{v}_n - \ddot{v}_n = \frac{4}{\Delta t^2} (v_{n+1} - v_n) - \frac{4}{\Delta t} \cdot \dot{v}_n - \ddot{v}_n \quad (5.4)$$

$$\dot{v}_{n+1} = \dot{v}_n + \Delta\dot{v}_n = \frac{2}{\Delta t} \cdot \Delta v_n - \dot{v}_n = \frac{2}{\Delta t} (v_{n+1} - v_n) - \dot{v}_n \quad (5.5)$$

Substituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación de movimiento $m \cdot \ddot{v} + c \cdot \dot{v} + k \cdot v = P$ se obtiene:

$$m \left(\frac{4}{\Delta t^2} (v_{n+1} - v_n) - \frac{4}{\Delta t} \cdot \dot{v}_n - \ddot{v}_n \right) + c \left(\frac{2}{\Delta t} (v_{n+1} - v_n) - \dot{v}_n \right) + k \cdot v_{n+1} = P_{n+1} \quad (5.6)$$

⁸⁷ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

⁸⁸ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

⁸⁹ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

⁹⁰ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

Finalmente, reordenando la Eq. (5.6) en términos de v_{n+1} , y recordando que c y k son variables, es posible describir este método mediante:

$$\left(\frac{4}{\Delta t^2} \cdot m + \frac{2}{\Delta t} \cdot c + k\right)v_{n+1} = P_{n+1} + m\left(\frac{4}{\Delta t^2} \cdot v_n + \frac{4}{\Delta t} \cdot \dot{v}_n + \ddot{v}_n\right) + c\left(\frac{2}{\Delta t} \cdot v_n + \dot{v}_n\right) \quad (5.7)$$

Equivalentemente:

$$v_{n+1} = \tilde{k}^{-1} \cdot \tilde{P}_{n+1} \quad (5.8)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \tilde{k} &= \frac{4}{\Delta t^2} \cdot m + \frac{2}{\Delta t} \cdot c + k \\ \tilde{P}_{n+1} &= P_{n+1} + m\left(\frac{4}{\Delta t^2} \cdot v_n + \frac{4}{\Delta t} \cdot \dot{v}_n + \ddot{v}_n\right) + c\left(\frac{2}{\Delta t} \cdot v_n + \dot{v}_n\right) \end{aligned} \quad (5.9)$$

La validación de este método se inicia por la comparación de resultados de esta metodología para un sistema con 1 GDL con los resultados obtenidos mediante el método de Newmark para aceleración constante. Tras validar el método para el caso base, con aceleración constante, se procede a comparar los resultados, primero, con frecuencia variable y tasa de amortiguamiento constante y, luego, con frecuencia constante y tasa de amortiguamiento variable. Para ambos casos, se han utilizado valores conocidos e impuestos de frecuencias y tasas de amortiguamiento para obtener los resultados.

Una vez validada la metodología para un sistema con 1 GDL, se procede a estudiar la respuesta de un sistema con 3 GDL con rigidez constante siguiendo un procedimiento análogo al anterior, vale decir, se inicia con la comparación de resultados con propiedades dinámicas constantes, luego haciendo variar linealmente la tasa de amortiguamiento y finalmente con tasa de amortiguamiento y frecuencias variables, pero considerando las formas modales del caso base con 3 GDL.

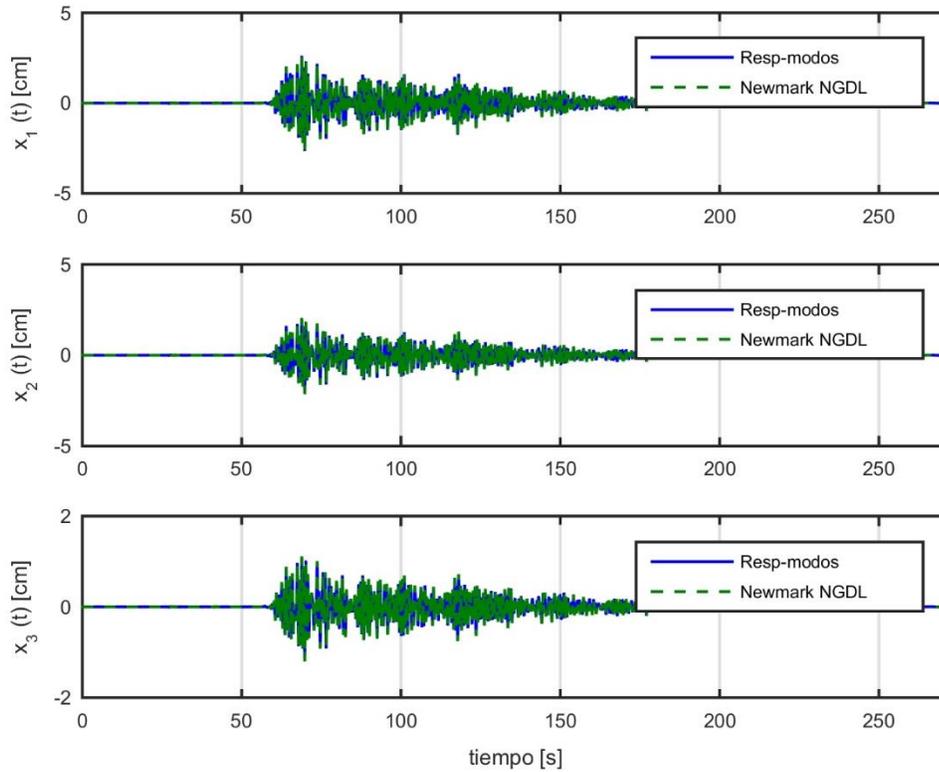


Figura 5.1. Comparación Respuesta de Desplazamiento Modelo vs Newmark.

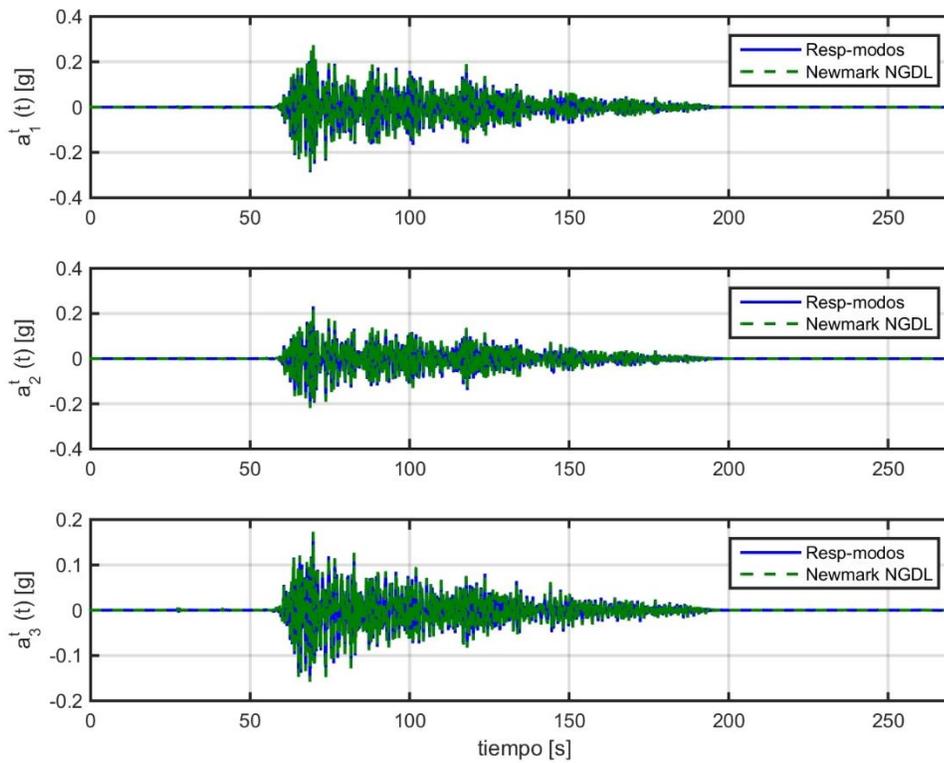


Figura 5.2. Comparación Respuesta de Aceleración Modelo vs Newmark.

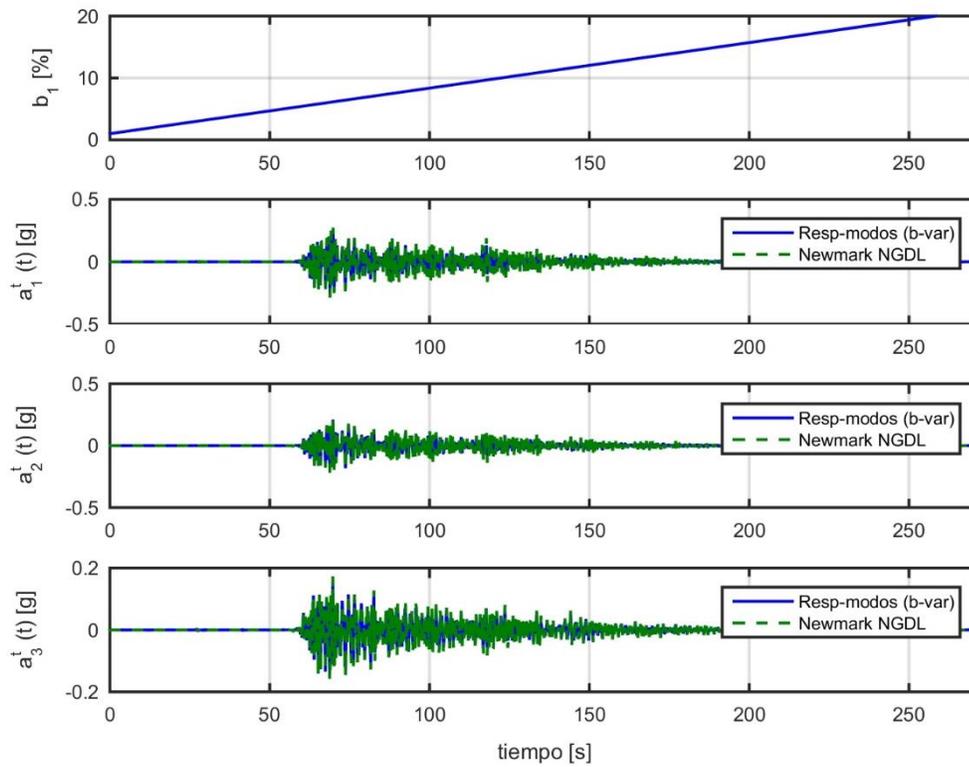


Figura 5.3. Comparación Respuesta de Aceleración Modelo vs Newmark - β Variable: Lineal.

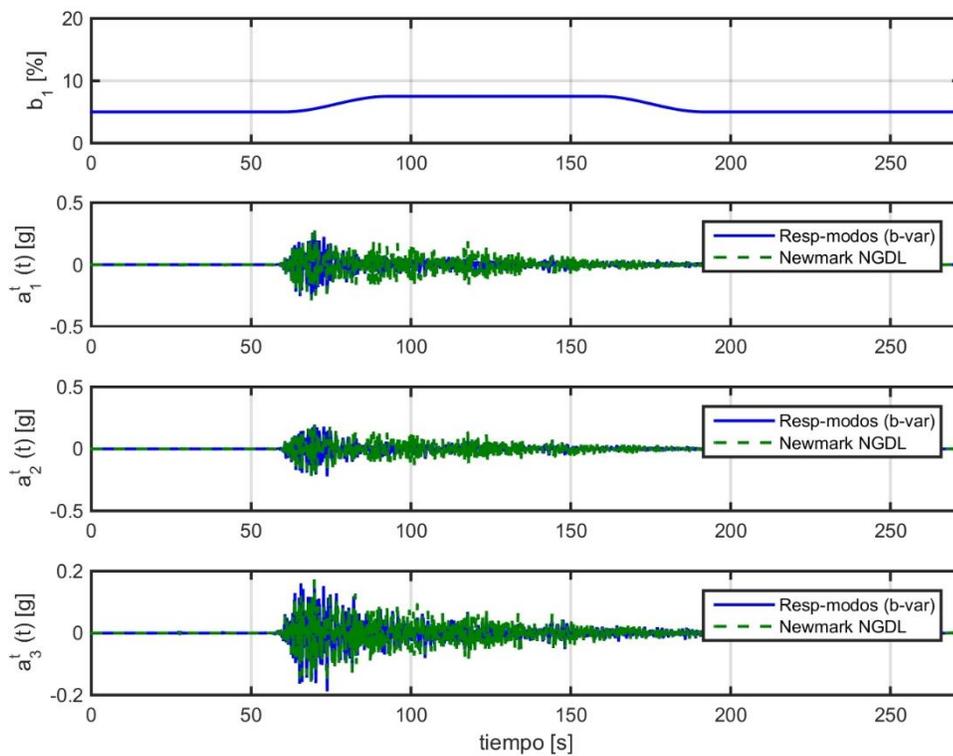


Figura 5.4. Comparación Respuesta de Aceleración Modelo vs Newmark - β Variable: No Lineal.

Ya con la metodología validada para ser utilizada, se procede a realizar el estudio para las configuraciones con propiedades dinámicas variables. Para lo cual se procede de la siguiente forma:

- i) Obtener las frecuencias, manualmente, de la función de transferenciograma de la configuración a estudiar.
- ii) Entregar como dato de entrada la aceleración basal registrada durante el ensayo, así como la matriz de masa de la configuración.
- iii) Indicar valores iniciales de frecuencias modales y tasas de amortiguamiento modales. Estos valores son obtenidos de la primera ventana de tiempo escogida durante el análisis DSI para pequeñas ventanas de tiempo.
- iv) Se suponen las formas modales conocidas e iguales a las correspondientes para para el orden asociado a los valores de frecuencia modal y amortiguamiento modal del paso (iii), las cuales son normalizadas de tal forma que es posible encontrar la respuesta sísmica de una estructura de 5 GDL (posición, velocidad, aceleración y aceleración total) cuyas formas modales son conocidas y constantes en el tiempo. Las formas modales normalizadas se obtienen mediante la siguiente normalización:

$$\tilde{\phi} = \phi \frac{L_m}{M_m} \quad (5.10)$$

Donde:

$$\begin{aligned} L_{m_i} &= \phi_i^T \cdot M \cdot R \\ M_m &= \phi_i^T \cdot M \cdot \phi_i \\ R &= \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Las formas modales normalizadas cumplen con las siguientes propiedades:

$$\ddot{v}(t) = \sum \tilde{\phi} \cdot \ddot{Y}_i(t) \quad (5.12)$$

$$\sum \tilde{\phi} = R = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

- La respuesta de la estructura en el grado de libertad es igual a la forma modal normalizada multiplicada por la respuesta de un oscilador de 1 GDL excitado por

la misma aceleración basal y con igual frecuencia y tasa de amortiguamiento que el modo en estudio.

Nótese que en algunos casos la forma modal normalizada puede alcanzar valores mayores que 1 (para un GDL en particular) implicando que otras formas modales tomen valores negativos que compensen este hecho (para el mismo GDL). De tal forma, la normalización de las formas modales aplicada tiene un significado físico explícito, es más, el signo de cada grado de libertad representa físicamente cuando el grado de libertad se sintoniza o desintoniza con respecto a la respuesta modal del sistema de un grado de libertad.

v) Luego, teniendo como datos de entrada: matriz de masa, aceleración basal registrada, tasa de muestreo del ensayo, aceleración total obtenida en (iv), desplazamiento y velocidad inicial de la configuración (pueden ser consideradas cero), tasas de amortiguamiento modales iniciales, formas modales iniciales por modo, frecuencias modales iniciales, límites y tolerancias (para las variaciones entre pasos temporales) de forma modal y tasa de amortiguamiento modal, y dos nuevas variables que hacen referencia al largo de la ventana de tiempo a estudiar y a la diferencia de tiempo que existe entre los inicios de cada ventana.

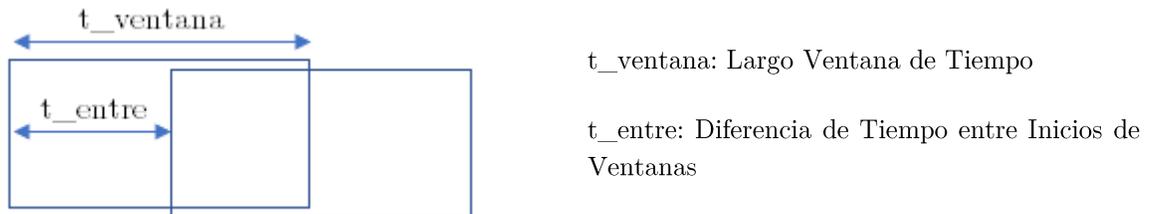


Figura 5.5. Figura Ilustrativa de las Variables Temporales en Uso.

Con los datos de entrada listos, se procede a determinar las tasas de amortiguamiento y formas modales de la configuración en estudio para cada ventana de tiempo definida para el estudio. La resolución de este problema pasa a ser un problema de optimización para cada ventana de tiempo, cuyas restricciones quedan definidas por las tolerancias ingresadas en (v) así como por los límites definidos en (v).

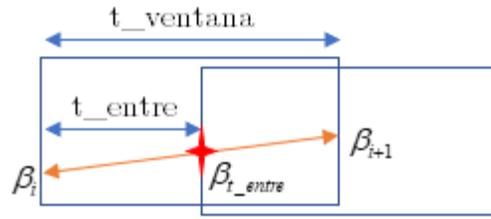


Figura 5.6. Figura Ilustrativa de la Optimización de la Tasa de Amortiguamiento.

De esta forma, la optimización de la tasa de amortiguamiento se realiza considerando un ajuste lineal de ésta para el largo de ventana escogido teniendo como valor inicial el valor β_i entregado en (iii), obteniendo así el valor β_{i+1} para el final de dicha ventana. Sin embargo, el valor a utilizar como valor inicial en la ventana siguiente es el correspondiente a β_{t_entre} , con el cual se procede a realizar la optimización para la ventana siguiente. Nótese que se ha de cumplir $t_entre \leq t_ventana$, y que a menor valor que estas variables tomen mejor será el ajuste obtenido. Finalmente, las tasas de amortiguamiento modales buscadas corresponden a la colección de tasas de amortiguamiento ajustadas en el tiempo, $\beta_i \cdots \beta_{t_entre_i} \cdots \beta_{i+1_final}$. Adicionalmente, se obtienen los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y aceleraciones totales de cada grado de libertad.

El procedimiento recién descrito se utiliza para realizar los ajustes teóricos de las configuraciones B2, D y E2, cuyos resultados, junto con los de la configuración A, se presentan en los apartados siguientes. Nótese que el factor NRMSE indica el grado de ajuste de las respuestas del modelo con respecto a las experimentales.

5.1. Configuración A ⁹¹

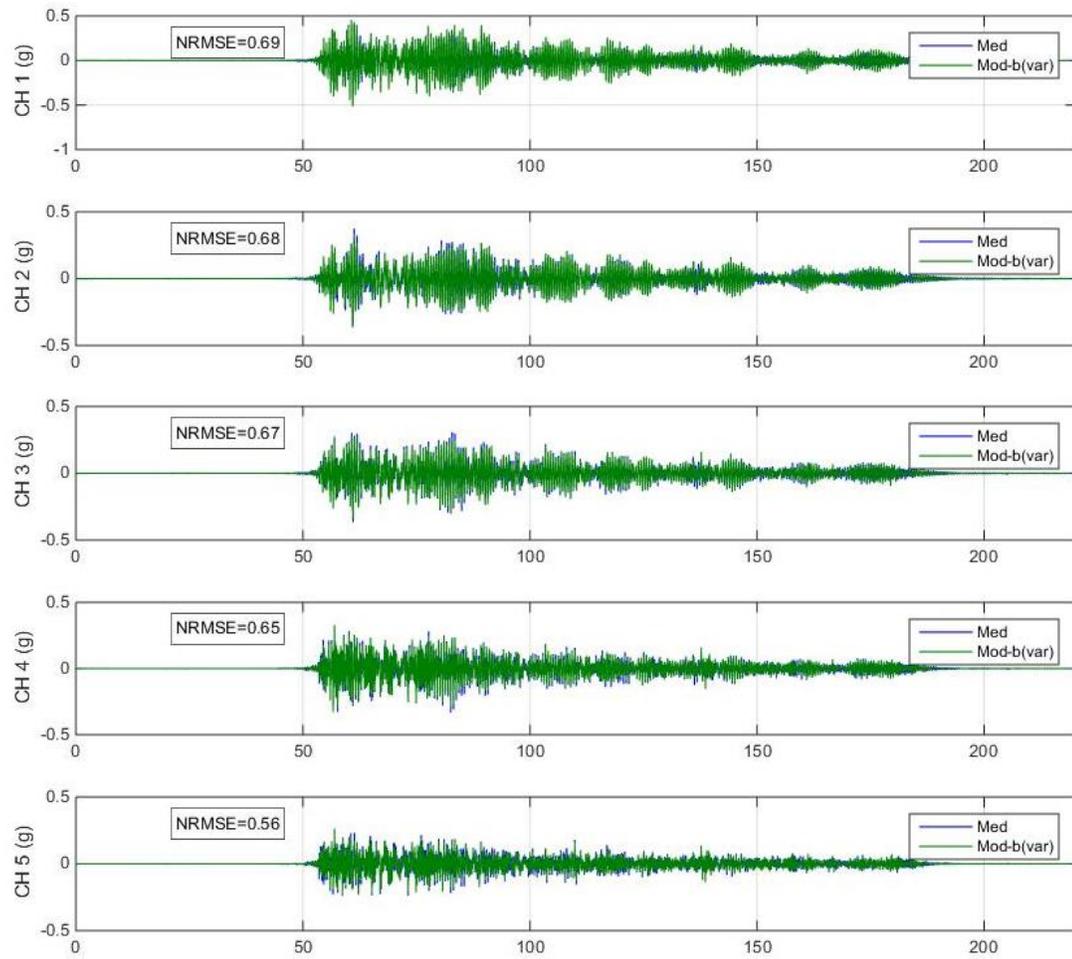


Figura 5.7. Comparación Respuesta Experimental vs Ajustada del Modelo – Configuración A.

⁹¹ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

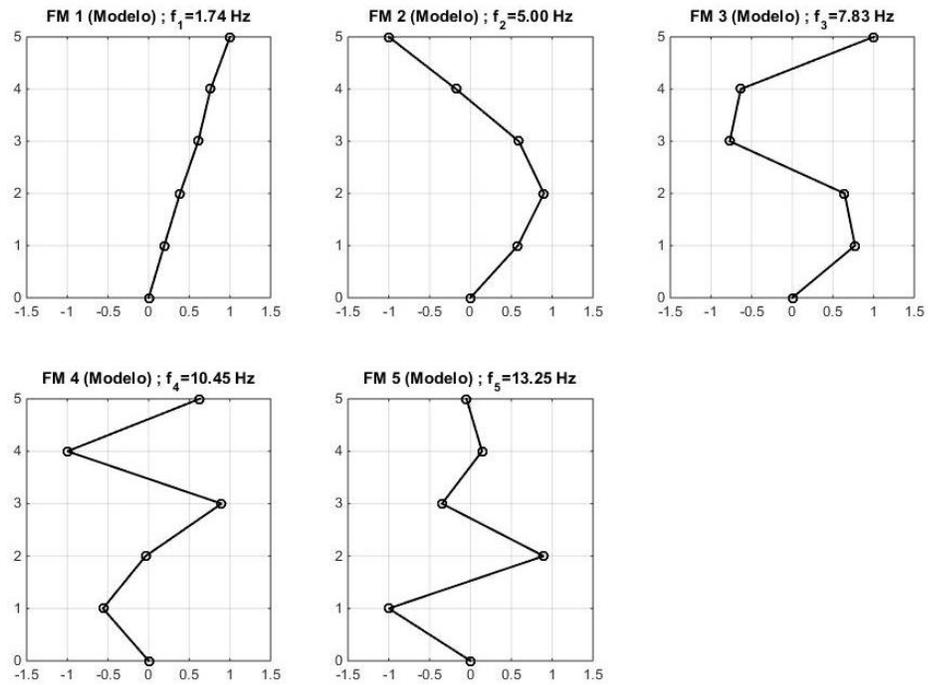


Figura 5.8. Formas Modales obtenidas del modelo - Configuración A.

5.2. Configuración B2 ⁹²

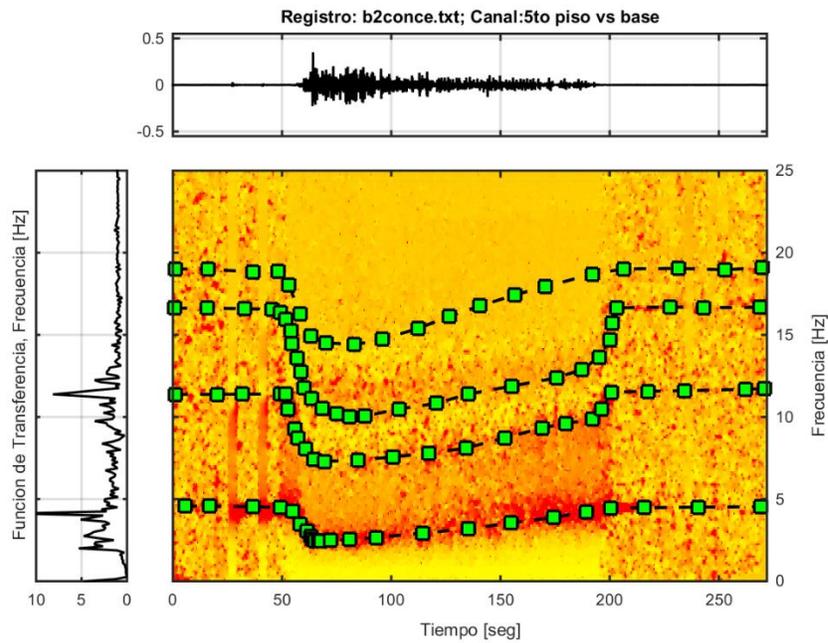


Figura 5.9. Función de Transferencia con Frecuencias Modales Identificadas - Configuración B2.

⁹² Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

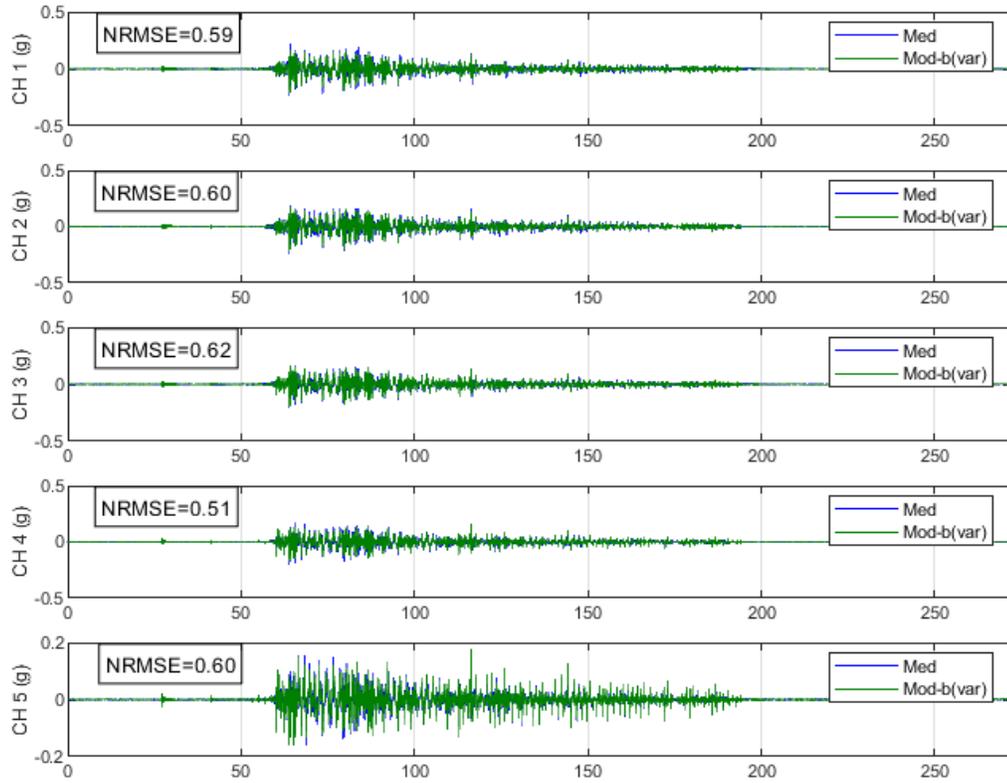


Figura 5.10. Comparación Respuesta Experimental vs Ajustada del Modelo – Configuración B2.

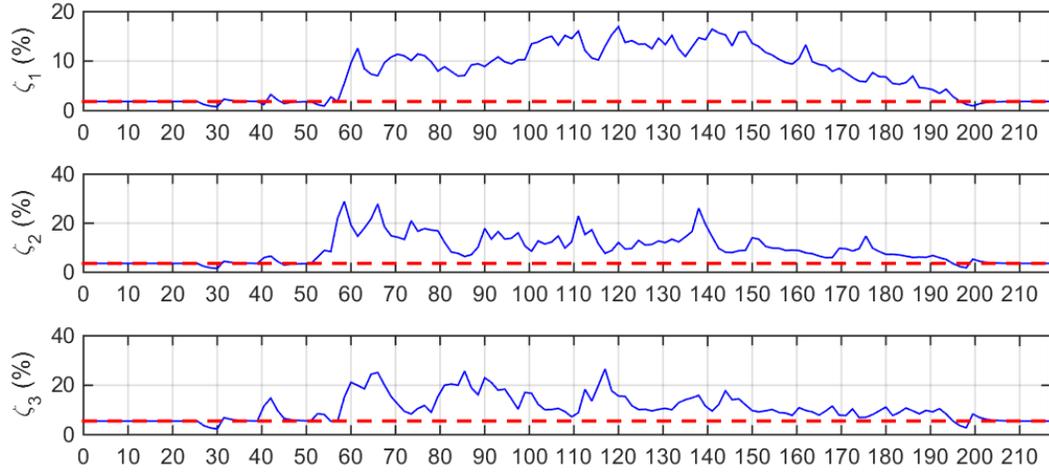


Figura 5.11. Evolución Tasas de Amortiguamiento: 3 modos identificados - Configuración B2.

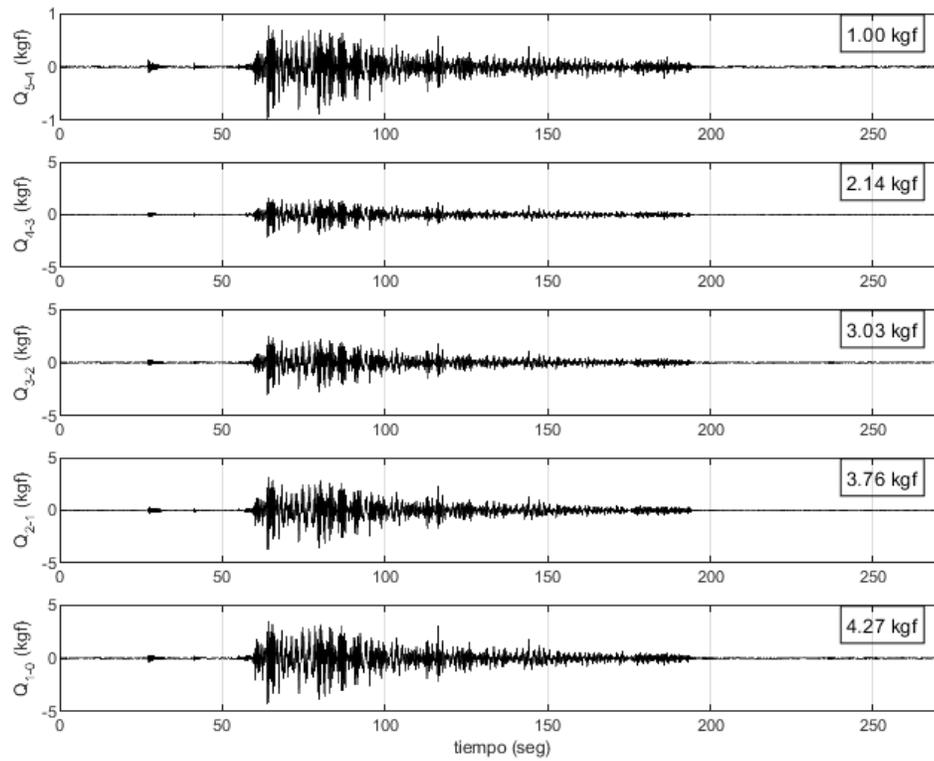


Figura 5.12. Tiempo-Historia Corte por Piso - Configuración B2.

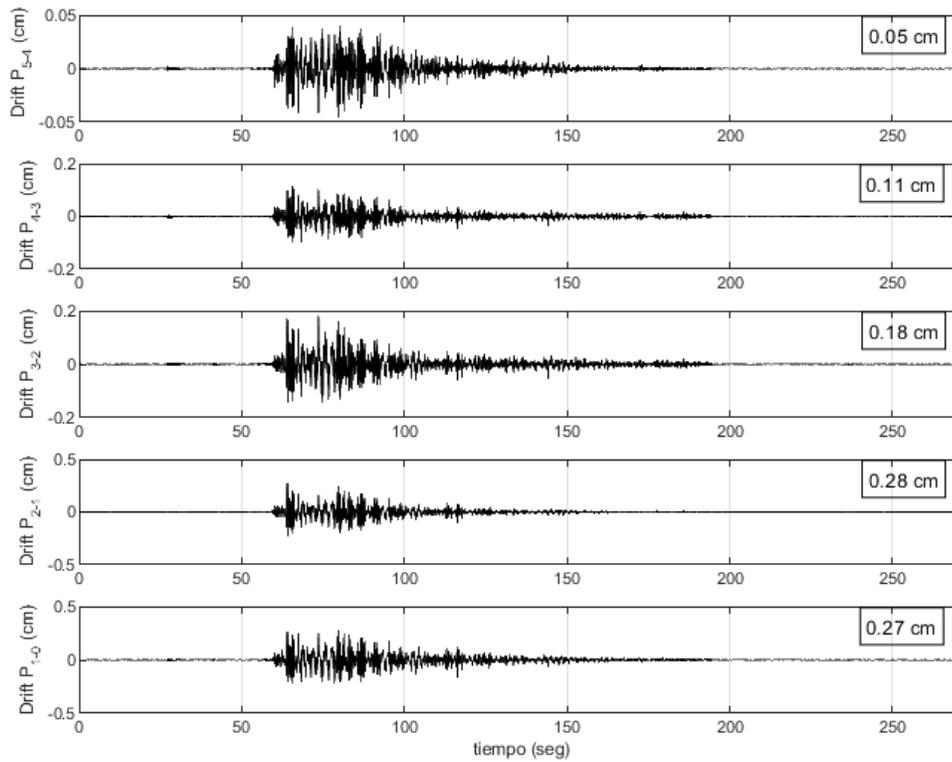


Figura 5.13. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración B2.

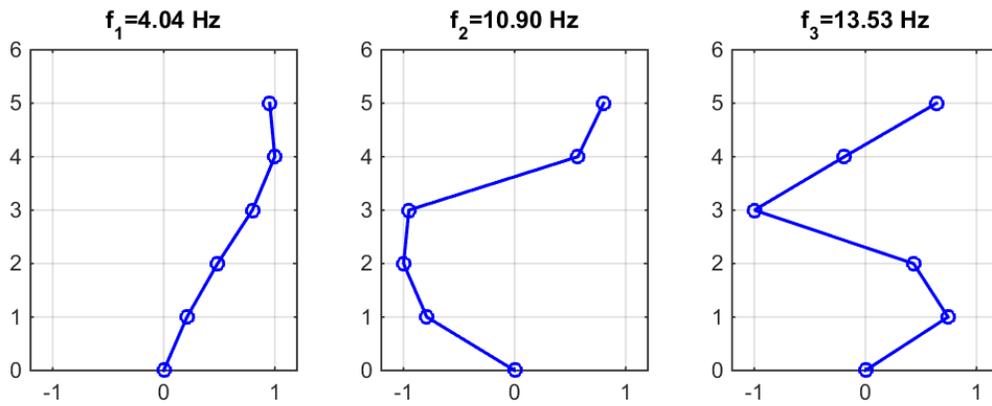


Figura 5.14. Formas Modales obtenidas del modelo - Configuración B2.

5.3. Configuración D ⁹³

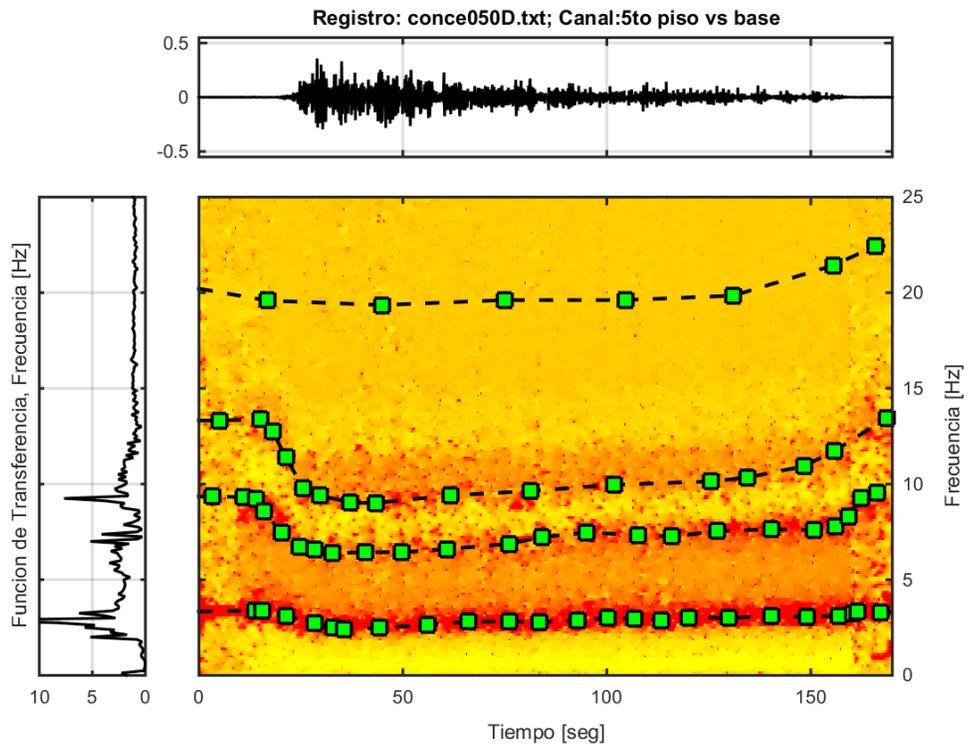


Figura 5.15. Función de Transferenciograma con Frecuencias Modales Identificadas - Configuración D.

⁹³ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

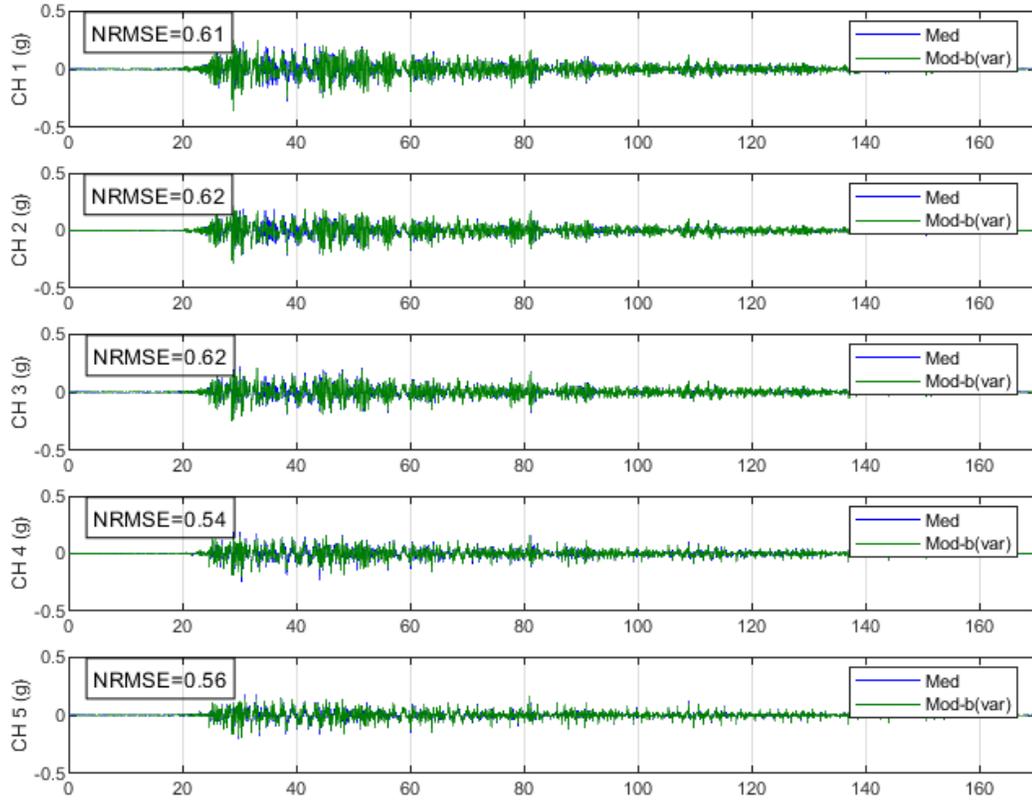


Figura 5.16. Comparación Respuesta Experimental vs Ajustada del Modelo – Configuración D.

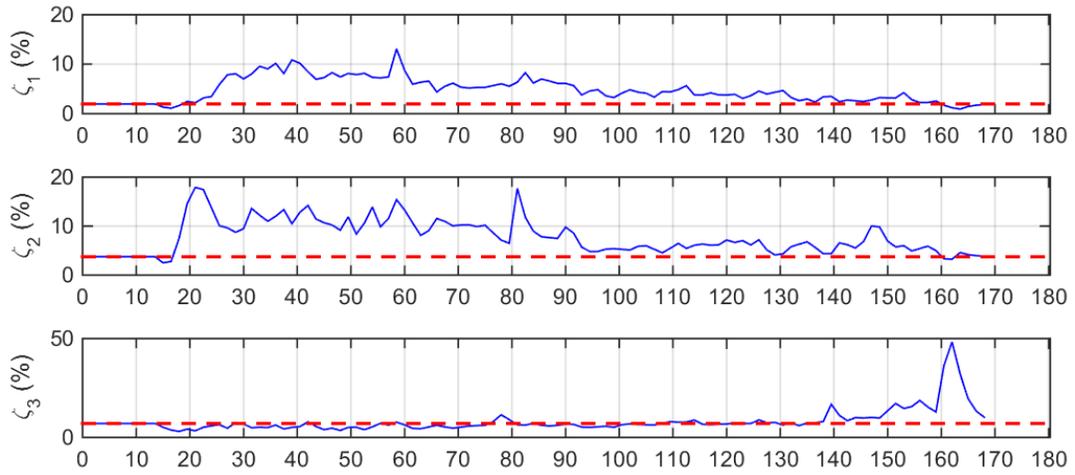


Figura 5.17. Evolución Tasas de Amortiguamiento: 3 modos identificados - Configuración D.

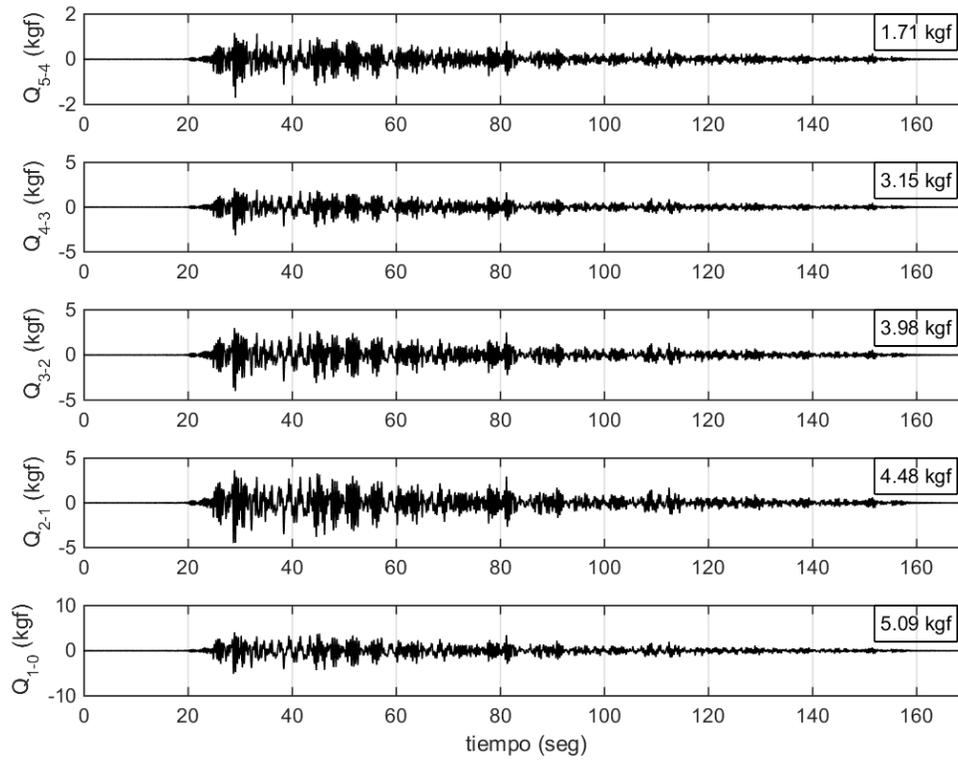


Figura 5.18. Tiempo-Historia Corte por Piso - Configuración D.

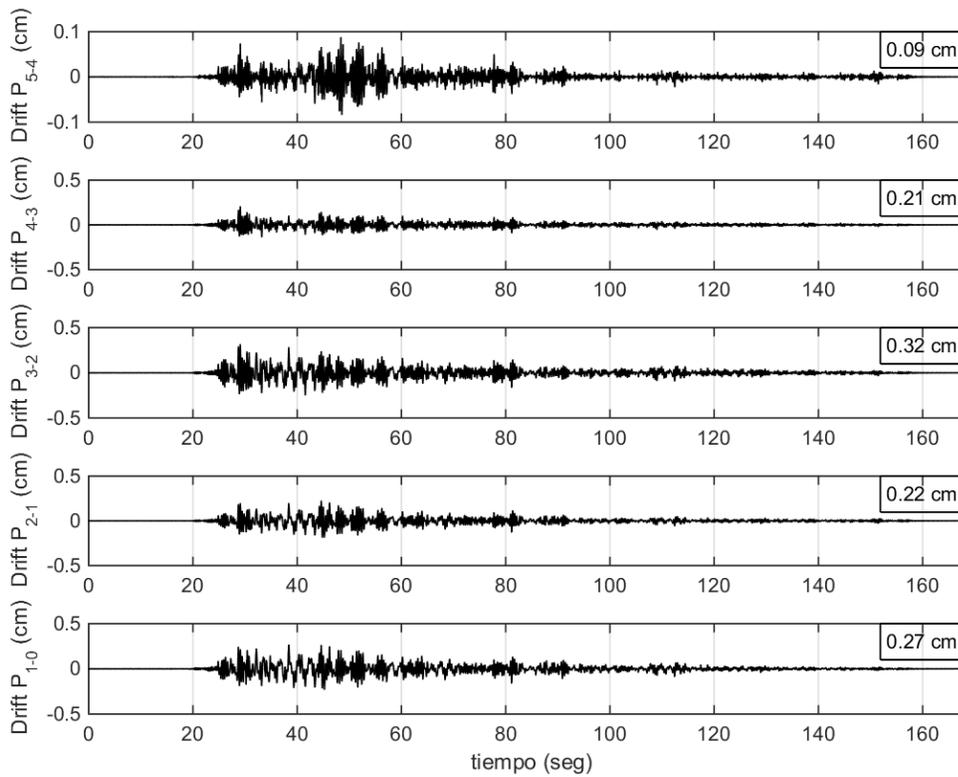


Figura 5.19. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración D.

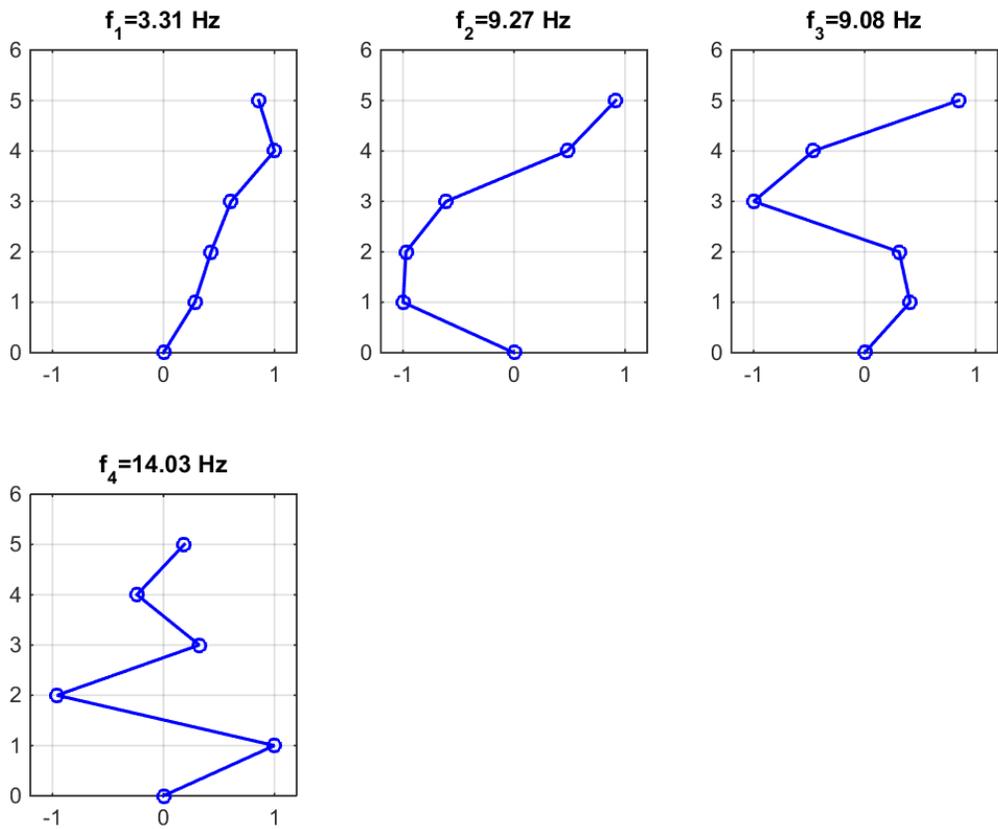


Figura 5.20. Formas Modales obtenidas del modelo - Configuración D.

5.4. Configuración E2 ⁹⁴

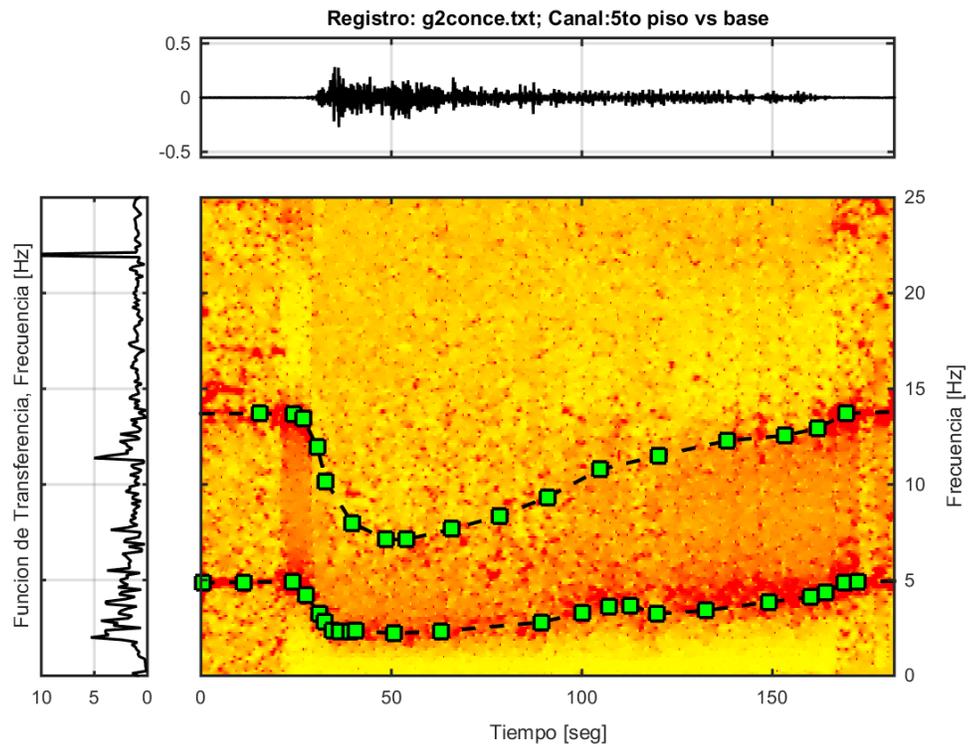


Figura 5.21. Función de Transferenciograma con Frecuencias Modales Identificadas - Configuración E2.

⁹⁴ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

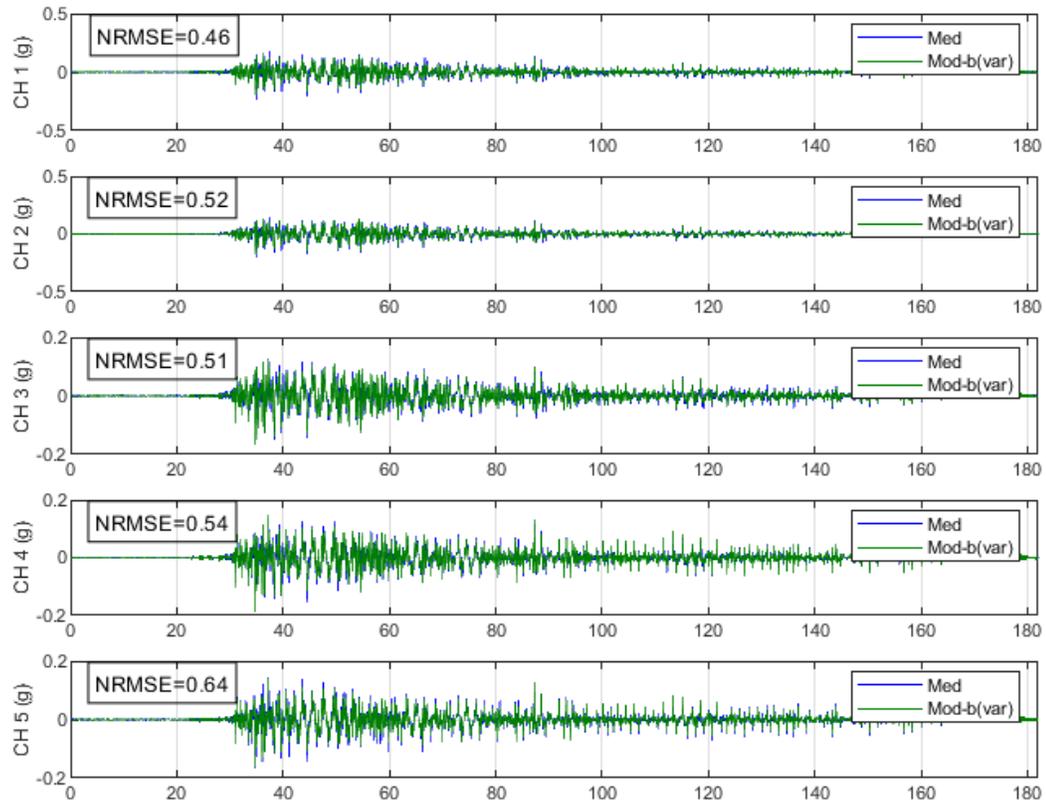


Figura 5.22. Comparación Respuesta Experimental vs Ajustada del Modelo – Configuración E2.

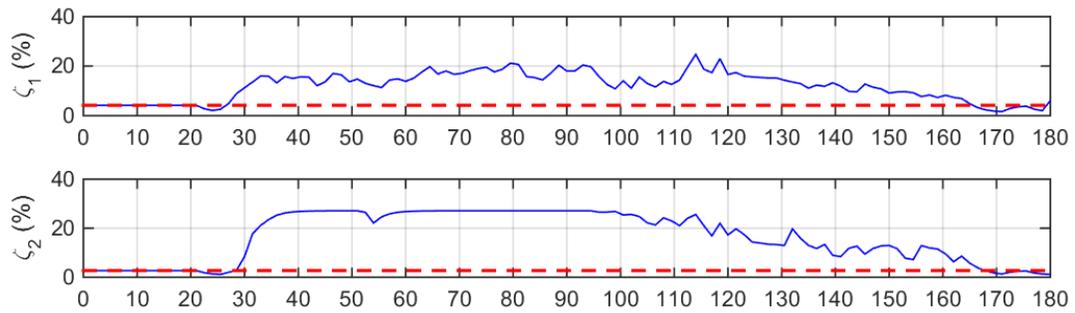


Figura 5.23. Evolución Tasas de Amortiguamiento: 3 modos identificados - Configuración E2.

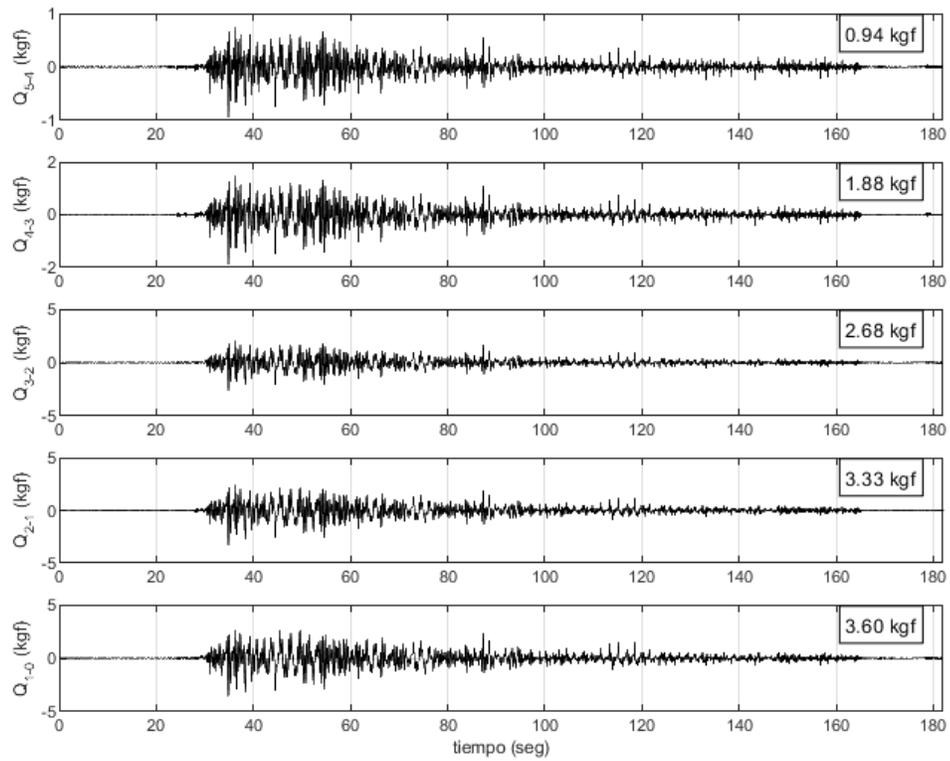


Figura 5.24. Tiempo-Historia Corte por Piso - Configuración E2.

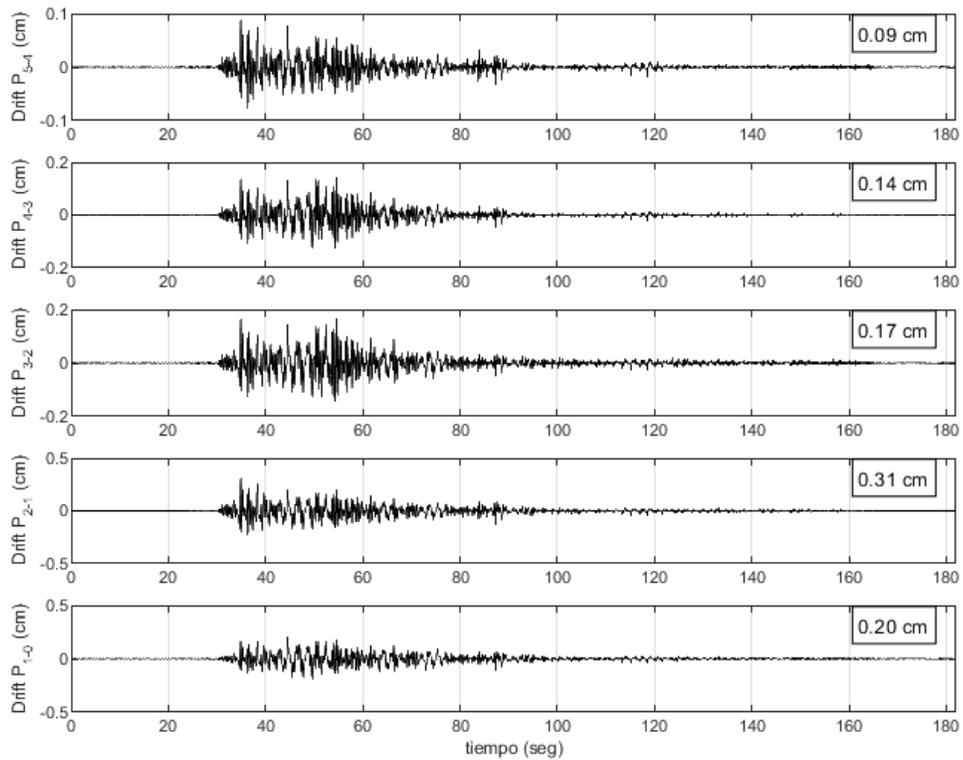


Figura 5.25. Tiempo-Historia Desplazamiento Relativo de entre Piso - Configuración E2.

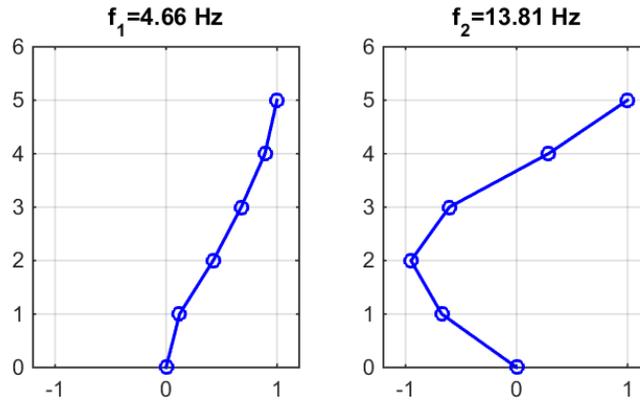


Figura 5.26. Formas Modales obtenidas del modelo - Configuración E2.

5.5. Comentarios Finales del Ajuste Teórico

En las figuras de comparación de la respuesta experimental vs ajustada del modelo, se puede apreciar como los ajustes obtenidos logran una similitud aceptable con las respuestas experimentales, diferenciándose por leves desfases producidos después del instante de mayor demanda sísmica del registro.

Además, se debe notar que la evolución temporal de las tasas de amortiguamiento es similar para todas las configuraciones en estudio, destacando que las configuraciones B2 y E2 presentan tasas de amortiguamiento altas durante más tiempo, lo que no ocurre con la configuración D cuyas tasas de amortiguamiento se reestablecen rápidamente después de la acción sísmica. Este hecho sugiere que parte de la disipación inicial de energía sísmica de la configuración B2 es debida a la interacción entre el cable y las poleas, lo cual no implica que el disipador no actúe, sino que tanto disipador como cable aportan para disipar energía sísmica.

Nótese también que las estimaciones de corte por piso obtenidas por los ajustes realizados tienen gran similitud con los experimentales, esto debido a la relación directa entre el corte por piso y las aceleraciones asociadas a dichos pisos, que como se dijo anteriormente son bastantes similares entre los valores experimentales y ajustados. Finalmente, en cuanto a los desplazamientos relativos de entre piso, los valores máximos que éstos presentan son inferiores en el ajuste teórico con respecto a los medidos experimentalmente. Sin embargo, al comparar los gráficos tiempo-historia de los resultados experimentales con los obtenidos por ajustes teóricos, se puede apreciar que en los primeros existen ciertos valores peak que

rigen la respuesta total de las configuraciones, en tanto que en los segundos dichos valores peak no se observan. La presencia de dichos valores sugiere que, a pesar de la mayor pretensión del cable presente en las configuraciones con disipadores del Tipo II, la carga no se transmite inmediatamente al sistema de disipación provocando la existencia de un efecto látigo (aunque reducido, y no perceptible, respecto a las configuraciones con disipadores del Tipo I); en cambio, los ajustes teóricos suponen la correcta transmisión de la demanda sísmica al sistema de disipación lo cual resulta en respuestas menores. Esto último, sin embargo, debe ser estudiado en mayor profundidad para lograr una correcta comprensión de este fenómeno. Otra alternativa a las diferencias se relacionaría a efectos de ruido intrínseco de los datos que pueden generar valores peaks con un cierto grado de incerteza para los datos experimentales.

Capítulo 6 Conclusiones y Comentarios Finales

En esta memoria se ha presentado el estudio de un sistema de disipación de energía sísmica compuesto por poleas y un cable conectado en serie a un disipador visco-elástico. La realización de este estudio ha sido en base a ensayos experimentales de una estructura de acero a escala de 5 GDL, bajo distintas configuraciones estructurales. La tabla siguiente resume las configuraciones estructurales estudiadas.

Tabla 6.1. Configuraciones Estructurales Estudiadas.

Configuración Estructural	Descripción
A	Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.
B	Estructura con cable, en ambas caras, instalado en serie con 1 disipador (Tipo I).
B2	Estructura con cable, en ambas caras, instalado en serie con 1 disipador (Tipo II).
C	Estructura con cables, en ambas caras, instalado con tensión que reproduzca la rigidez de la estructura cuando ésta tiene instalada la configuración B.
D	Estructura análoga a la configuración C, salvo que los cables se encuentran más tensos de tal forma que de obtener una estructura más rígida, similar a la rigidez de la estructura B2.
E	Estructura con 5 disipadores (Tipo I) instalados, en paralelo, por cada cara.
E2	Estructura con 5 disipadores (Tipo II) instalados, en paralelo, por cada cara.
F	Estructura con 3 disipadores instalados, en paralelo, por cada cara; disipadores (Tipo I) instalados en niveles 1, 3 y 5.
F2	Estructura con 3 disipadores instalados, en paralelo, por cada cara; disipadores (Tipo II) instalados en niveles 1, 3 y 5.

A las configuraciones anteriores se les realizaron ensayos del tipo pull-back y del tipo sísmico, siendo este último realizado con el registro sísmico de Concepción Centro del 27/02/2010 -también conocido como Concepción 27F-, escalado al 50%. El análisis de los

ensayos del tipo pull-back fue realizado mediante el método de Ibrahim, así como mediante un análisis del primer modo mediante decaimiento logarítmico. En tanto, los análisis de los ensayos del tipo dinámico fueron realizados mediante el método DSI, tanto para la respuesta completa de las configuraciones, así como también por pequeñas ventanas de tiempo de ésta. Adicionalmente, se han realizado estudios en base al corte presente por nivel y al desplazamiento relativo de entre pisos presentes en las distintas configuraciones, así como también se han realizado ajustes teóricos de ciertas configuraciones en estudio para contrastar los resultados experimentales con los teóricos en base a un método de ajuste temporal.

Del análisis de corte por nivel y desplazamientos relativos de entre piso, se establece la existencia de un efecto látigo presente en las configuraciones B y C, principalmente, el cual se atribuye a la baja pretensión del cable instalado y por ende la lentitud con que éste traspasa la demanda sísmica al sistema de disipación de energía. Luego, se establece que la configuración en estudio pasa a ser la configuración B2 (que posee un nivel de pretensado inicial del cable mayor), que no presenta este efecto látigo, cuyos resultados son contrastados con los obtenidos para las configuraciones A, D, E2 y F2.

Los resultados del análisis de los ensayos del tipo pull-back indican que la configuración B2 presenta un aumento en su tasa de amortiguamiento con respecto a la configuración A, superando incluso las tasas de amortiguamiento aportadas por las configuraciones D y F2 (sólo con cable o con tres disipadores, respectivamente) y siendo sólo superadas levemente por las aportadas por la configuración E2 (con cinco disipadores). Por otro lado, también reflejan que la configuración B2 presenta un aumento de sus frecuencias modales respecto a las configuraciones A, E2 y F2, siendo levemente superadas por las frecuencias modales pertenecientes a la configuración D. En tanto, los resultados de los ensayos del tipo sísmico revelan el comportamiento altamente no-lineal de las configuraciones con cable, como la B2, lo cual indica que el método DSI empleado para la respuesta completa no es suficiente para entender el comportamiento de las configuraciones en estudio, pero sí es útil para tener una idea de lo que ocurre con éstas (a excepción de la configuración A, la cual es más cercana a un comportamiento elástico y lineal). Por ello, al aplicar el método DSI por pequeñas ventanas de tiempo y al obtener el espectograma de cada configuración en estudio, es posible comprender como varían las propiedades dinámicas de las configuraciones en estudio durante el evento sísmico, de tal forma que al instante de mayor demanda sísmica se alcanzan los valores mínimos de frecuencias naturales y los valores máximos de tasas de amortiguamiento modales, análogamente se reconoce una baja variación de las formas modales de las distintas configuraciones. Sin embargo, estas

variaciones son tal que las propiedades dinámicas se reestablecen una vez terminado el evento sísmico. En otras palabras, las configuraciones en estudio, y en particular la configuración B2, son no-lineales y elásticas.

En síntesis, las conclusiones de este estudio son:

-La configuración B2 mejora ostensiblemente los resultados pertenecientes a la configuración A, estructura base, superando además los resultados de la configuración F2 y siendo comparable con los pertenecientes a la configuración E2. En general, la configuración B2 ofrece tasas de amortiguamiento de un 10 a 20% para todos los modos durante el instante de mayor demanda sísmica.

Tabla 6.2. Configuraciones Estructurales en Análisis.

Configuración Estructural	Descripción
A	Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.
B2	Estructura con cable, en ambas caras, instalado en serie con 1 disipador (Tipo II).
D	Estructura análoga a la configuración C, salvo que los cables se encuentran más tensos de tal forma que de obtener una estructura más rígida, similar a la rigidez de la estructura B2.
E2	Estructura con 5 disipadores (Tipo II) instalados, en paralelo, por cada cara.
F2	Estructura con 3 disipadores instalados, en paralelo, por cada cara; disipadores (Tipo II) instalados en niveles 1, 3 y 5.

-El sistema de disipación propuesto, e instalado en la configuración B2, produce una respuesta elástica y no-lineal. Esto es, variación de las frecuencias modales, tasas de amortiguamiento modales y formas modales de tal forma que alcanzan su máxima variación para el instante de mayor demanda sísmica para reestablecerse al final de la demanda sísmica.

-De acuerdo con los resultados obtenidos para la configuración B2, se observa que el sistema de disipación de energía propuesto aporta, durante los instantes de mayor demanda sísmica, con: aumento significativo de las tasas de amortiguamiento modales y aumento de las frecuencias modales en comparación con la estructura sin sistema de disipación. Es decir, a pesar de que en los instantes previos a la demanda

sísmica la estructura aumenta su rigidez, y por tanto sus frecuencias modales, durante el evento sísmico las frecuencias modales no se diferencian tanto de las pertenecientes a la configuración sin sistema de disipación, y sí le aporta grandes tasas de amortiguamiento.

-Se cumple con el objetivo de utilizar un sistema de disipación de energía que aporte amortiguamiento a la estructura sin utilizar elementos robustos para su instalación.

-Los cortes por nivel y desplazamientos relativos de entre piso se ven significativamente reducidos por el sistema de disipación de energía instalado en la configuración B2, con respecto a los de la configuración A, obteniendo resultados similares a los obtenidos por la configuración F2 y comparables con los de la configuración E2.

-Los ajustes teóricos realizados presentan gran similitud con los resultados experimentales obtenidos, obteniendo así una herramienta teórica con la cual predecir la respuesta del sistema de disipación de energía propuesto. En este contexto se pudo analizar la respuesta de la estructura y cómo evolucionan temporalmente las características modales de una estructura que tiene frecuencias naturales, formas modales y tasas de amortiguamiento variables en el tiempo.

-Algunas ideas para obtener resultados experimentales más precisos serían, primero, calcular y aplicar una función de transferencia entre el registro ingresado y el registro reproducido por la mesa vibratoria de tal forma de reproducir con mayor exactitud la misma demanda sísmica para todas las configuraciones en estudio; segundo, controlar la pretensión de los cables con celdas de carga o herramientas similares, de tal forma de asegurar la igualdad en este ítem para todas las configuraciones.

En conjunto con las conclusiones recién presentadas se ha de destacar los siguientes puntos:

-Aunque la configuración D presenta altas tasas de amortiguamiento, se debe tener presente que al tratarse de una estructura a escala la presencia del cable tiene un mayor impacto en el aumento de rigidez que el que tendría en una estructura real y, por tanto, el aumento en las tasas de rigidez no sería tan ostensible como el presenciado en los resultados para esta configuración.

-Las razones por las que las propiedades dinámicas varían de la forma en que lo hacen para la configuración B2 no son del todo claras, sin embargo, al notar que este fenómeno se reproduce, en mayor o menor medida, en las demás configuraciones en estudio (exceptuando a la configuración A), es que se puede suponer que la

presencia del cable tiene relación con este fenómeno (i.e., la fricción del cable y las poleas). La influencia que este elemento estructural pueda tener sobre la respuesta de la estructura debiera ser estudiada en mayor detalle para lograr una correcta comprensión de lo que ocurre con el conjunto estructura-cable y con la interacción cable-polea.

-Así mismo, se sugiere estudiar al detalle el amortiguador a emplear ya que son las propiedades de este elemento de las que depende el sistema de disipación propuesto para lograr el éxito en su tarea. Adicionalmente, se debe tener presente que las variaciones en las propiedades dinámicas podrían estar influenciadas por las propiedades dinámicas propias del amortiguador empleado, por lo que también es importante comprender al detalle el funcionamiento del conjunto estructura-cable-amortiguador. En este sentido se sugiere realizar modelos de elementos finitos detallados de la estructura, considerando el comportamiento no-lineal del sistema de cable-disipador.

-Se propone además realizar modelaciones en modelos de elementos finitos que incluyan el comportamiento no-lineal del cable y posiblemente la interacción entre cable y poleas.

Finalmente, destacar nuevamente que el sistema de disipación propuesto e instalado en la configuración B2 implica emplear un sistema de un único amortiguador, y que por tanto reduce la cantidad de estos elementos empleados para reducir la respuesta sísmica de una estructura, que no requiere de elementos robustos para su instalación y que, además, aporta con un aumento ostensible de las tasas de amortiguamiento sin aumentar significativamente las frecuencias modales de la estructura.

Capítulo 7 Bibliografía

Astroza, R., Ebrahimian H., P. Conte, J., I. Restrepo, J., ..., & C. Hutchinson, T. (2015). System Identification of a Full-Scale-Five-Story Reinforced Concrete Building Tested on the NEES-UCSD Shake Table. *Structural Control and Health Monitoring*, pp. 535-559. Doi:10.1002/stc.1778.

Constantinou, M.C. & Symans, M.D. (1992). *Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers*. National Center for Earthquake Engineering Research.

Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción. (2012). *Protección Sísmica de Estructuras, Sistema de Aislación Sísmica y Disipación de Energía*. (N° 29).

Díaz, P. (2017). *Análisis de Estructuras Aisladas con el Método de Múltiples Sub-Estructuras*. Memoria de Pregrado, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago, Chile. Pp. 48.

Fu, Y. & Kasai, K. (1998). *Comparative Study of Frames using Viscoelastic and Viscous Dampers*. *J. Struct. Eng.*, 124 (5), pp. 513-522.

Grigorian, C.E., Yang, T.S & Popov, E.P. (1993). *Slotted Bolted Connection Energy Dissipators*. EERI. *Earthquake Spectra*, 9 (3), pp. 491-504.

Gutiérrez Lihn, G. (2016). *Identificación de las Propiedades Dinámicas Variantes e Invariantes en el Tiempo de un Edificio de 5 Pisos ensayado en Mesa de Vibrar*. Memoria de Pregrado, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Santiago, Chile.

Hernández Prado, F. (2009). *Análisis de Métodos de Identificación de Variación de Propiedades Dinámicas*. Tesis de magister, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago, Chile.

Lorca Norambuena, N. (2004). *Desarrollo de un Modelo Analítico para la Identificación de las Propiedades Dinámicas de las Estructuras, mediante Pruebas de Impacto Controladas*. Memoria de Pregrado, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago, Chile.

Moroni, M.O., Herrera, R. & Sarrazin, M. (2008). *Testing of Cu-Based SMA Seismic Energy Dissipation Devices*. Universidad de Chile.

- Sabelli, R., Mahin, S. & Chang, C. (2003). *Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces*. *Engineering Structures*, 25, pp. 655-666.
- 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*, 26, pp. 617-635.
- Takewaki, I. (1997). *Optimal Damper Placement for Minimum Transfer Functions*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, pp. 1113-1124.
- Van Overschee, P. & De Moor, B. (1996). *Subspace Identification for Linear Systems*. Belgium: Kluwer Academic Publishers.
- Versluys Dominguez, A. (2017). *Diseño y Construcción de una Maqueta para Ensayos Estáticos y Dinámicos de Estructuras*. Memoria de Pregrado, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Santiago, Chile.
- Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Thompson, C.L. & Alonso, L.J. (1991). *Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices*. EERI. *Earthquake Spectra*, 7 (4), pp. 563-604.
- Xu, Z.-D., Zhao, H.-T. & Li, A.-Q. (2004). *Optimal Analysis and Experimental Study on Structures with Viscoelastic Dampers*. *Journal of Sound and Vibration*, 273, pp. 607-618.

Capítulo 8 Anexos

8.1. Anexo A: Resultados mediante Ibrahim

En el presente anexo se presentan todos los resultados obtenidos mediante el método de Ibrahim, representados en formas modales y las tasas de amortiguamiento respectivas.

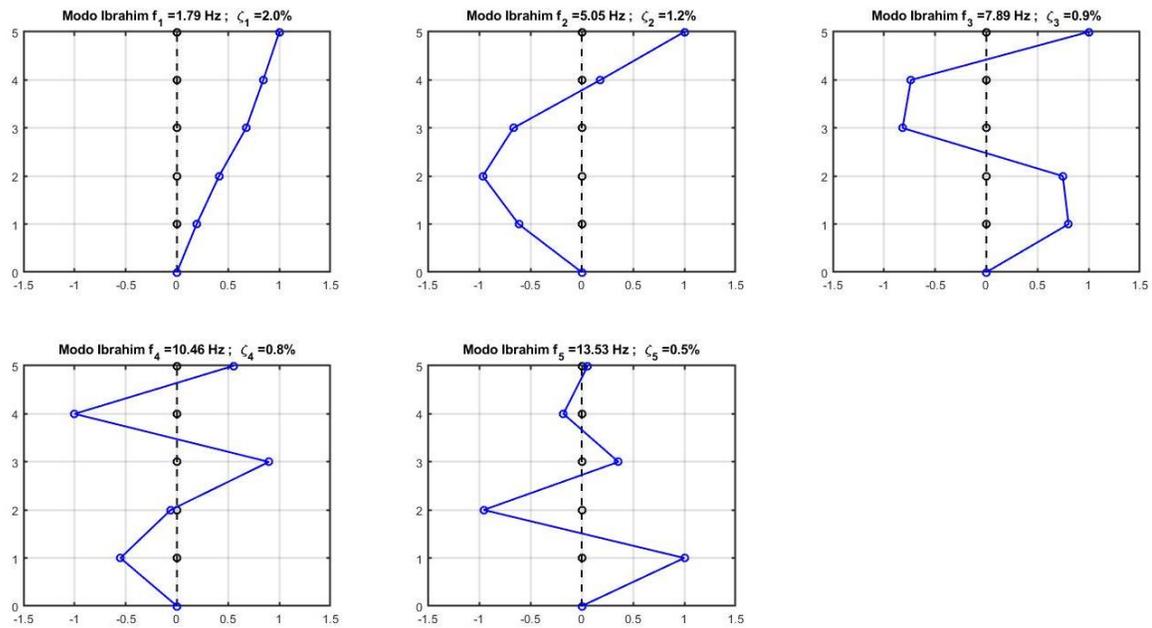


Figura 8.1. Formas Modales, Ibrahim - Configuración A. ⁹⁵

⁹⁵ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

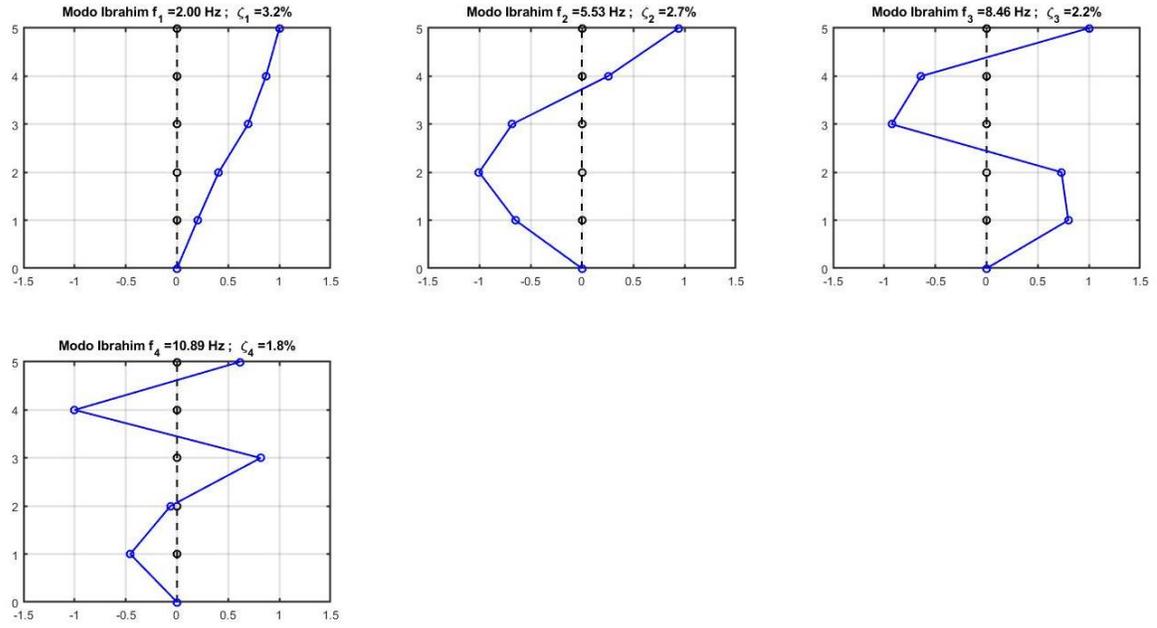


Figura 8.2. Formas Modales, Ibrahim - Configuración B. ⁹⁶

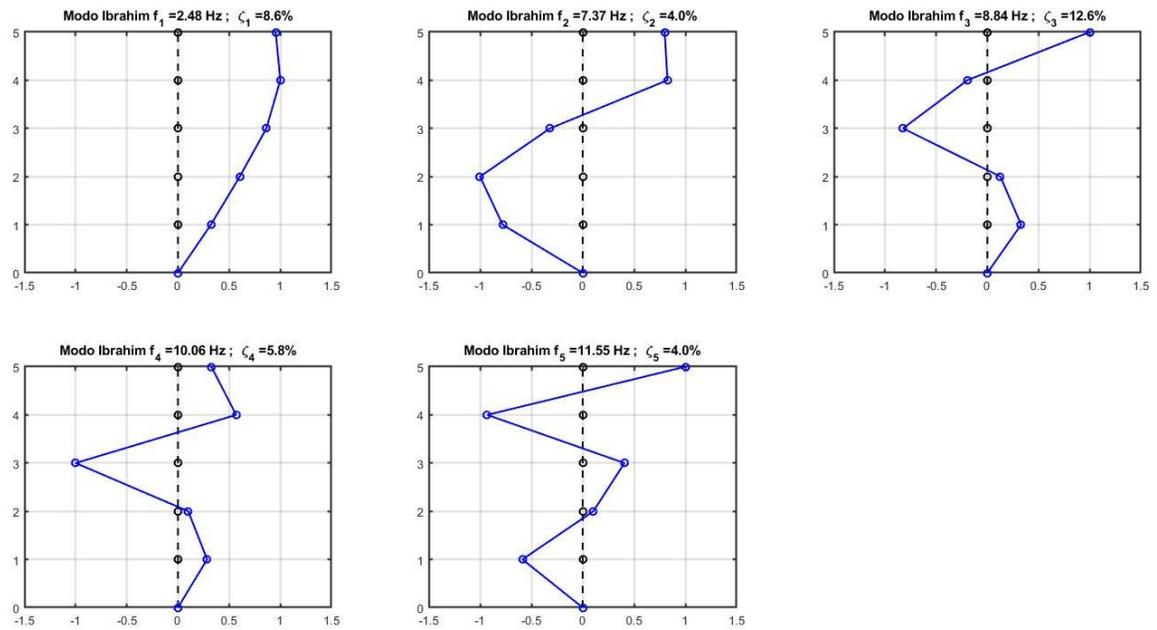


Figura 8.3. Formas Modales, Ibrahim - Configuración B2. ⁹⁷

⁹⁶ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

⁹⁷ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

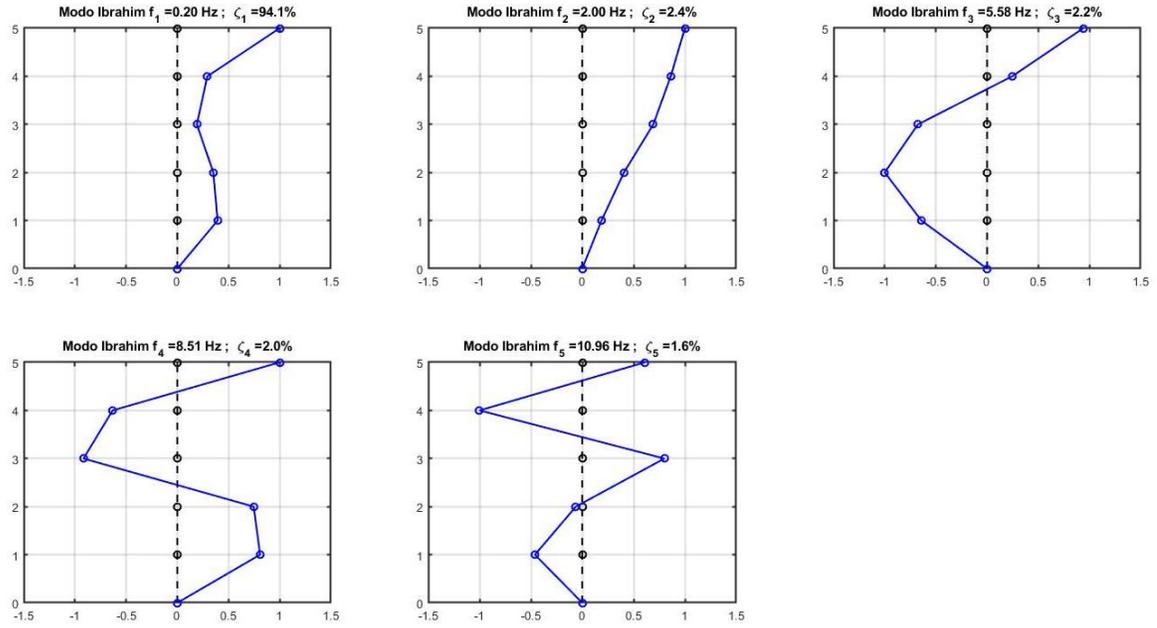


Figura 8.4. Formas Modales, Ibrahim - Configuración C. ⁹⁸

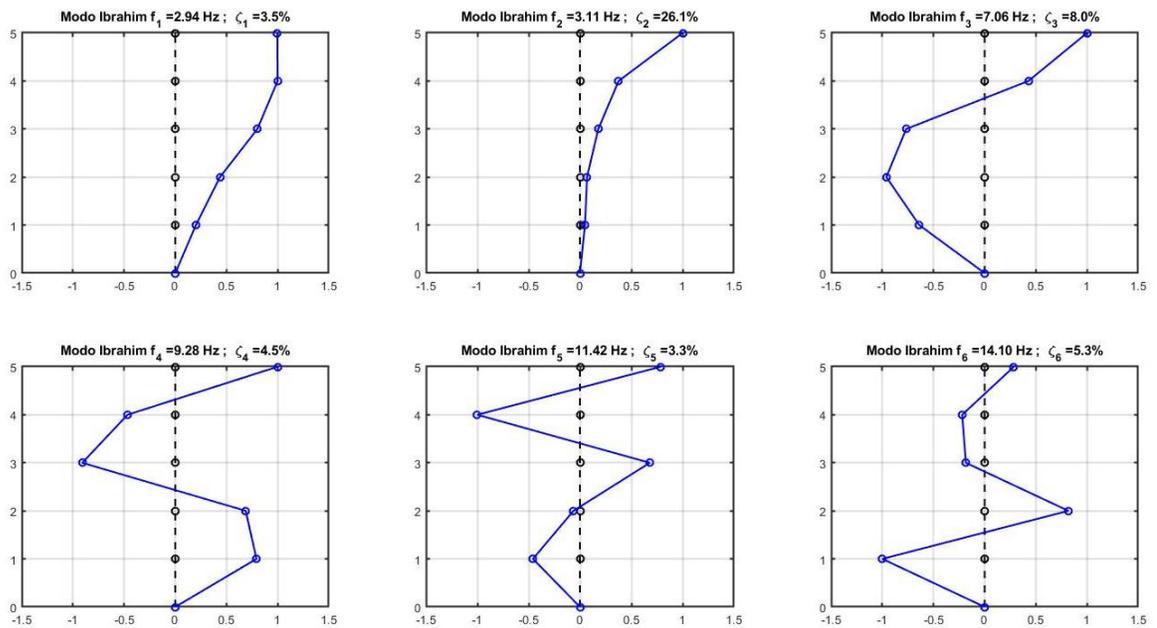


Figura 8.5. Formas Modales, Ibrahim - Configuración D. ⁹⁹

⁹⁸ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

⁹⁹ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

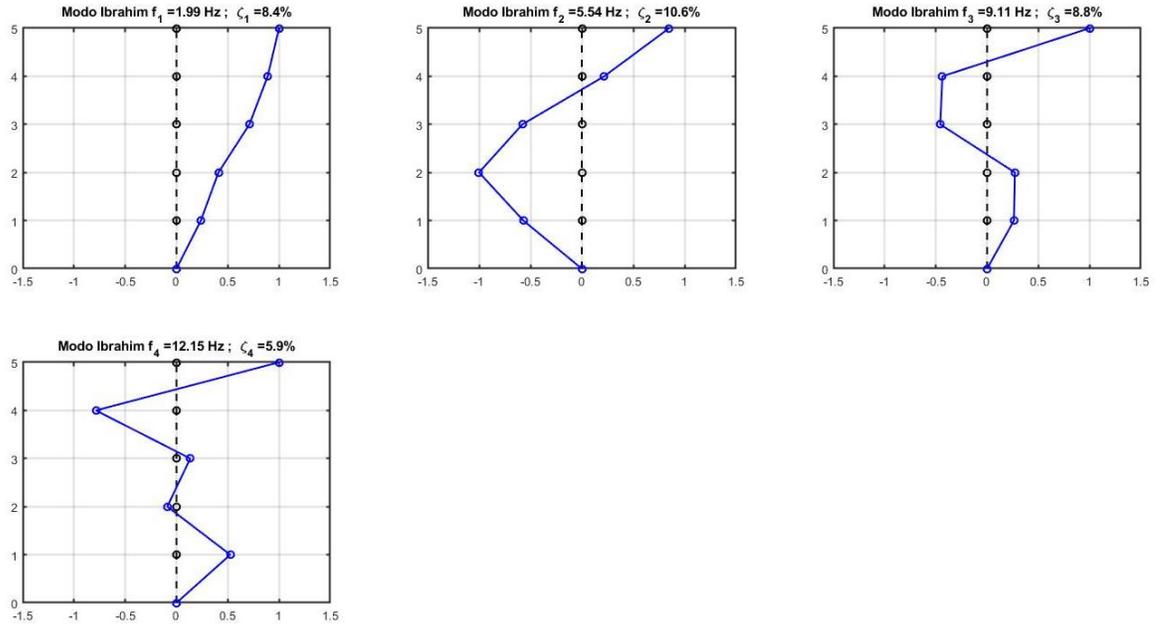


Figura 8.6. Formas Modales, Ibrahim - Configuración E. ¹⁰⁰

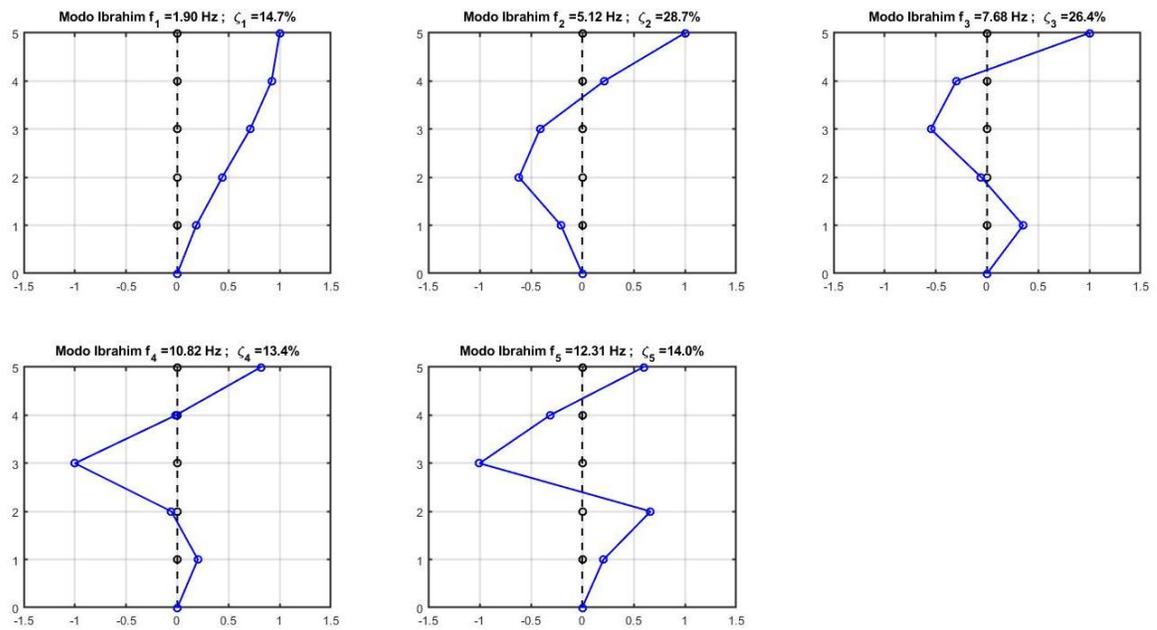


Figura 8.7. Formas Modales, Ibrahim - Configuración E2. ¹⁰¹

¹⁰⁰ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

¹⁰¹ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

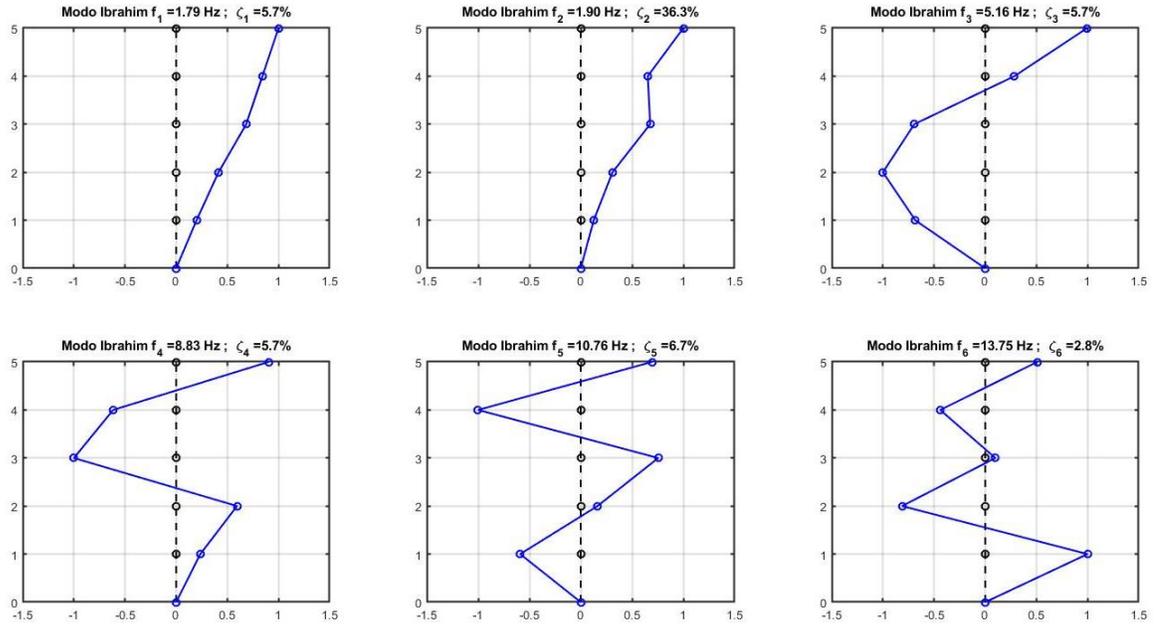


Figura 8.8. Formas Modales, Ibrahim - Configuración F. ¹⁰²

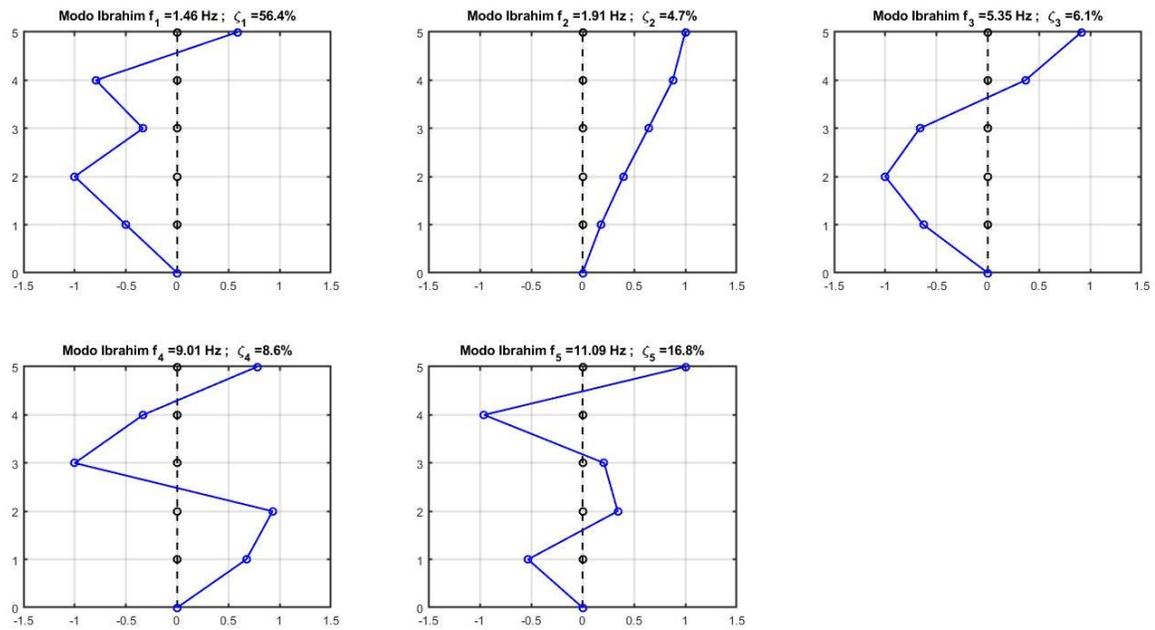


Figura 8.9. Formas Modales, Ibrahim - Configuración F2. ¹⁰³

¹⁰² Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

¹⁰³ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

8.2. Anexo B: Análisis en Frecuencia, Ensayos Pull-Back

El presente anexo contiene el análisis en frecuencia de los ensayos del tipo pull-back. Los resultados de este análisis son contrastados con los resultados obtenidos mediante el método de Ibrahim para corroborar la veracidad de uno y el otro. Sin embargo, debido al largo de las ventanas estudiadas para los ensayos pull-back, sólo se consideran como resultado verídico las frecuencias obtenidas mediante esta metodología.

En las figuras siguientes, cada canal representa un nivel de la estructura, los cuales se resumen en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. Relación entre Canales y la Estructura - Análisis de Frecuencia.	
Número Canal	Correspondencia en la Estructura
Canal 1	Respuesta 5° Nivel
Canal 2	Respuesta 4° Nivel
Canal 3	Respuesta 3° Nivel
Canal 4	Respuesta 2° Nivel
Canal 5	Respuesta 1° Nivel
Canal 6	Entrada en la Base

8.2.1. Configuración A ¹⁰⁴

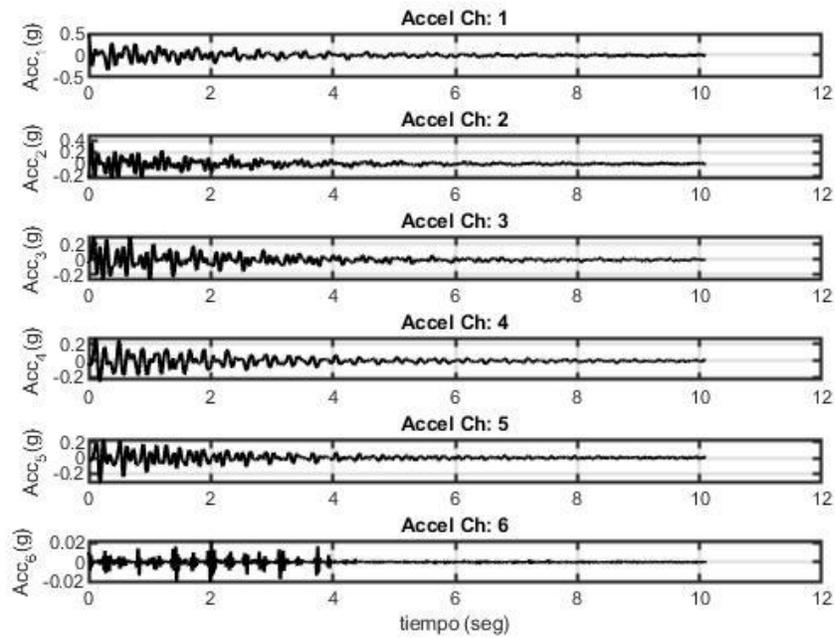


Figura 8.10. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración A.

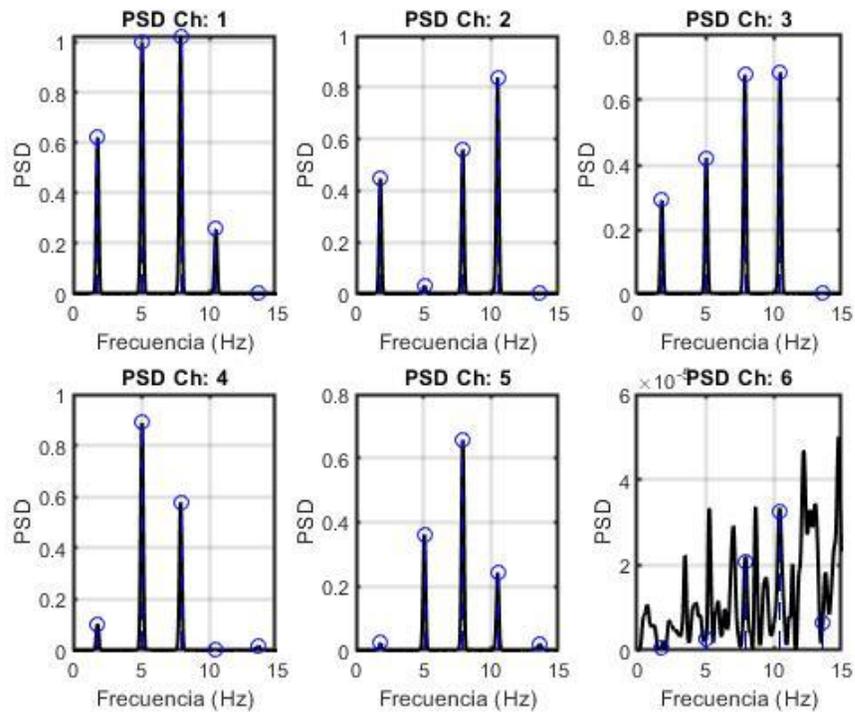


Figura 8.11. Espectro de Potencia - Configuración A.

¹⁰⁴ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

8.2.2. Configuración B ¹⁰⁵

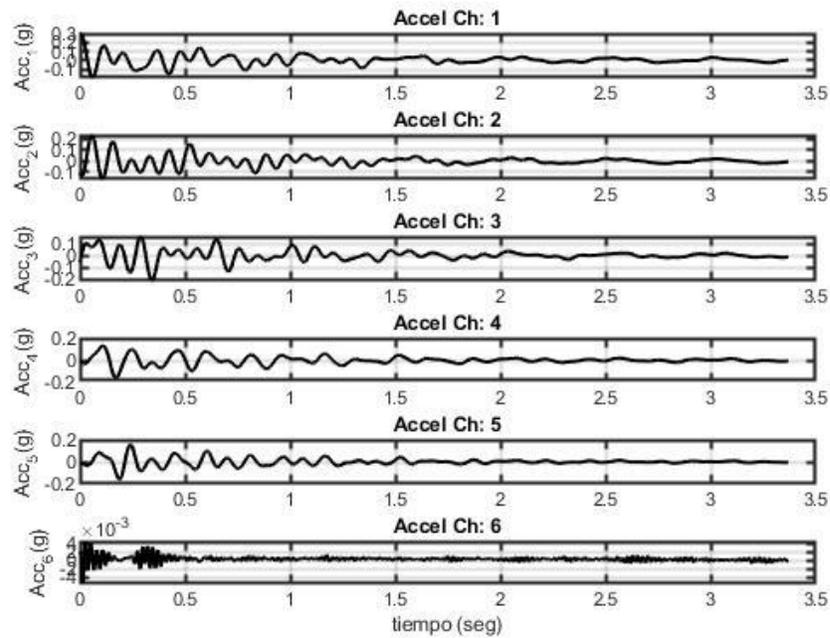


Figura 8.12. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración B.

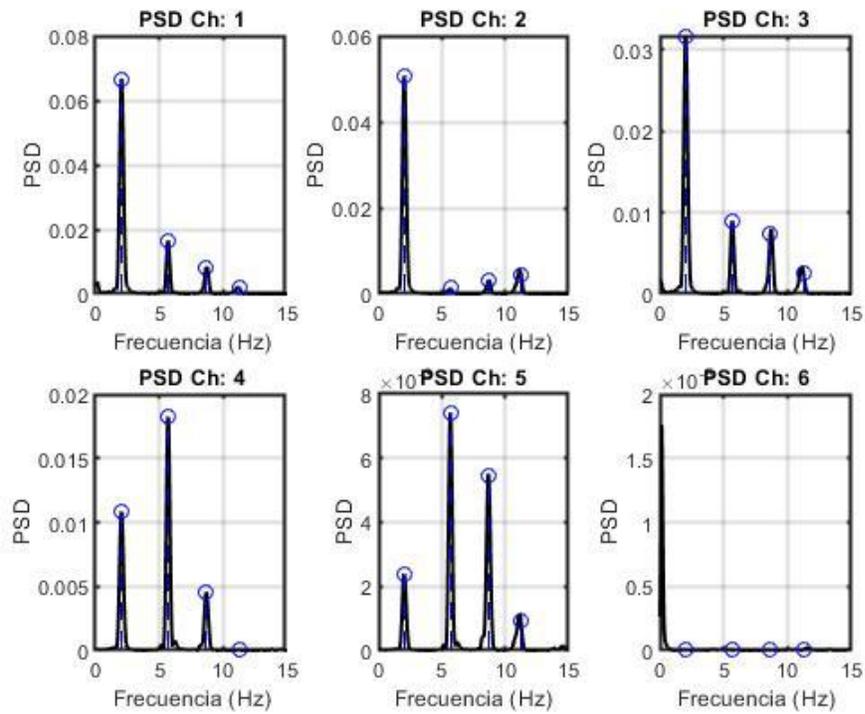


Figura 8.13. Espectro de Potencia - Configuración B.

¹⁰⁵ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

8.2.3. Configuración B2¹⁰⁶

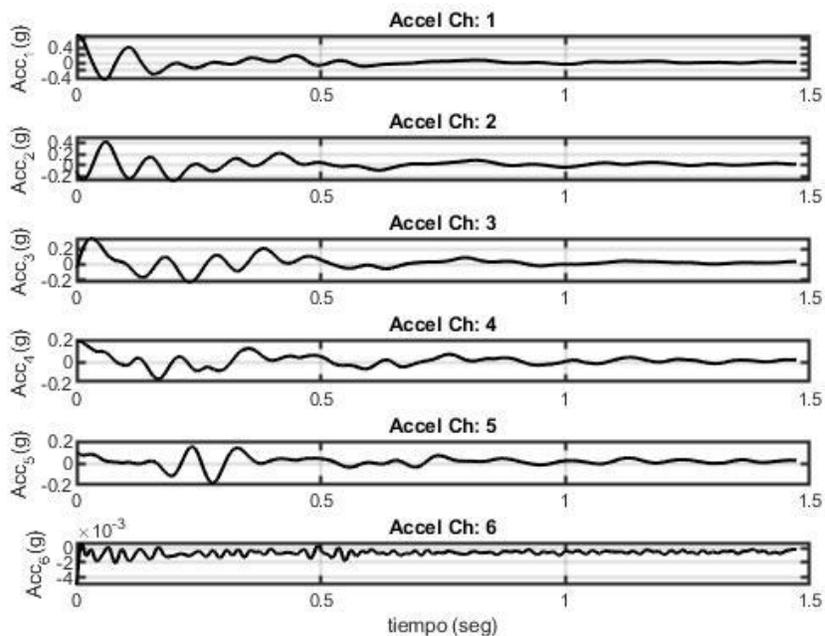


Figura 8.14. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración B2.

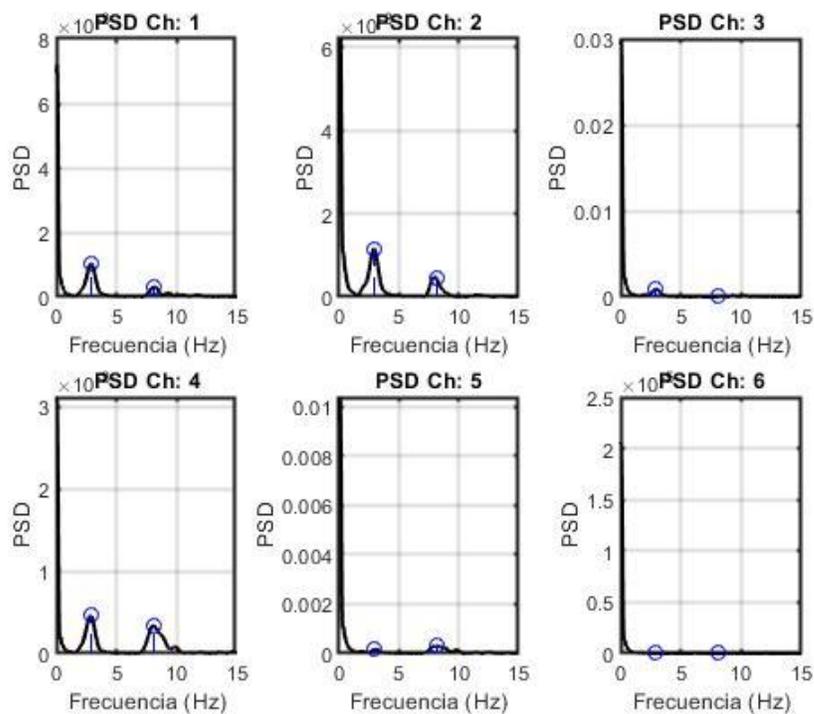


Figura 8.15. Espectro de Potencia - Configuración B2.

¹⁰⁶ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

8.2.4. Configuración C ¹⁰⁷

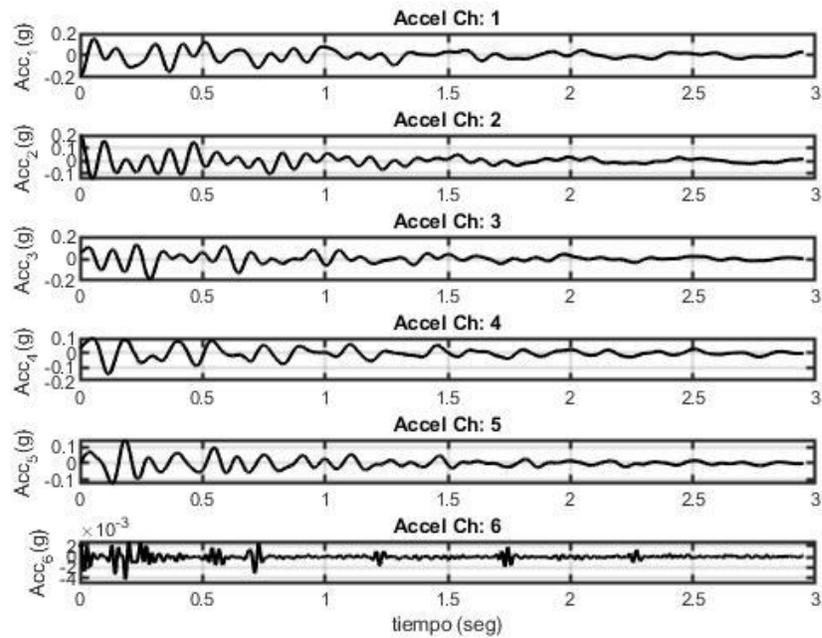


Figura 8.16. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración C.

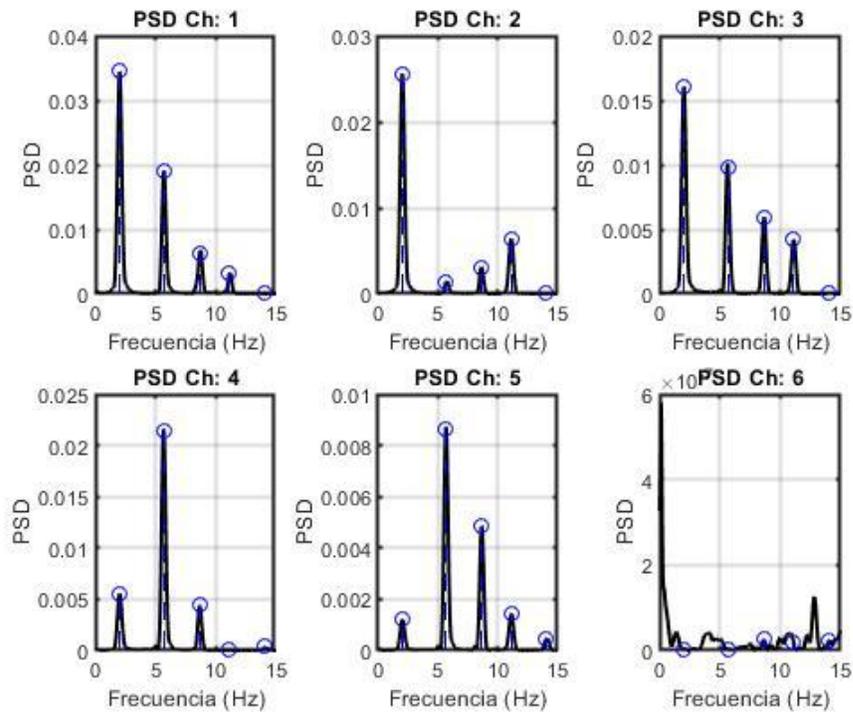


Figura 8.17. Espectro de Potencia - Configuración C.

¹⁰⁷ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

8.2.5. Configuración D ¹⁰⁸

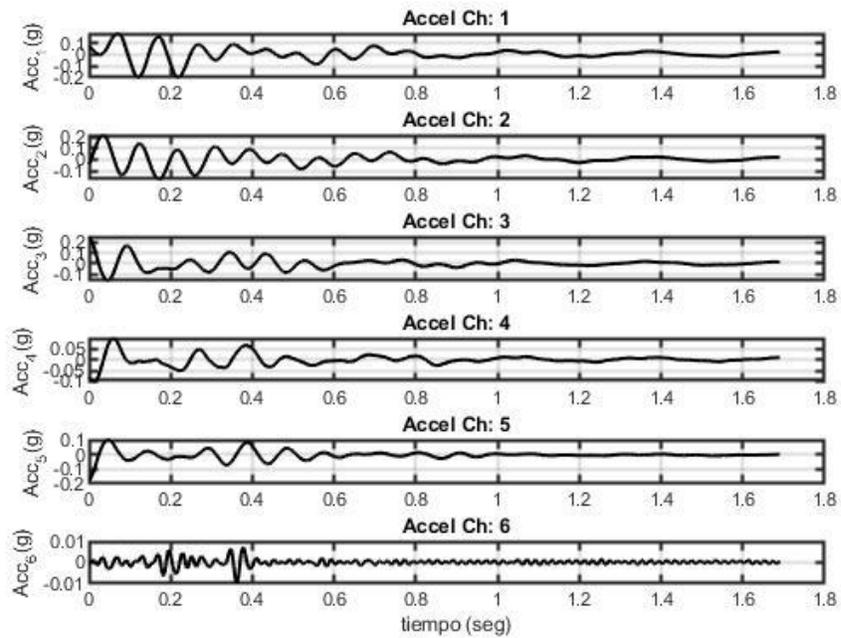


Figura B.8.18. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración D.

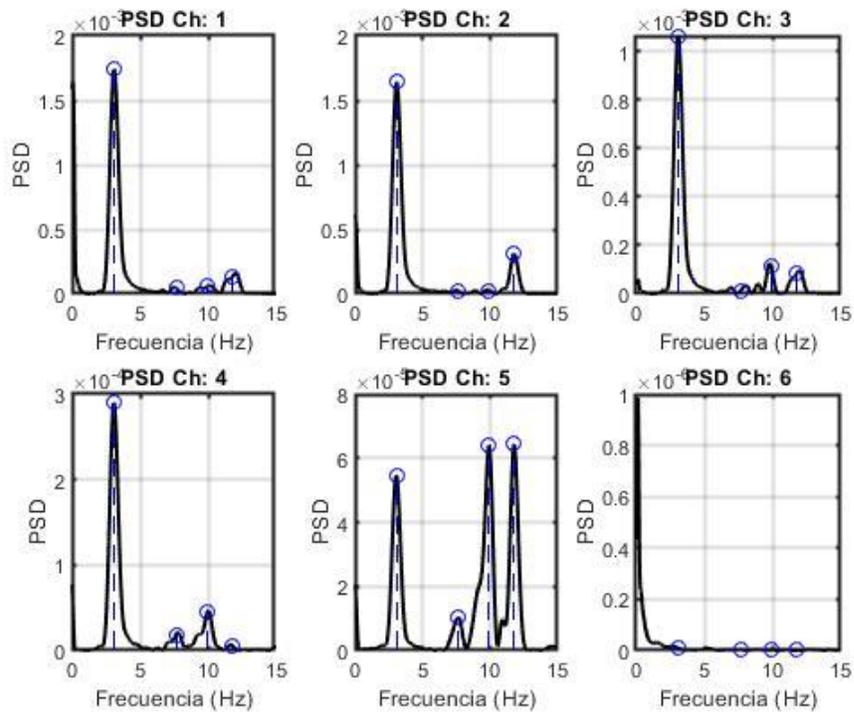


Figura B.8.19. Espectro de Potencia - Configuración D.

¹⁰⁸ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

8.2.6. Configuración E¹⁰⁹

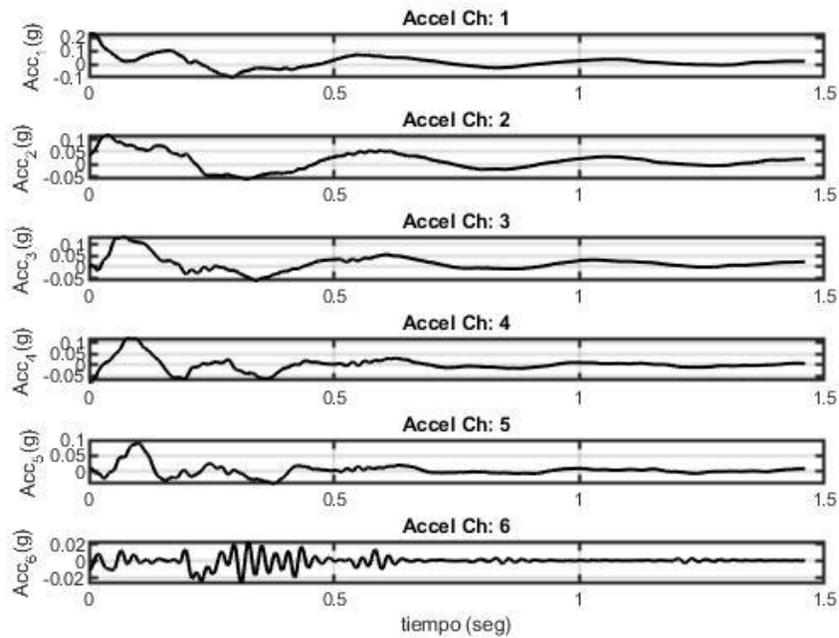


Figura B.8.20. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración E.

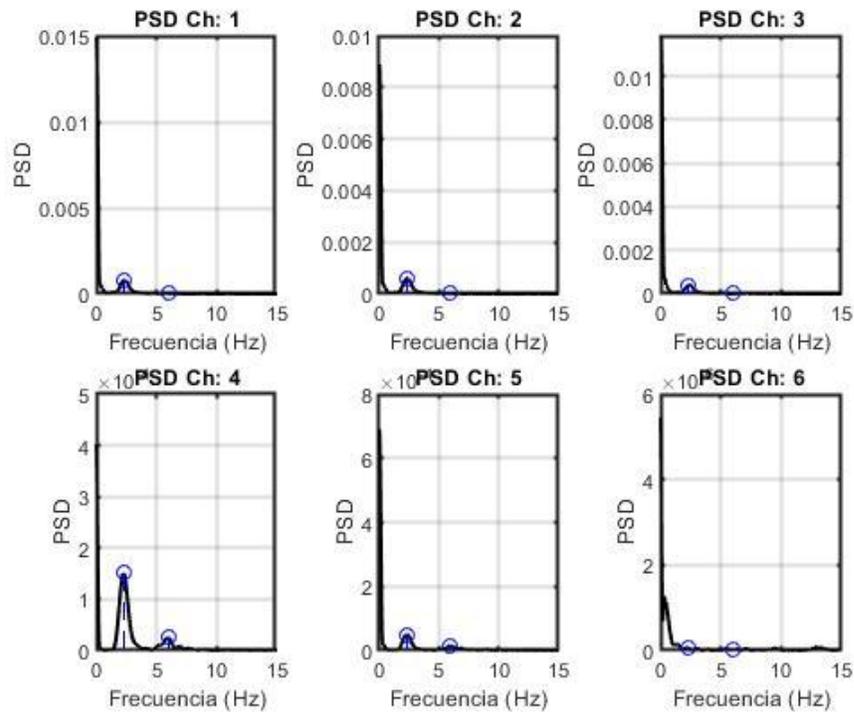


Figura B.8.21. Espectro de Potencia - Configuración E.

¹⁰⁹ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

8.2.7. Configuración E2 ¹¹⁰

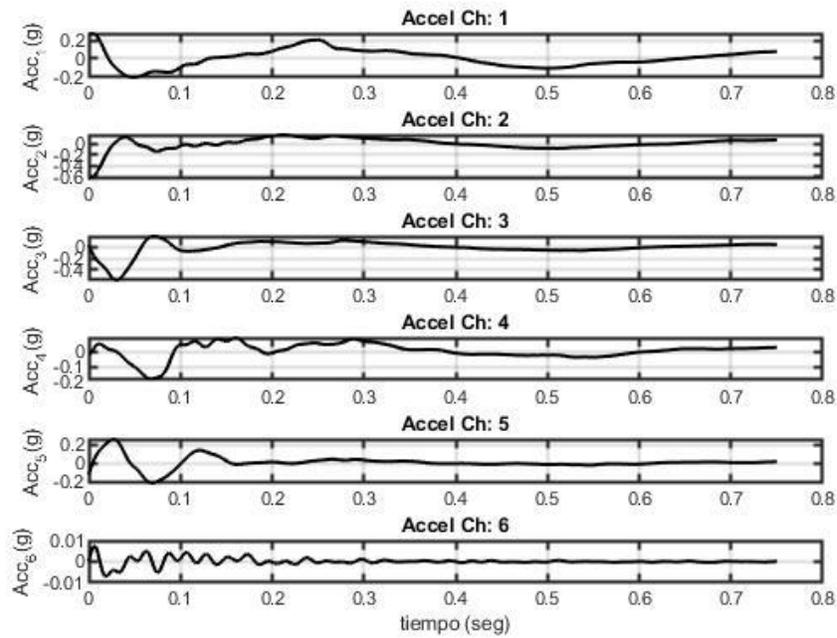


Figura B.8.22. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración E2.

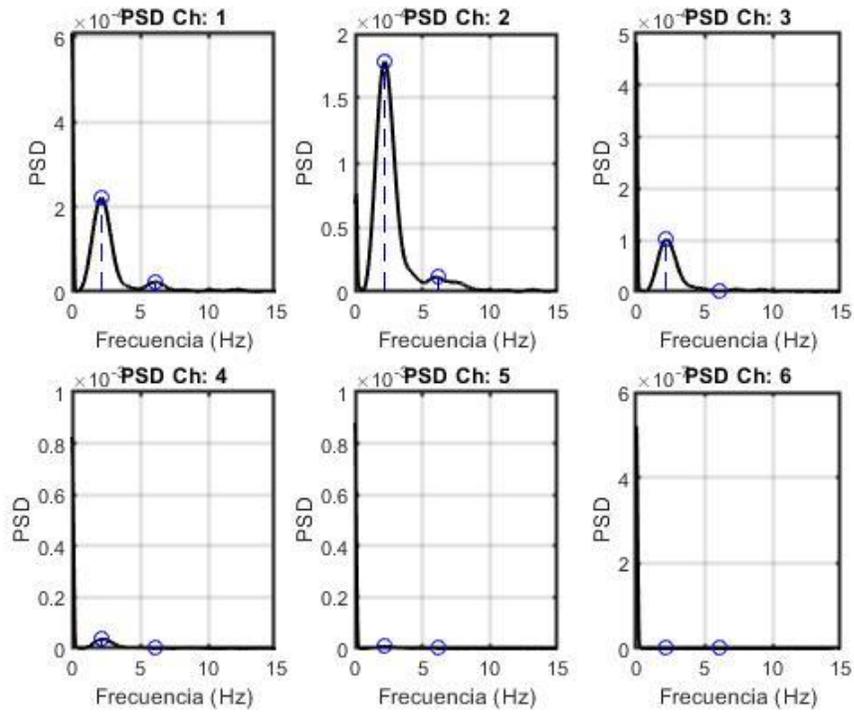


Figura B.8.23. Espectro de Potencia - Configuración E2.

¹¹⁰ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

8.2.8. Configuración F¹¹¹

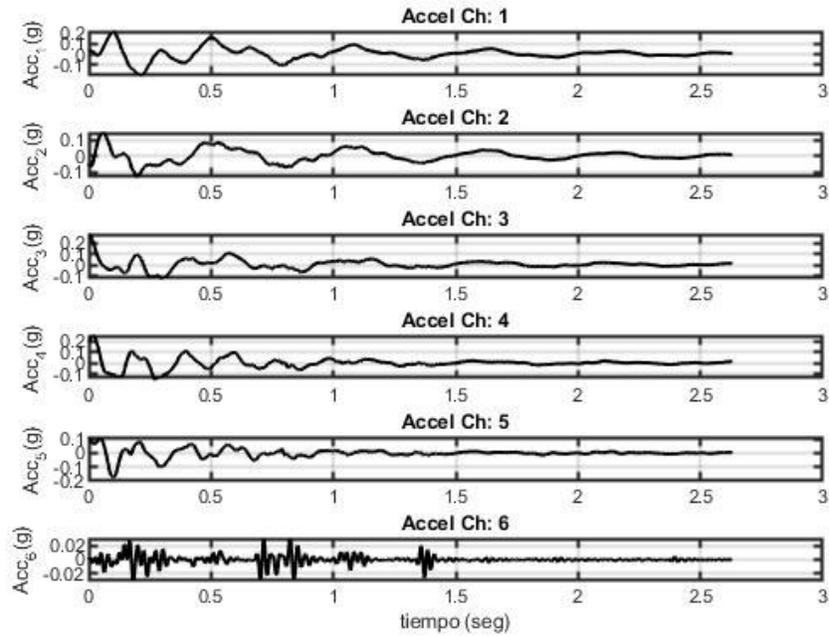


Figura B.8.24. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración F.

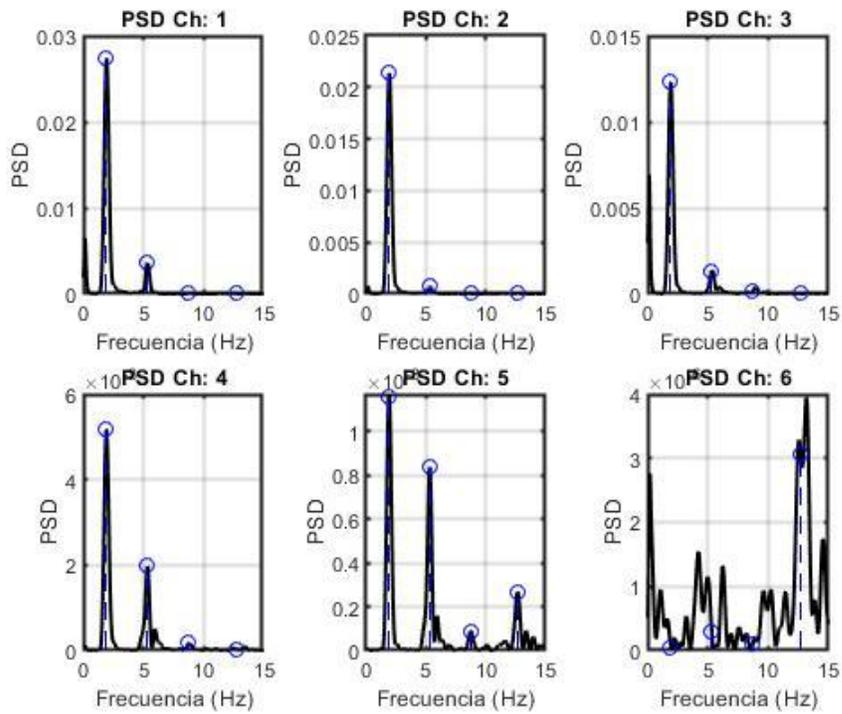


Figura B.8.25. Espectro de Potencia - Configuración F.

¹¹¹ Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

8.2.9. Configuración F2 ¹¹²

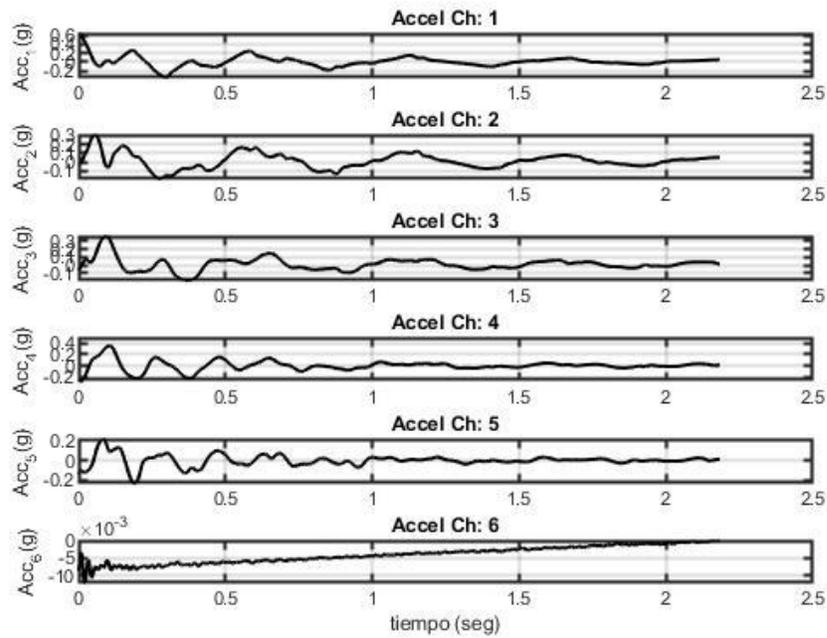


Figura B.17. Registro de Aceleraciones, Ensayos Pull-Back - Configuración F2.

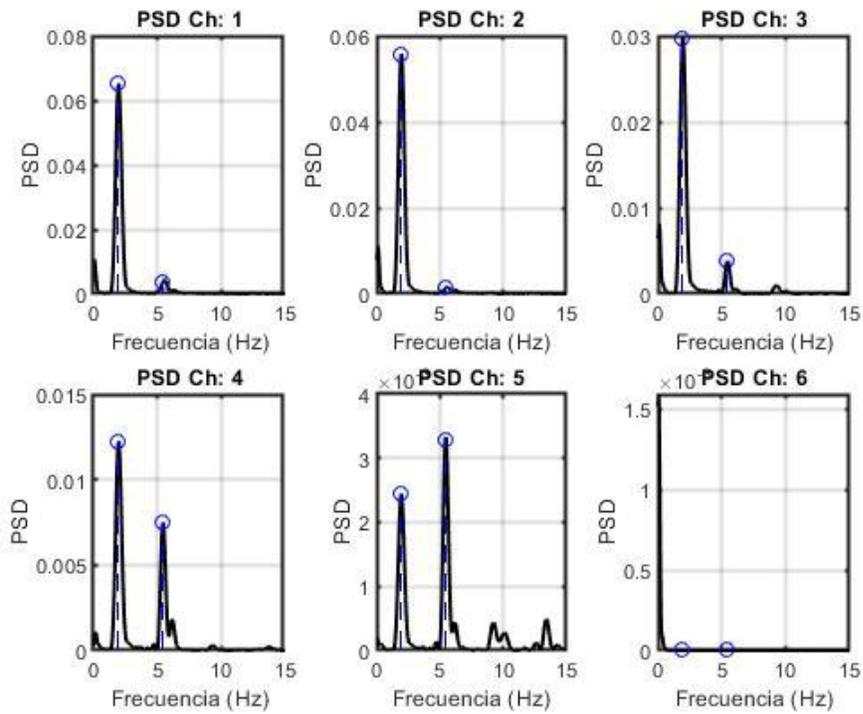


Figura B.18. Espectro de Potencia - Configuración F2.

¹¹² Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

8.3. Anexo C: Resultados mediante DSI

8.3.1. Configuración A ¹¹³

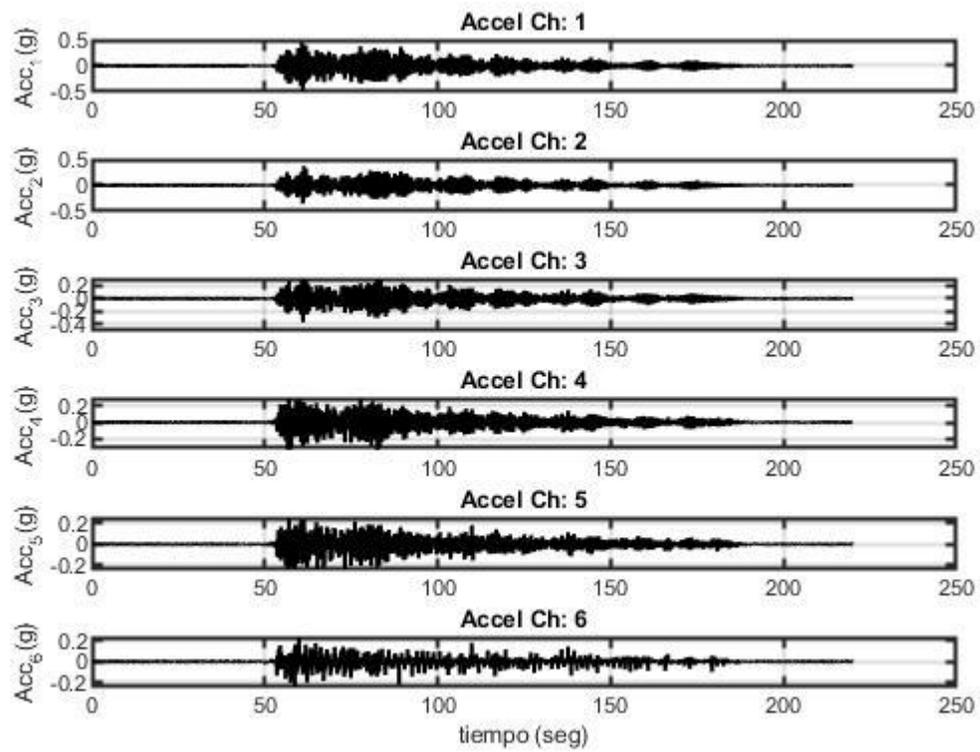


Figura 8.26. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración A.

¹¹³ Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

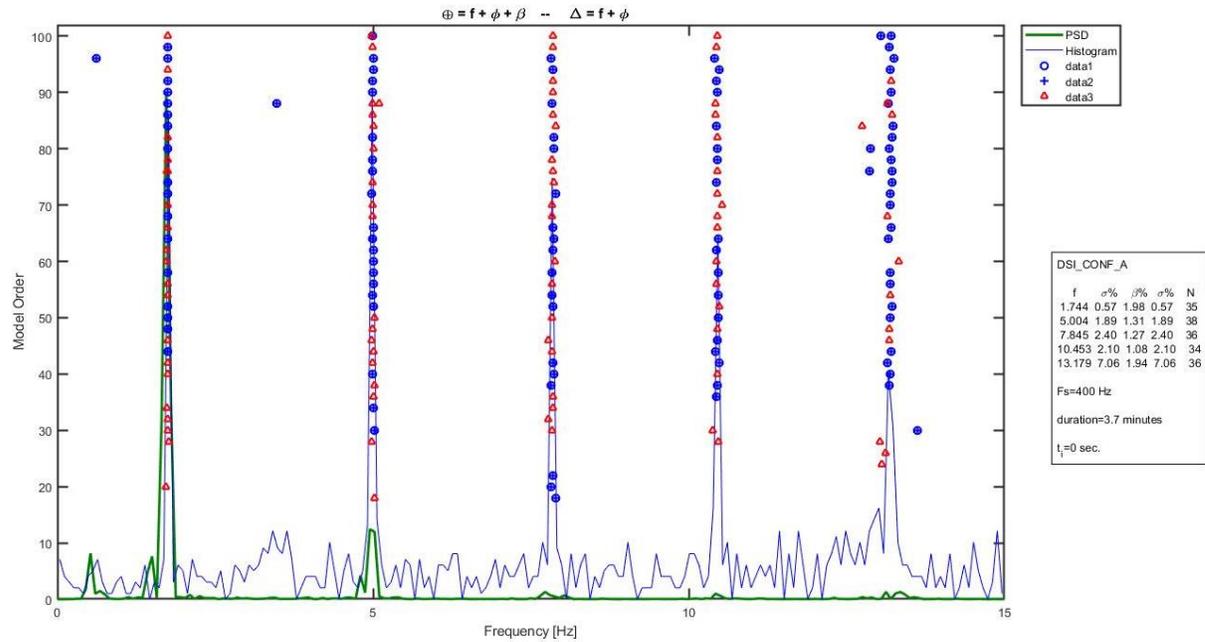


Figura 8.27. Diagrama de Estabilidad - Configuración A.

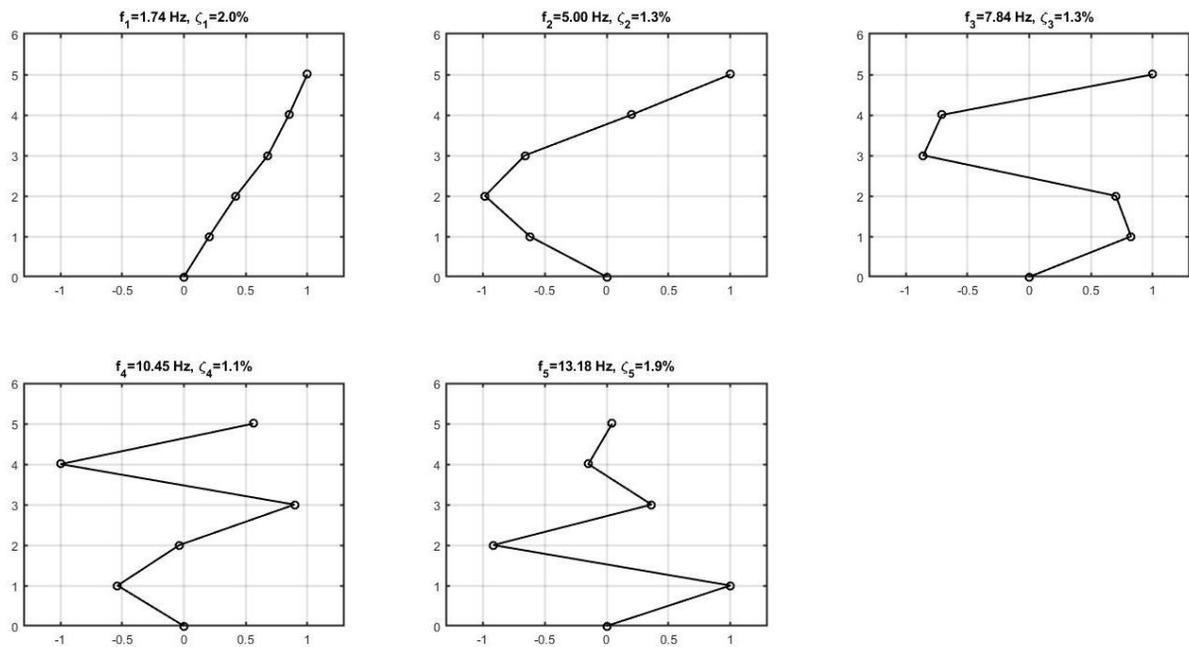


Figura 8.28. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración A.

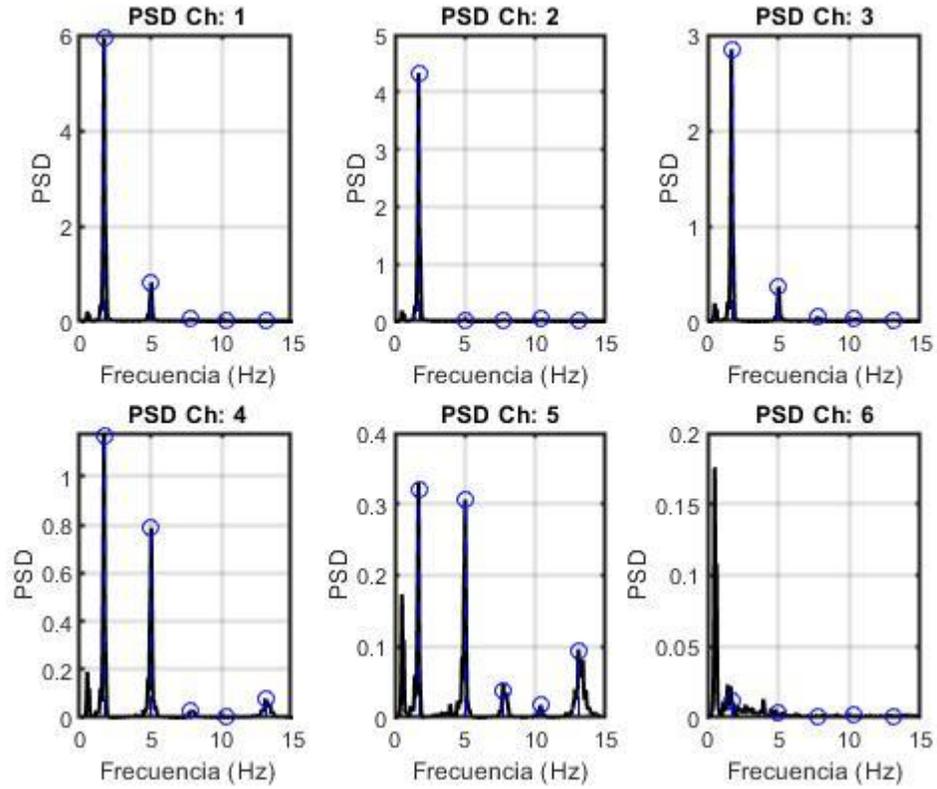


Figura 8.29. Espectro de Potencia - Configuración A.

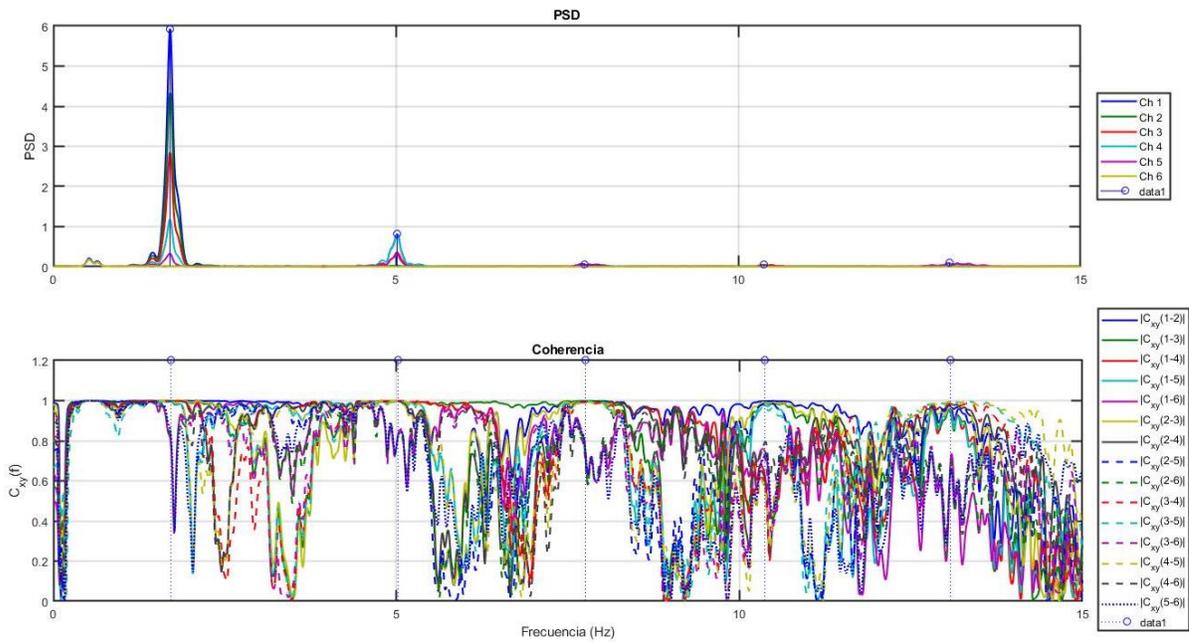


Figura 8.30. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración A.

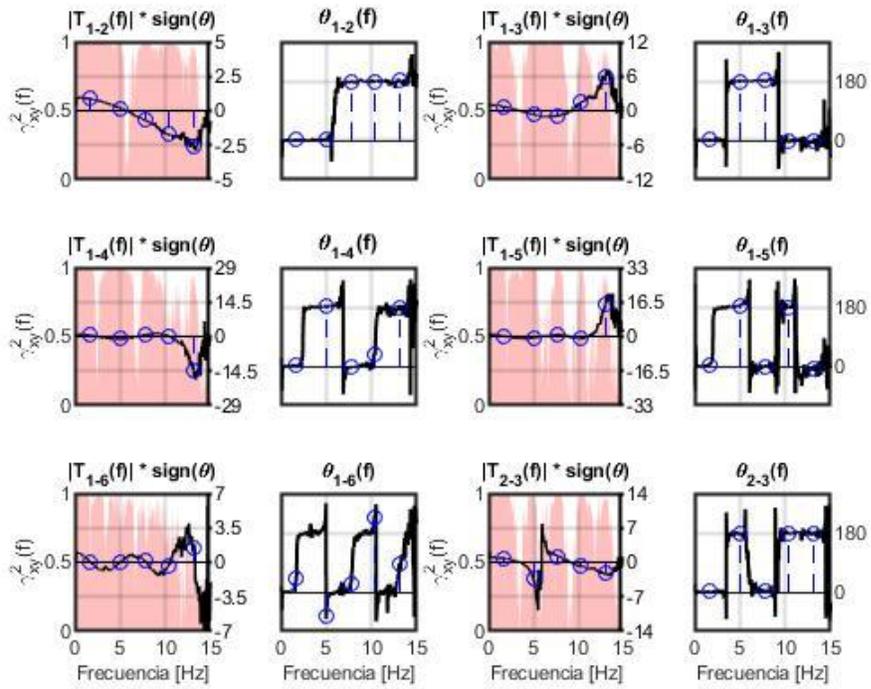


Figura 8.31. Función de Transferencia (1) - Configuración A.

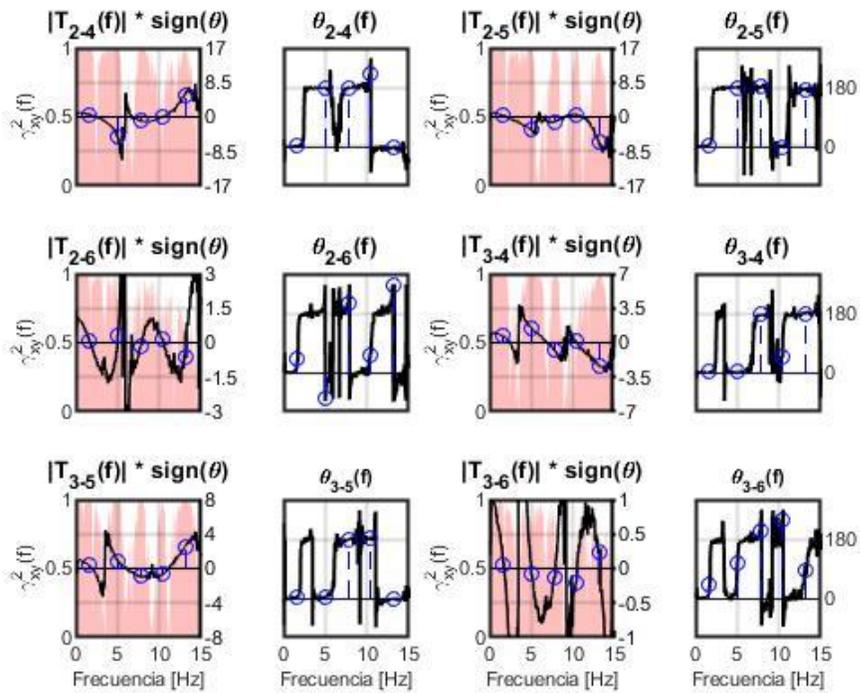


Figura 8.32. Función de Transferencia (2) - Configuración A.

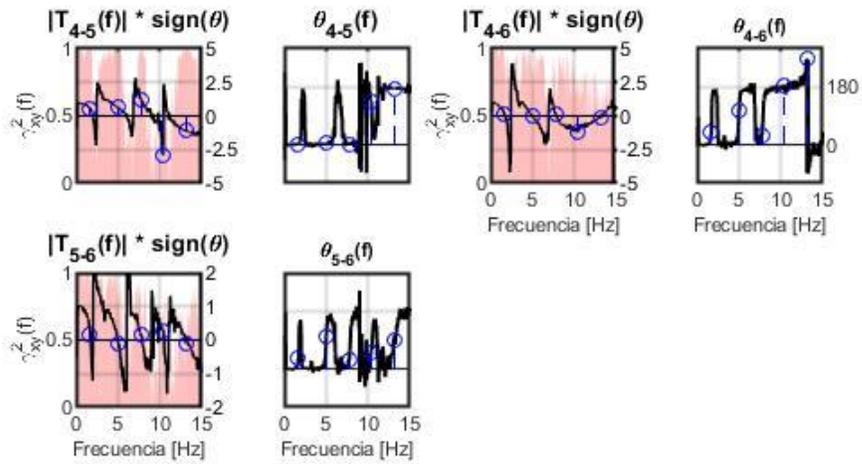


Figura 8.33. Función de Transferencia (3) - Configuración A.

8.3.2. Configuración B ¹¹⁴

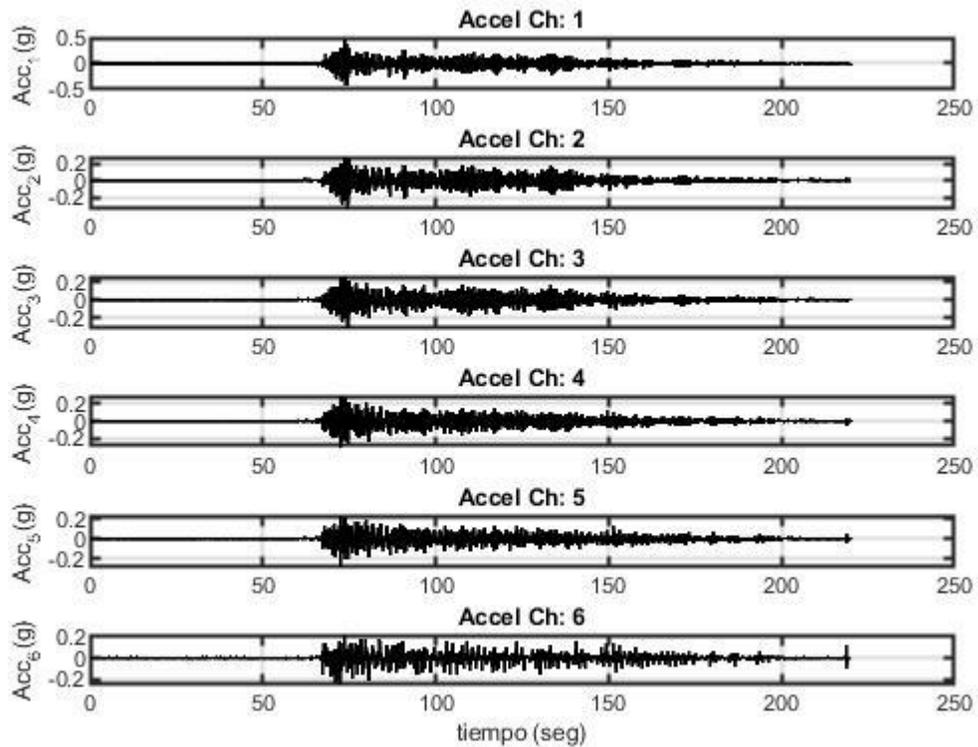


Figura 8.34. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración B.

¹¹⁴ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

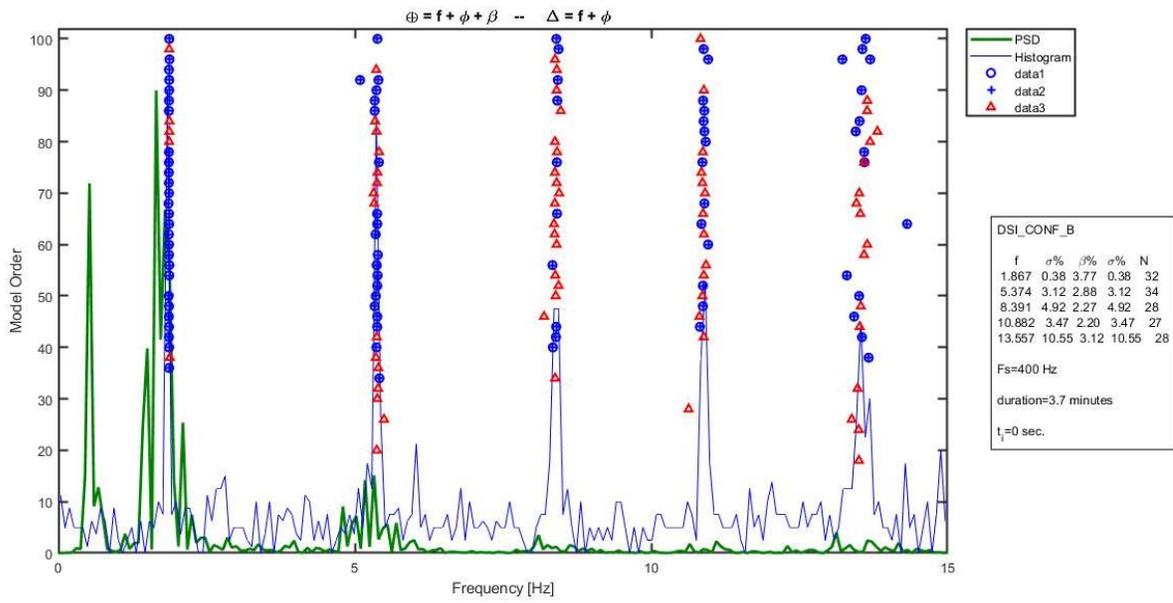


Figura 8.35. Diagrama de Estabilidad - Configuración B.

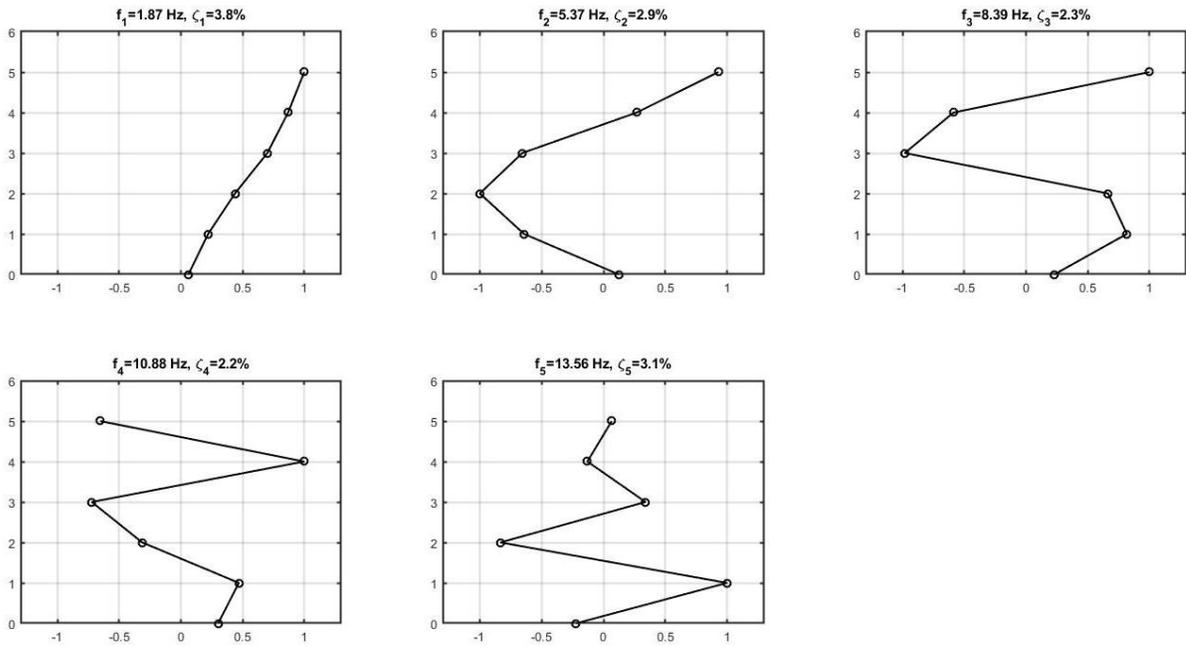


Figura 8.36. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración B.

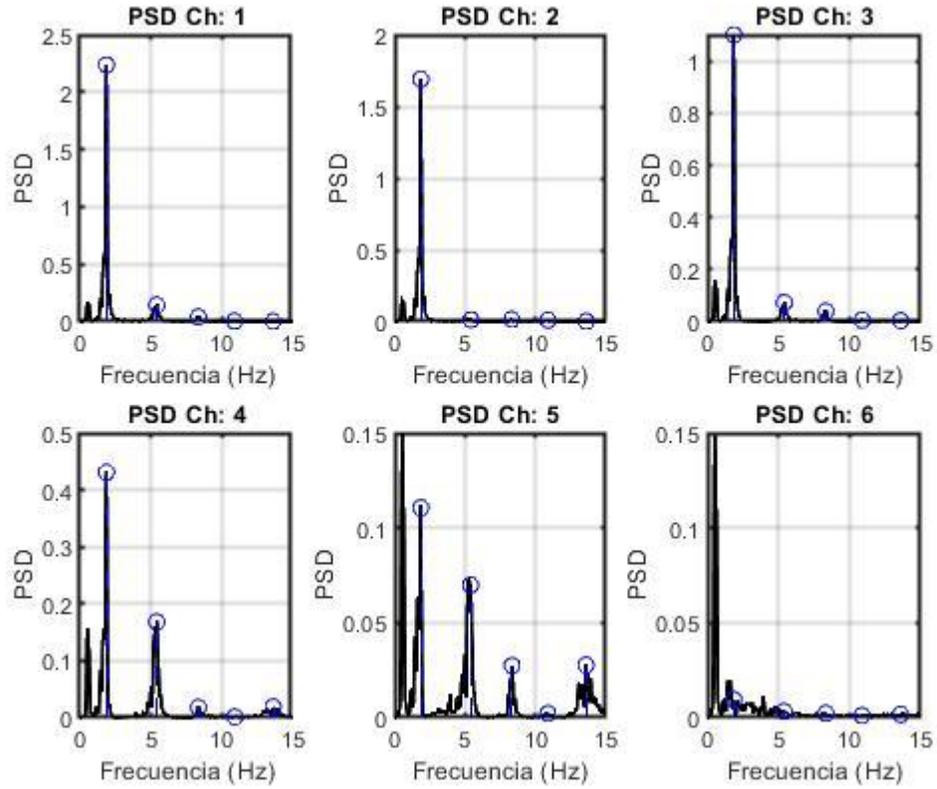


Figura 8.37. Espectro de Potencia - Configuración B.

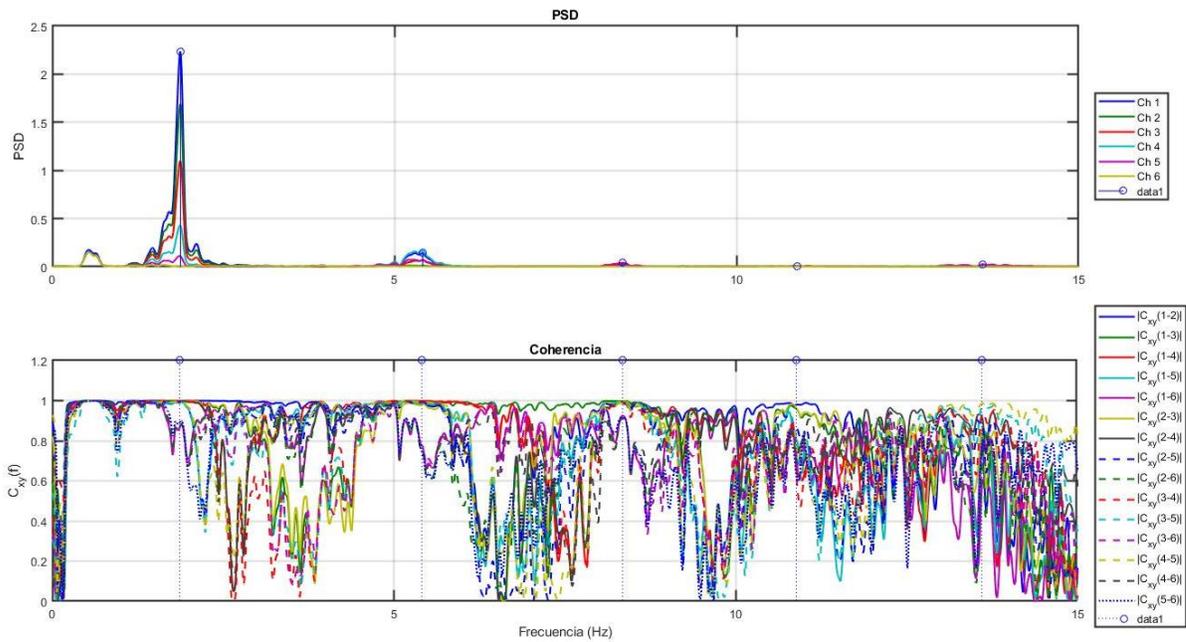


Figura 8.38. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración B.

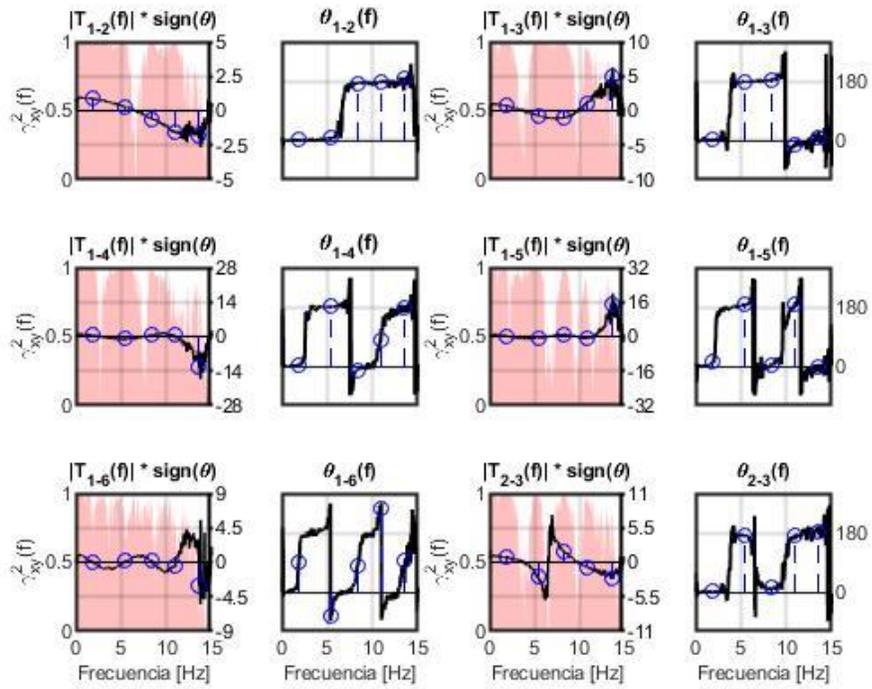


Figura 8.39. Función de Transferencia (1) - Configuración B.

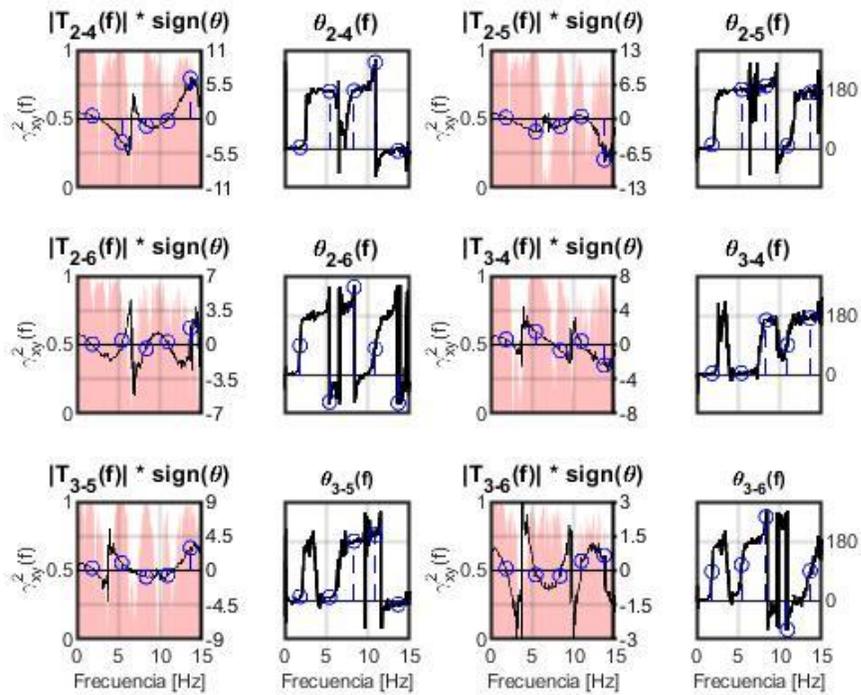


Figura 8.40. Función de Transferencia (2) - Configuración B.

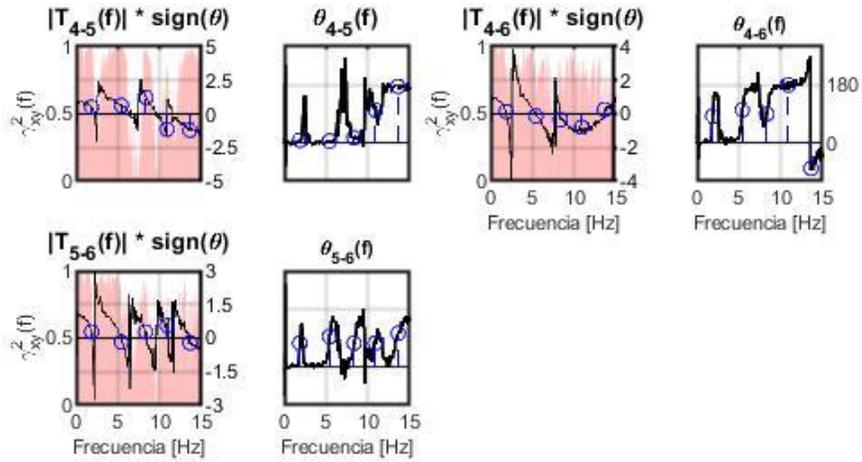


Figura 8.41. Función de Transferencia (3) - Configuración B.

8.3.3. Configuración B2 ¹¹⁵

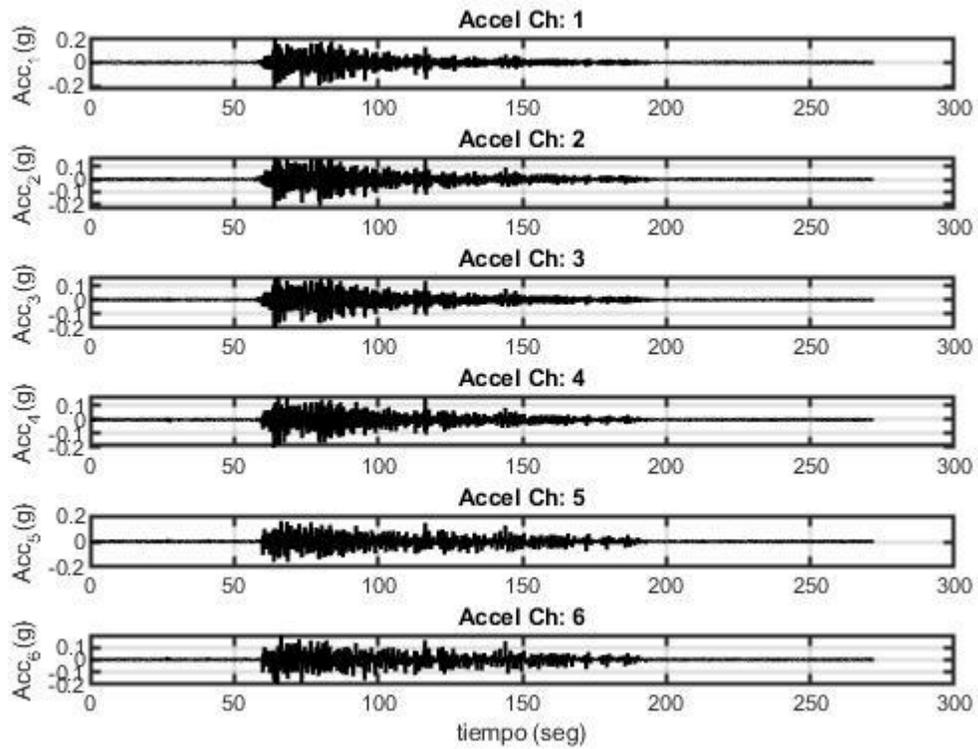


Figura 8.42. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración B2.

¹¹⁵ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

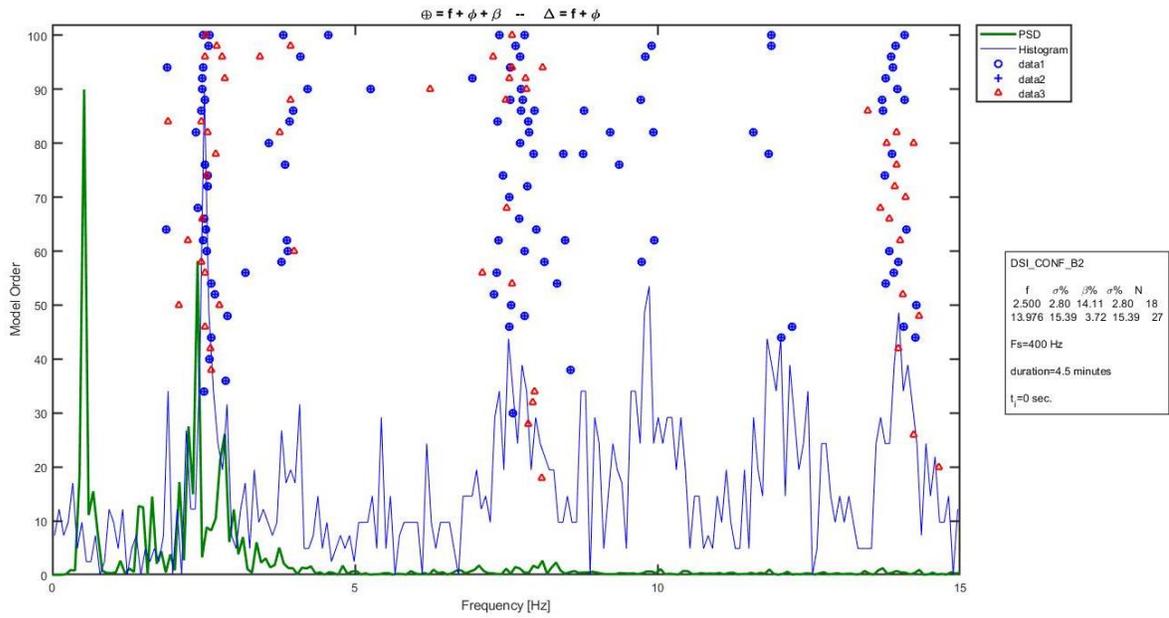


Figura 8.43. Diagrama de Estabilidad - Configuración B2.

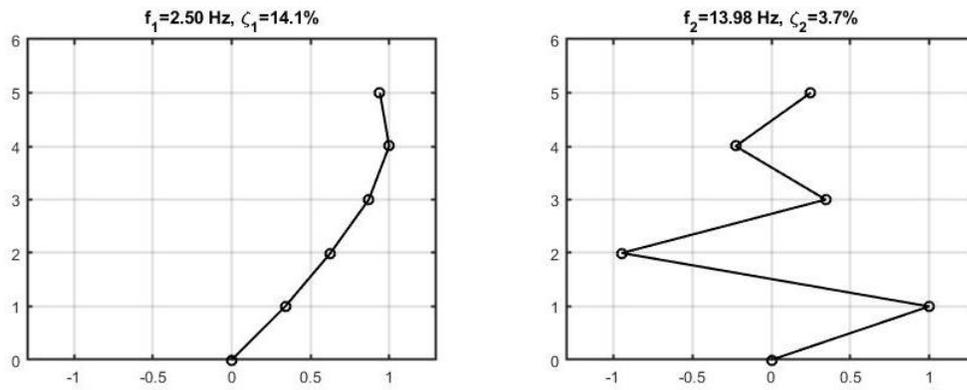


Figura 8.44. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración B2.

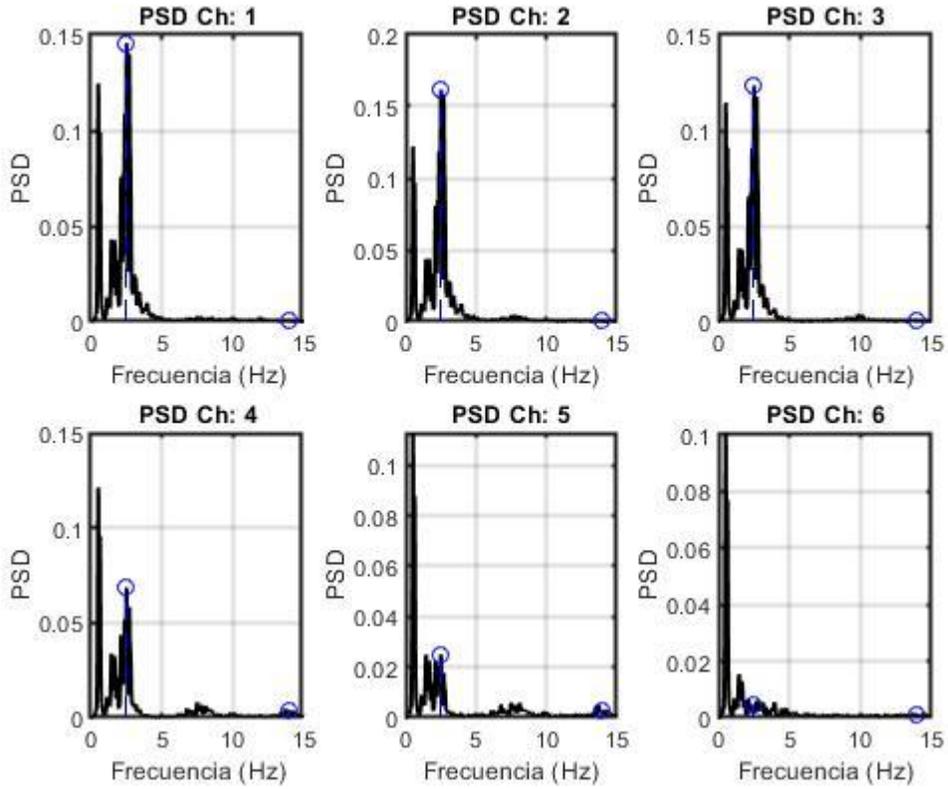


Figura 8.45. Espectro de Potencia - Configuración B2.

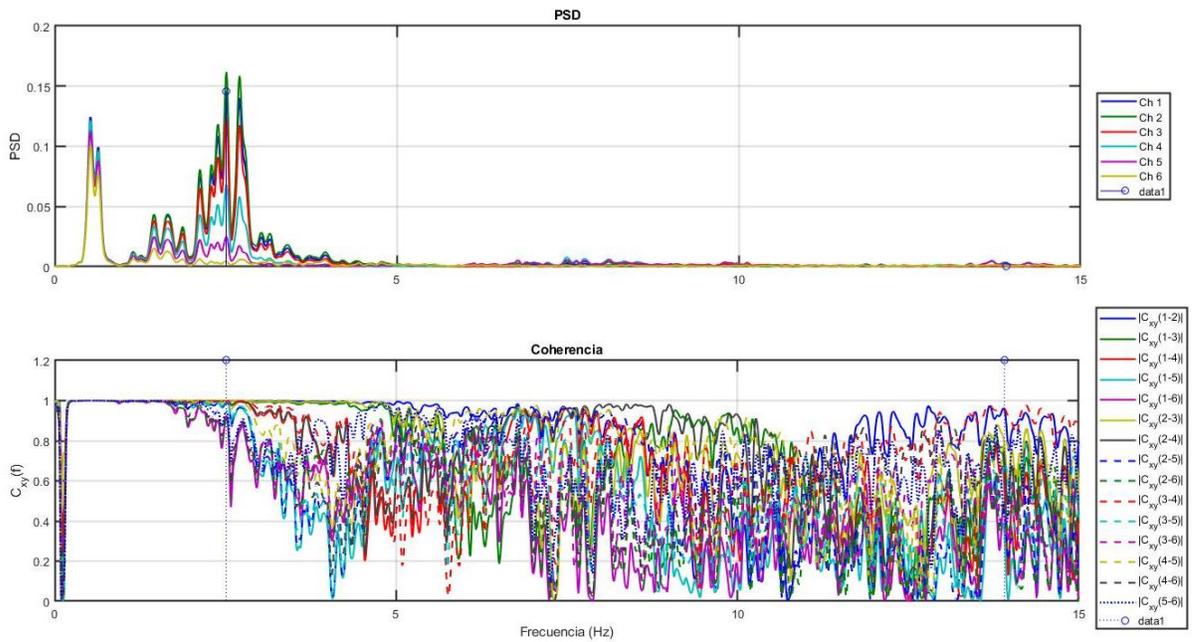


Figura 8.46. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración B2.

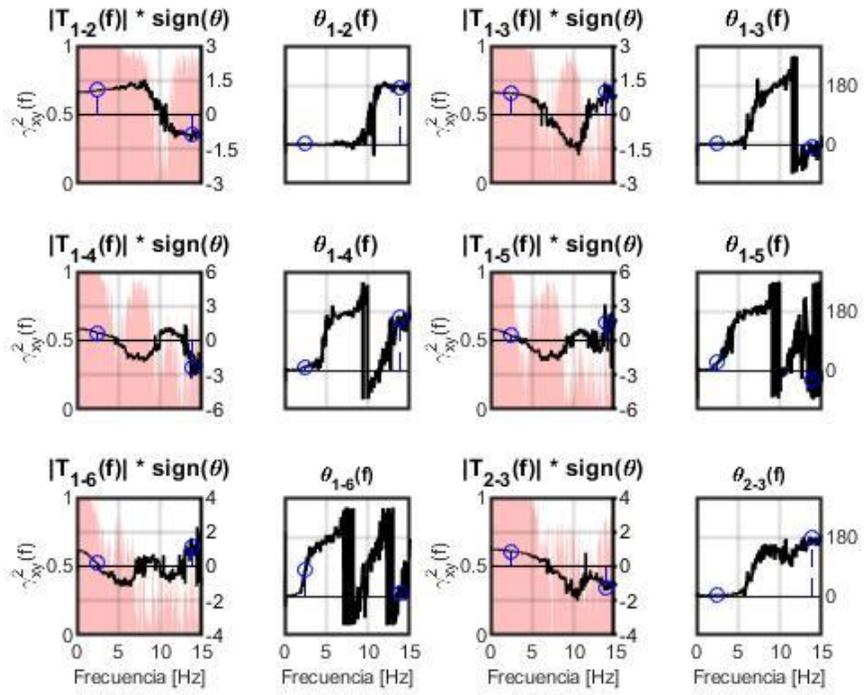


Figura 8.47. Función de Transferencia (1) - Configuración B2.

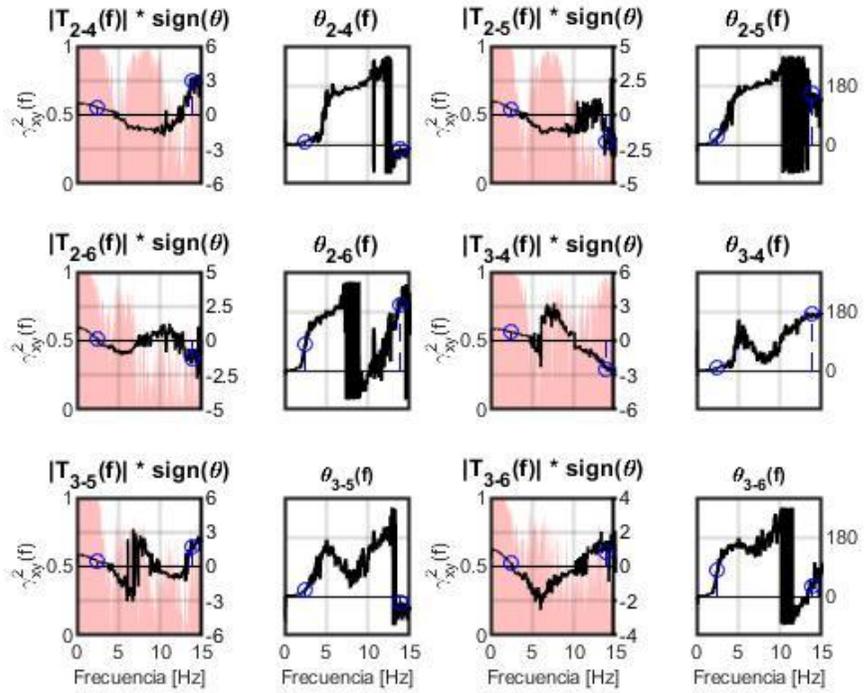


Figura 8.48. Función de Transferencia (2) - Configuración B2.

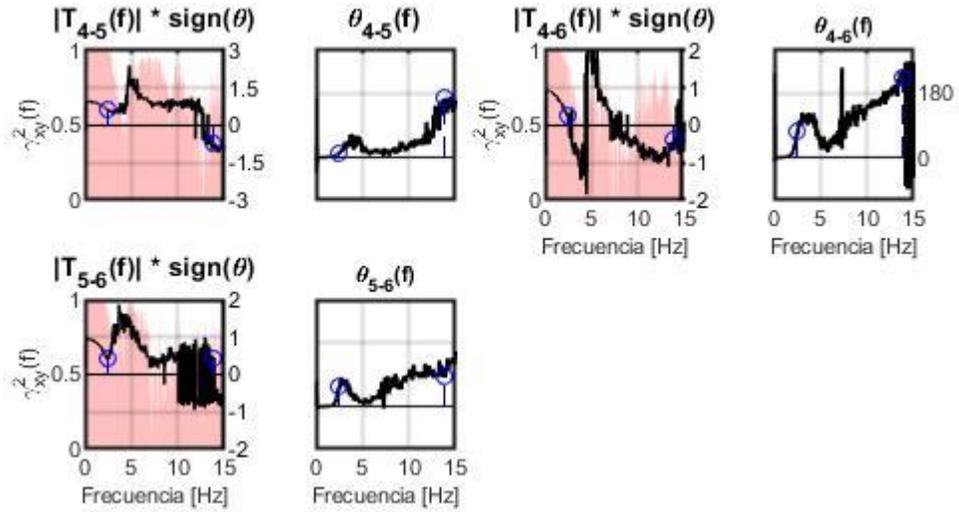


Figura 8.49. Función de Transferencia (3) - Configuración B2.

8.3.4. Configuración C ¹¹⁶

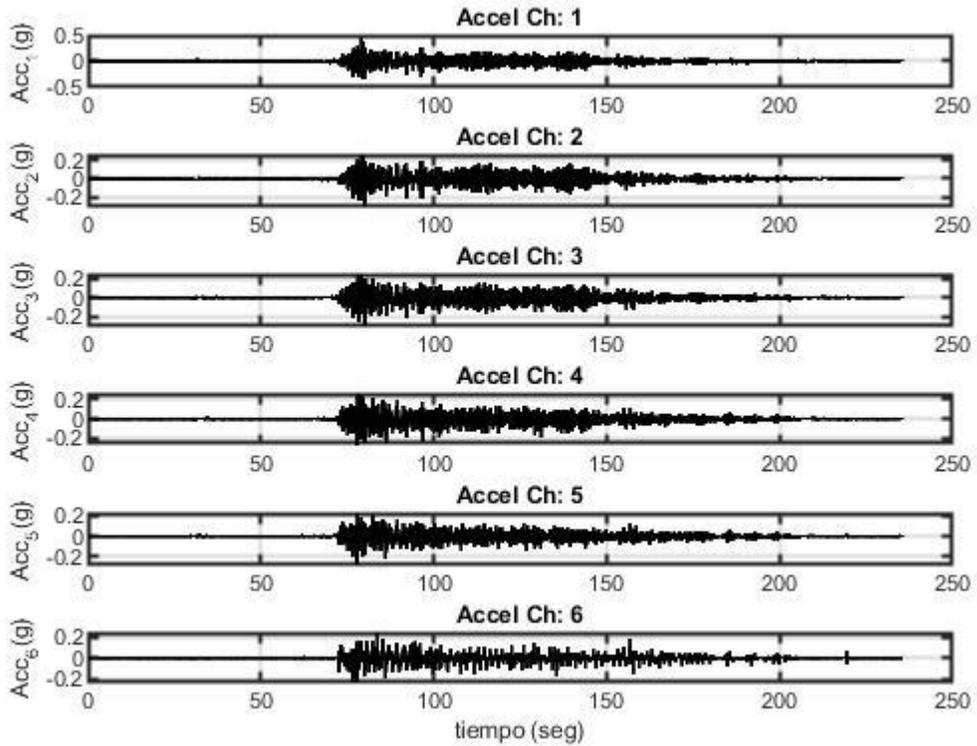


Figura 8.50. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración C.

¹¹⁶ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

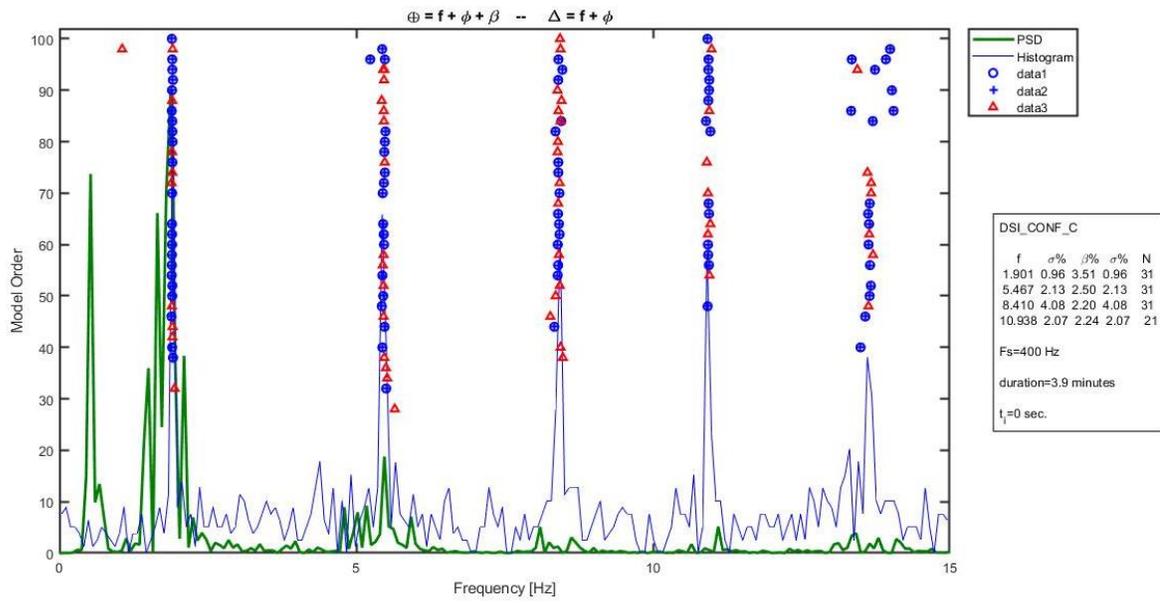


Figura 8.51. Diagrama de Estabilidad - Configuración C.

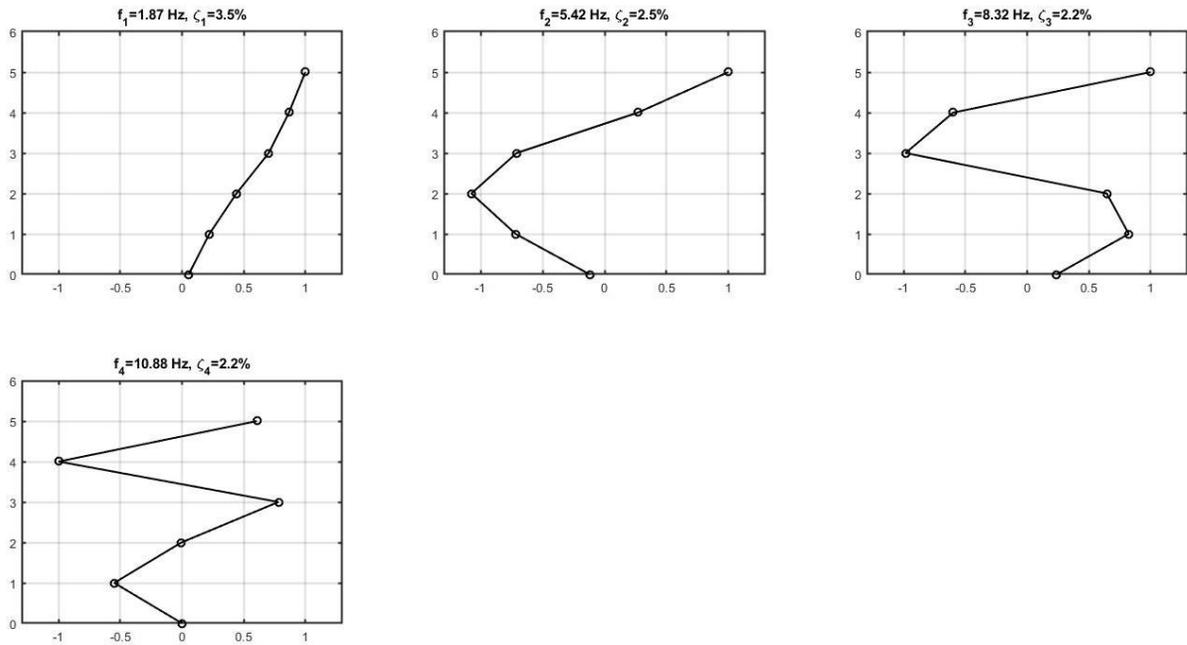


Figura 8.52. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración C.

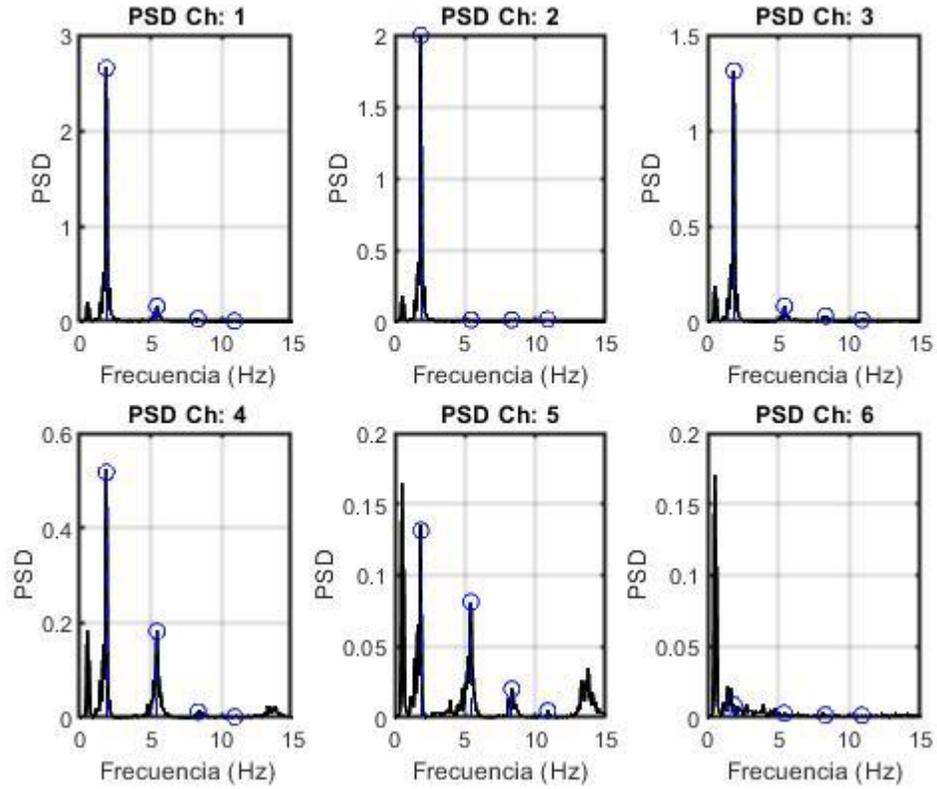


Figura 8.53. Espectro de Potencia - Configuración C.

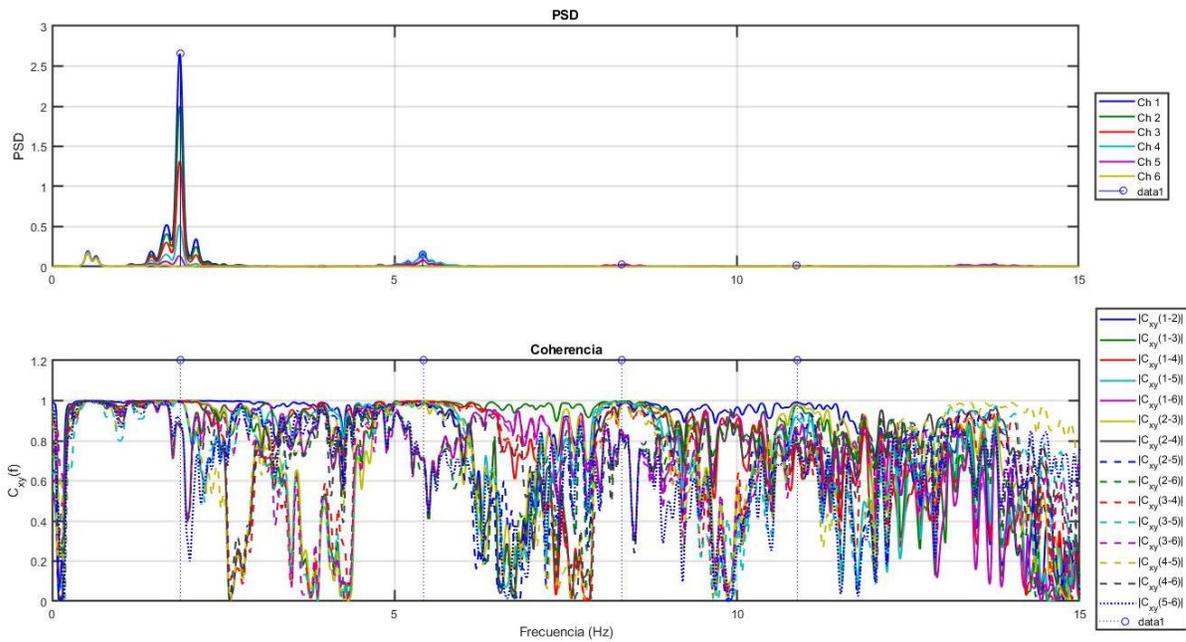


Figura 8.54. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración C.

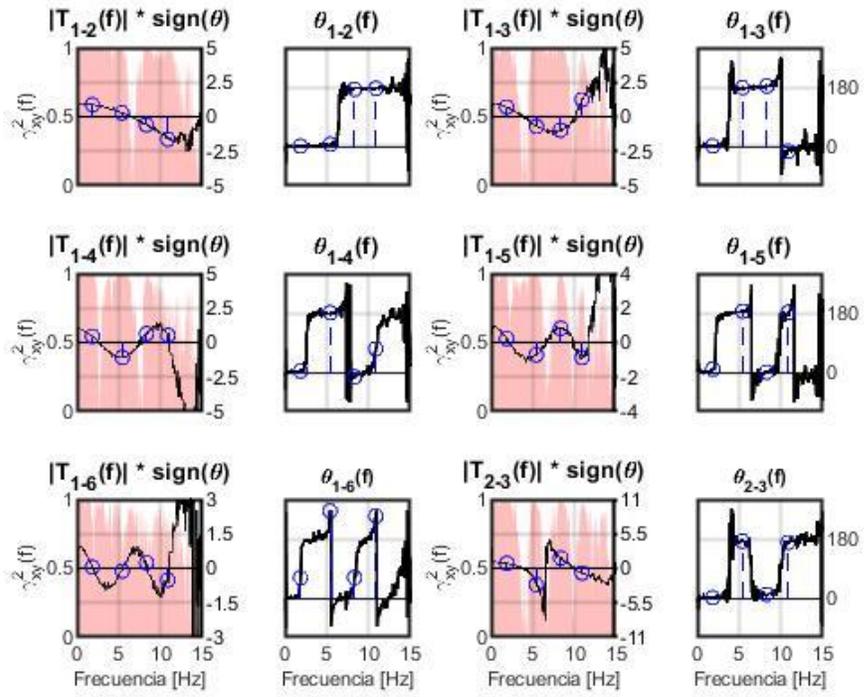


Figura 8.55. Función de Transferencia (1) - Configuración C.

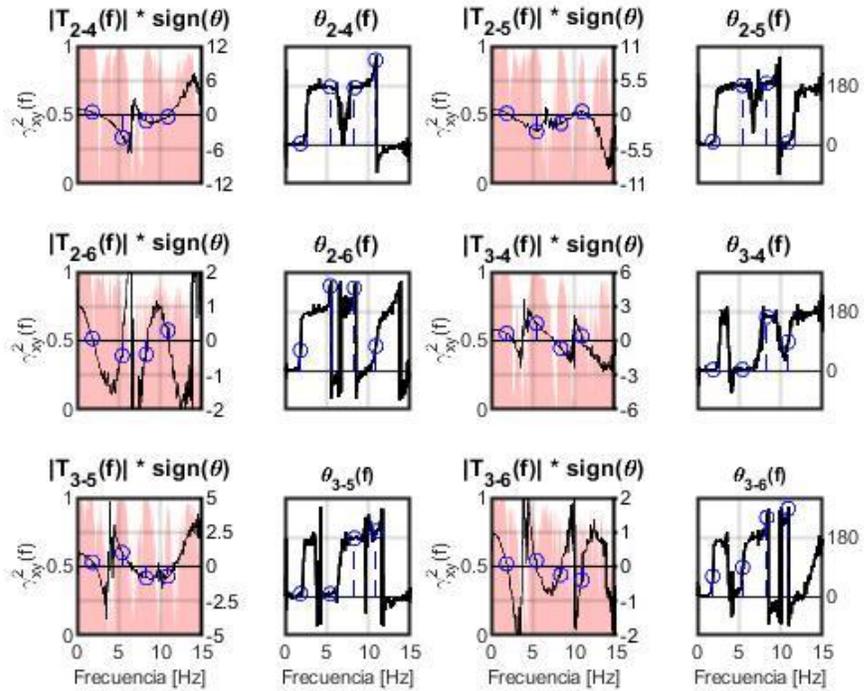


Figura 8.56. Función de Transferencia (2) - Configuración C.

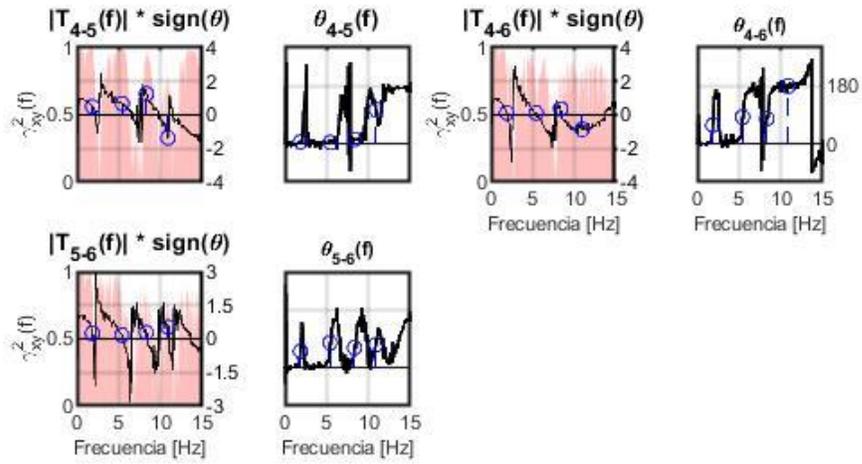


Figura 8.57. Función de Transferencia (3) - Configuración C.

8.3.5. Configuración D ¹¹⁷

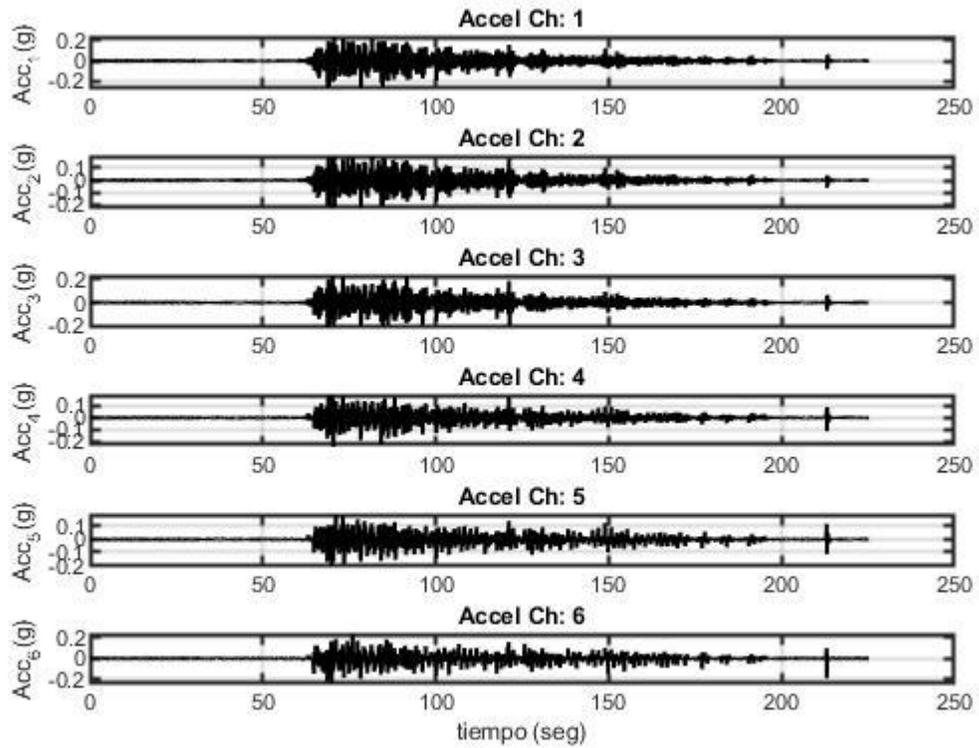


Figura 8.58. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración D.

¹¹⁷ Configuración D: Estructura con presencia de cable con alta tensión.

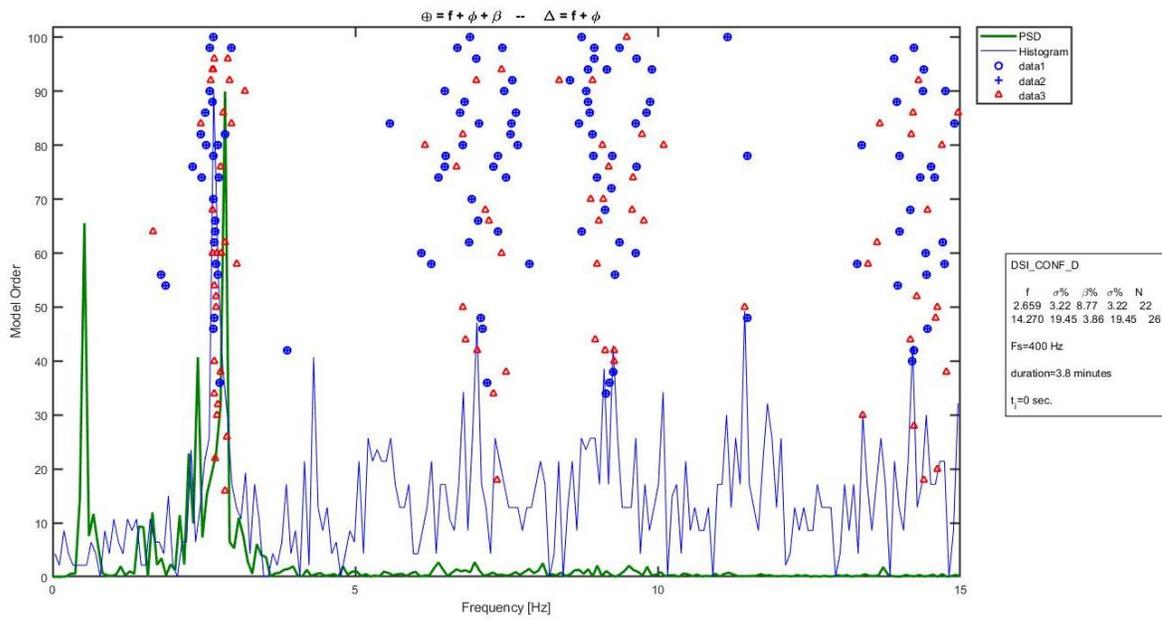


Figura 8.59. Diagrama de Estabilidad - Configuración D.

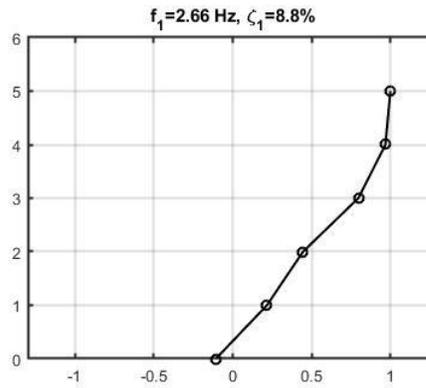


Figura 8.60. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración D.

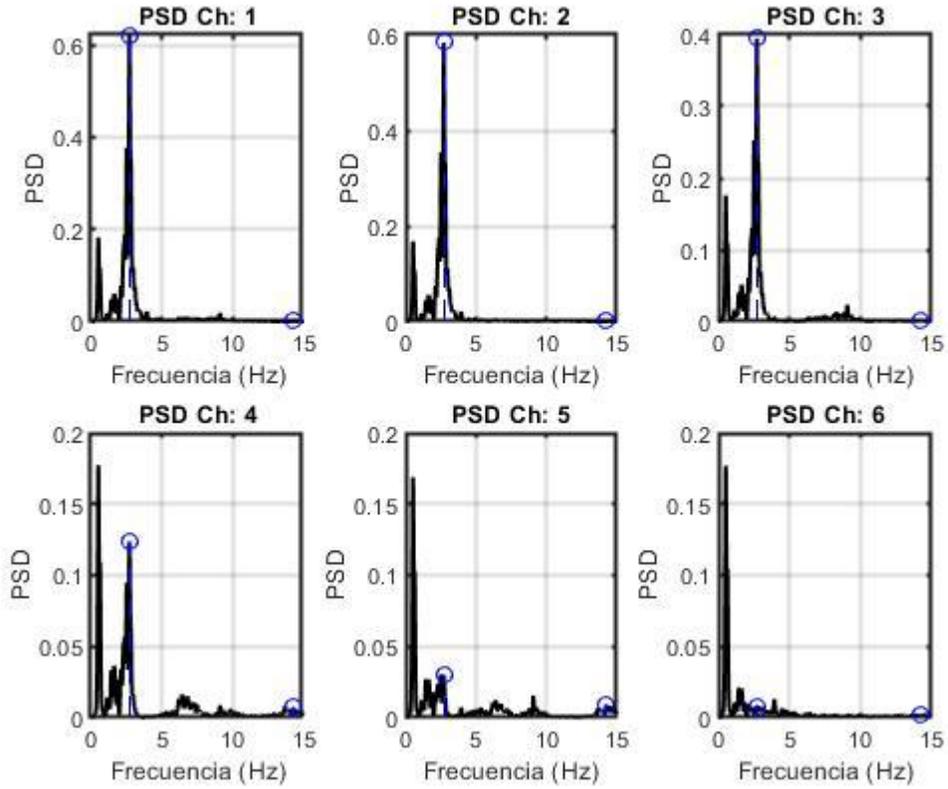


Figura 8.61. Espectro de Potencia - Configuración D.

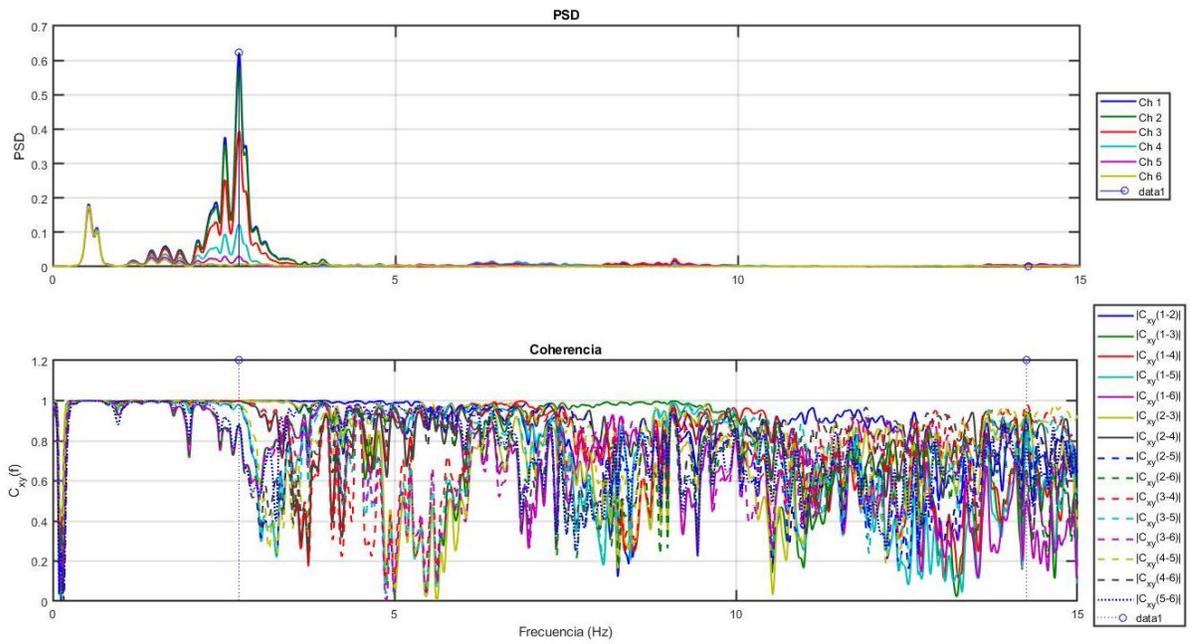


Figura 8.62. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración D.

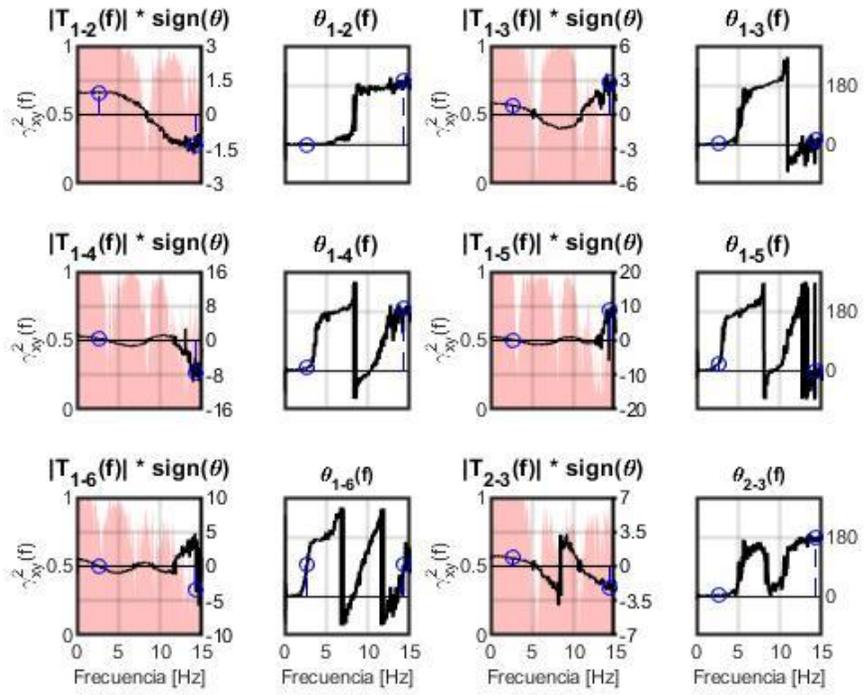


Figura 8.63. Función de Transferencia (1) - Configuración D.

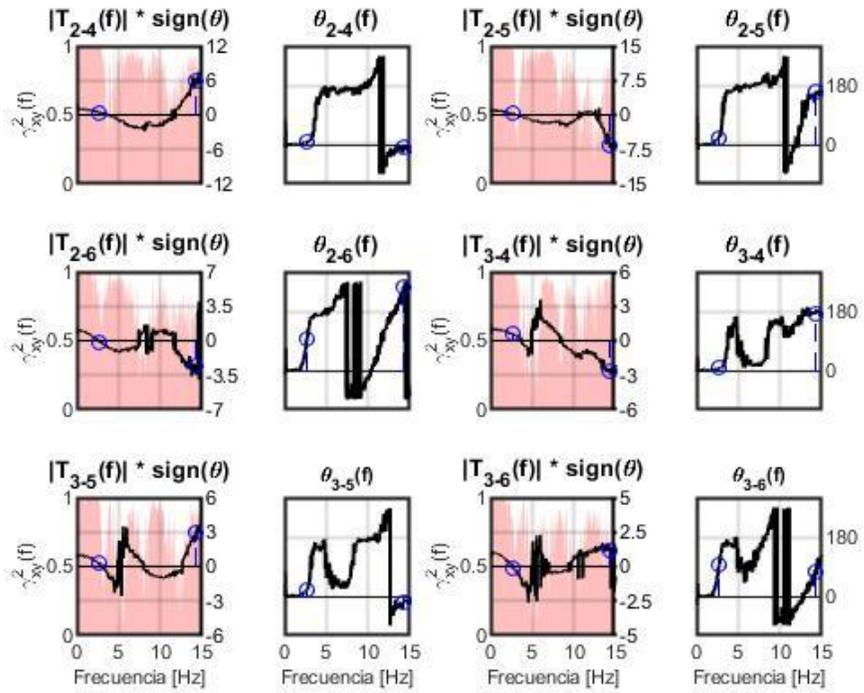


Figura 8.64. Función de Transferencia (2) - Configuración D.

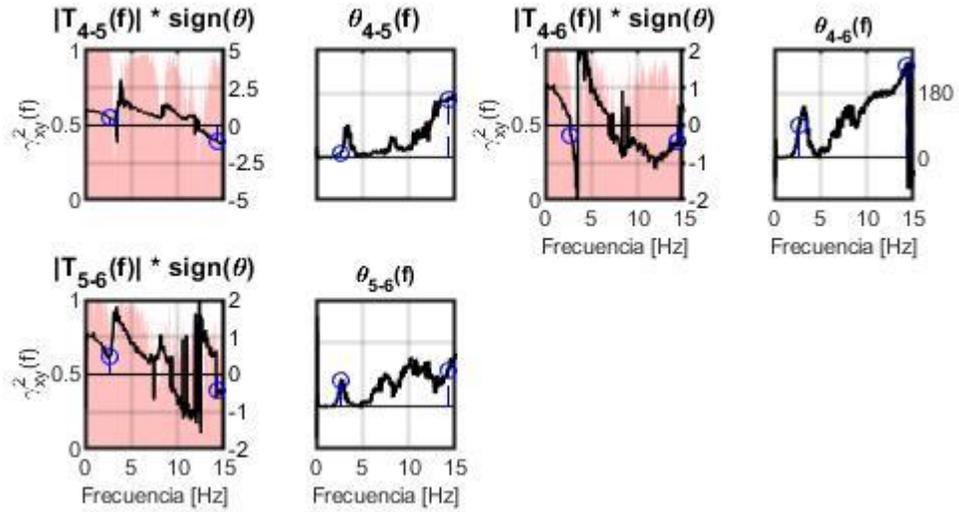


Figura 8.65. Función de Transferencia (3) - Configuración D.

8.3.6. Configuración E ¹¹⁸

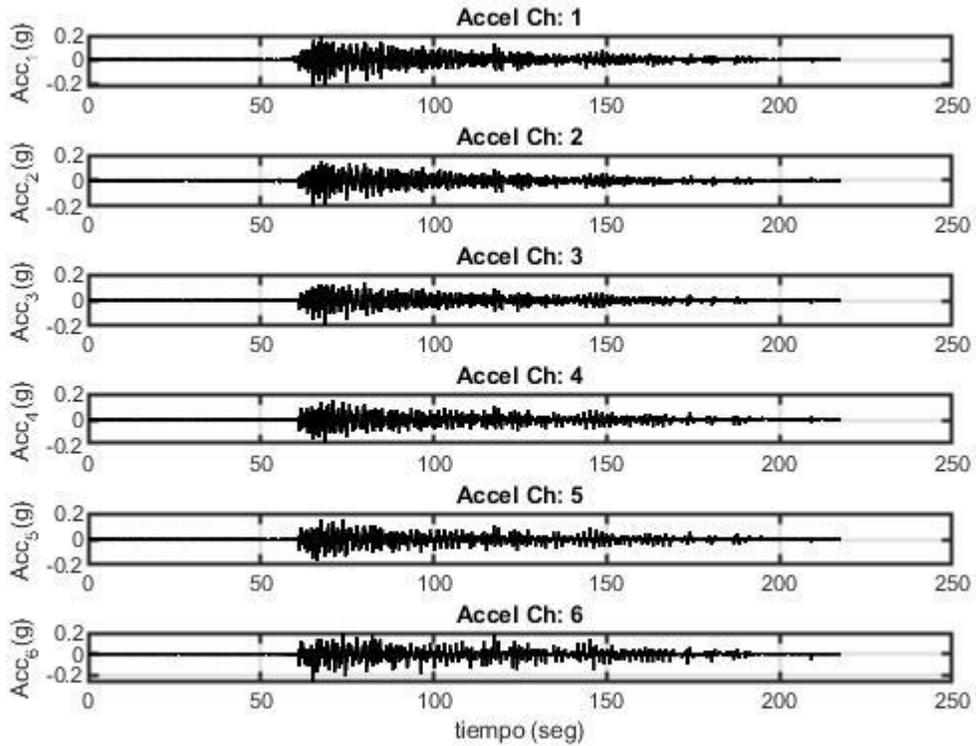


Figura 8.66. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración E.

¹¹⁸ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

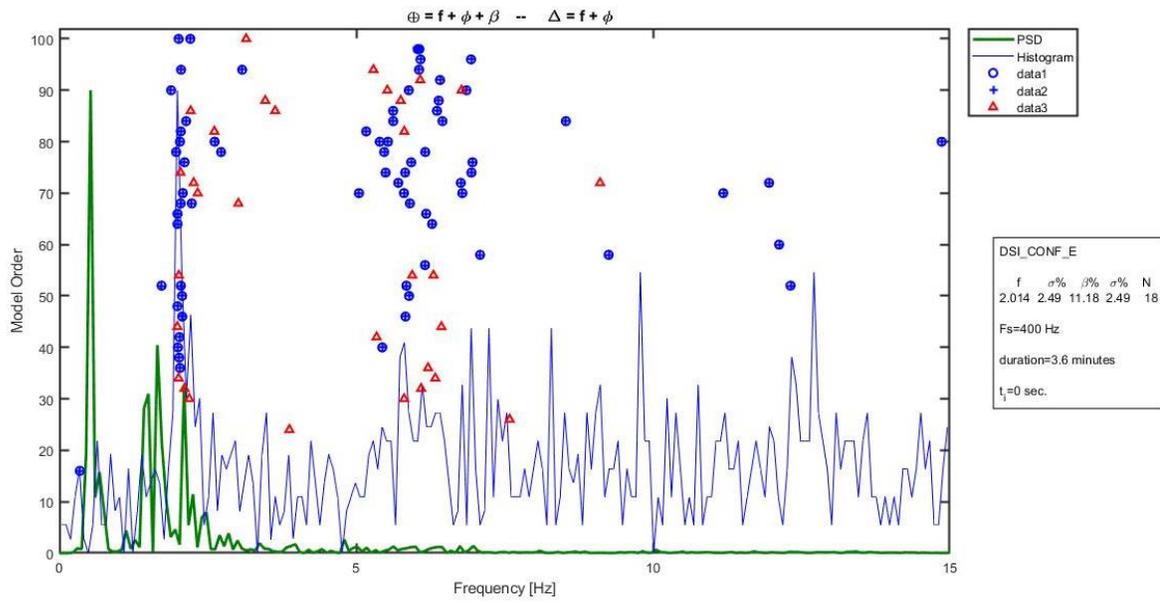


Figura 8.67. Diagrama de Estabilidad - Configuración E.

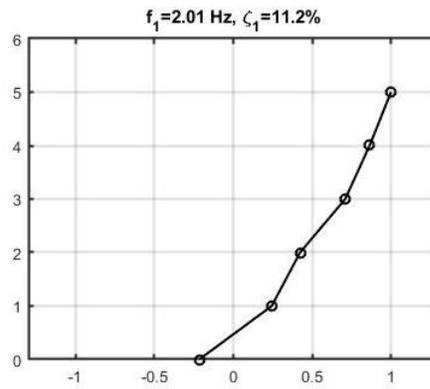


Figura 8.68. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración E.

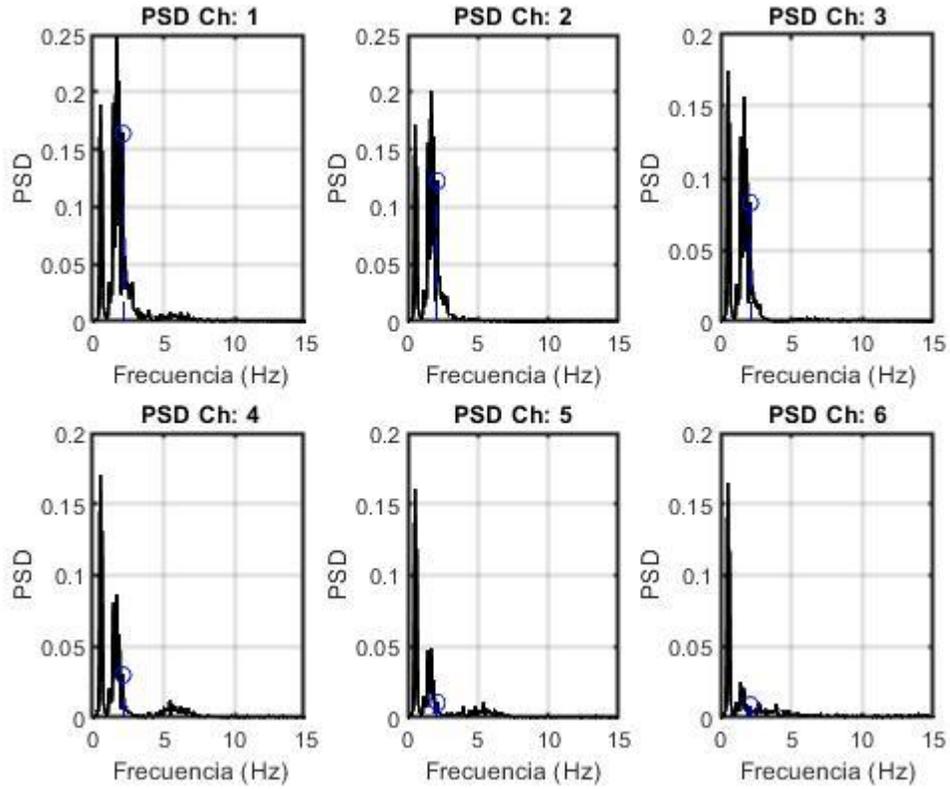


Figura 8.69. Espectro de Potencia - Configuración E.

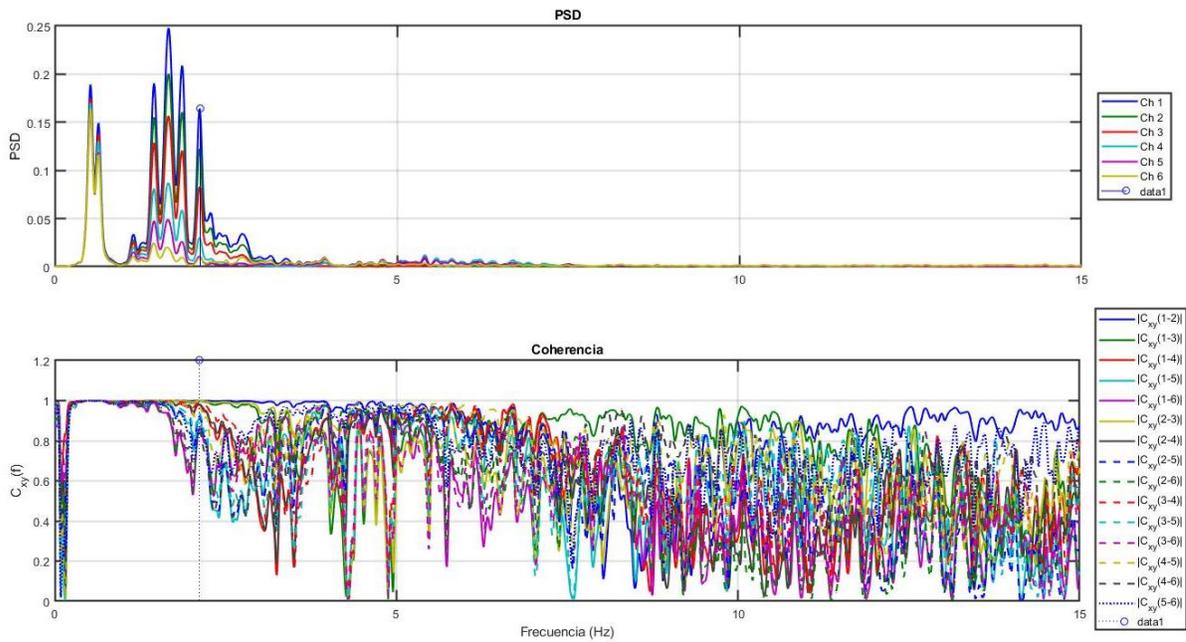


Figura 8.70. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración E.

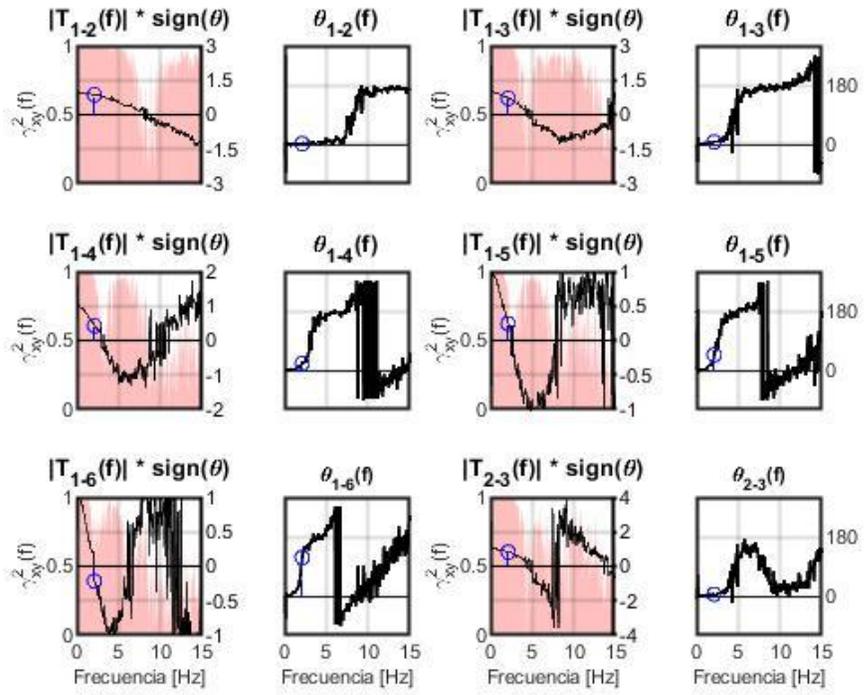


Figura 8.71. Función de Transferencia (1) - Configuración E.

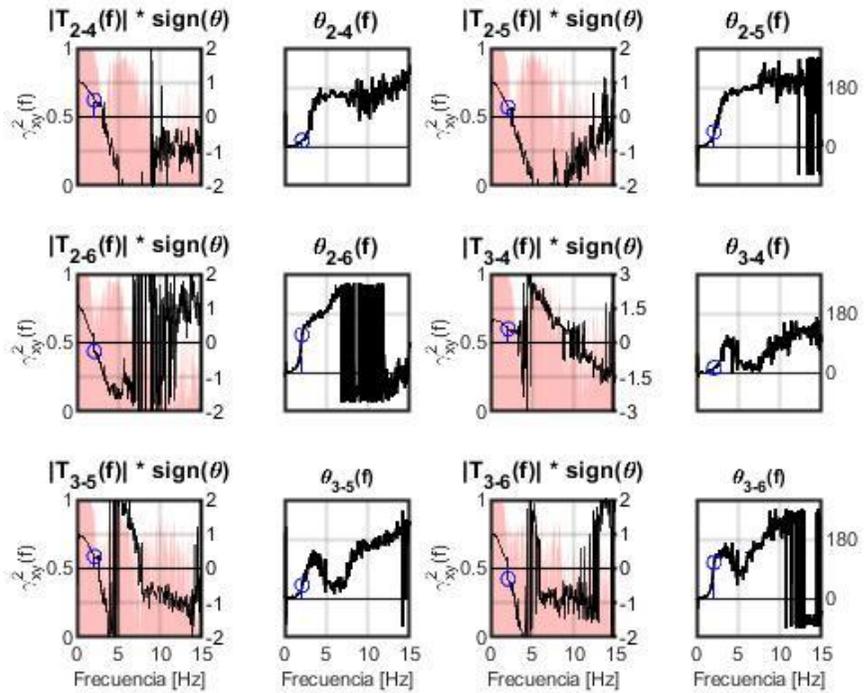


Figura 8.72. Función de Transferencia (2) - Configuración E.

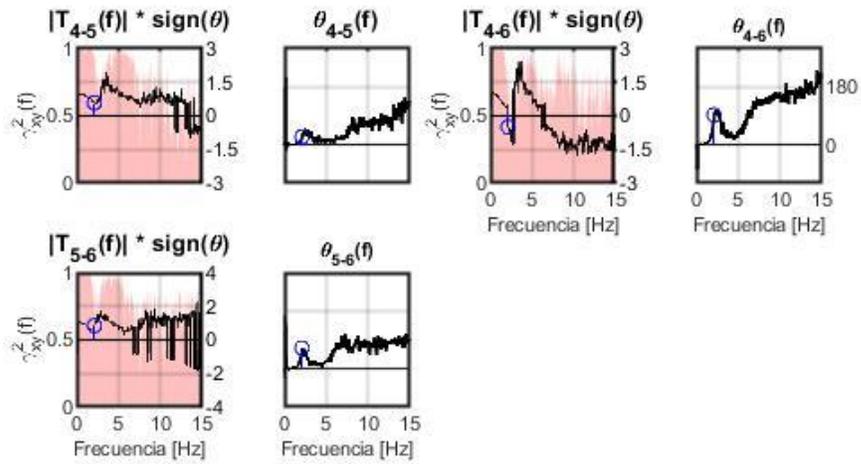


Figura 8.73. Función de Transferencia (3) - Configuración E.

8.3.7. Configuración E2 ¹¹⁹

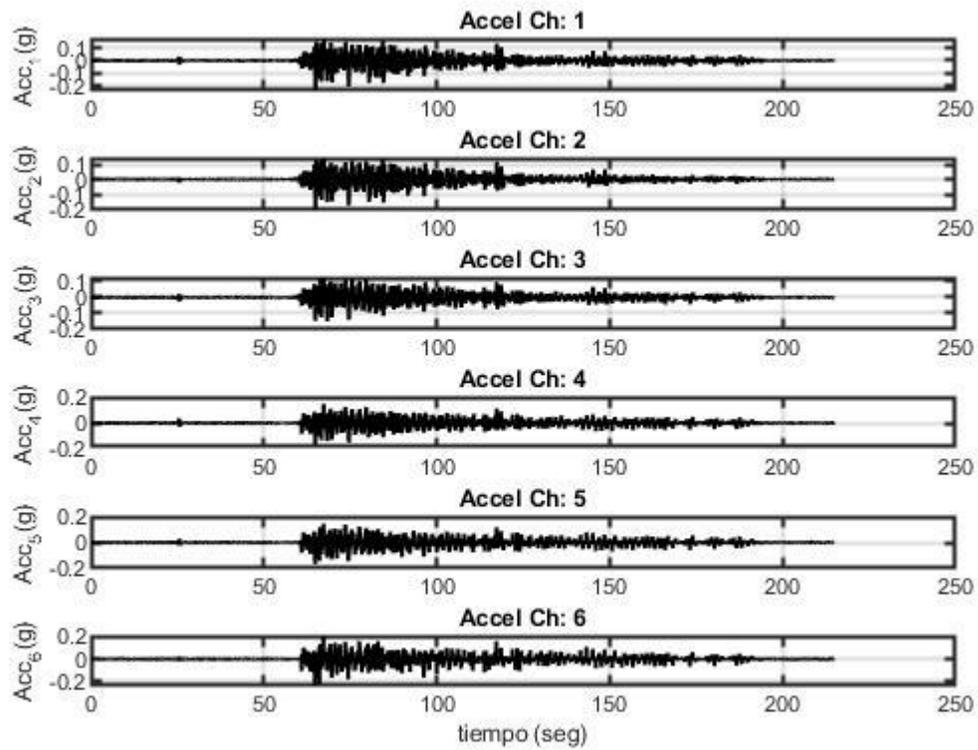


Figura 8.74. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración E2.

¹¹⁹ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

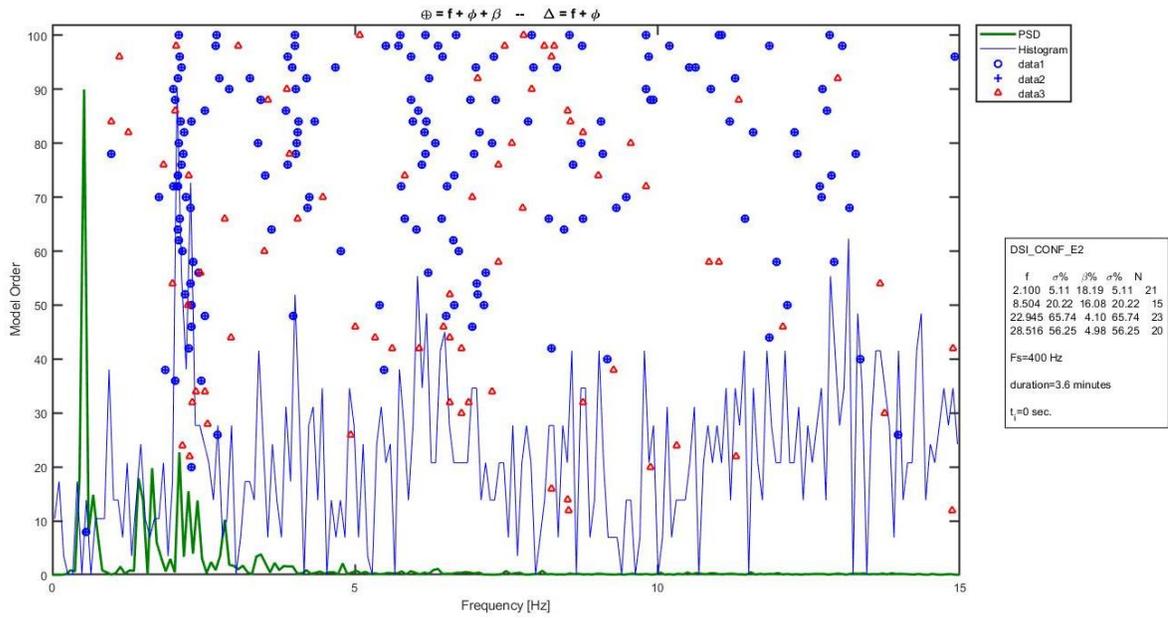


Figura 8.75. Diagrama de Estabilidad - Configuración E2.

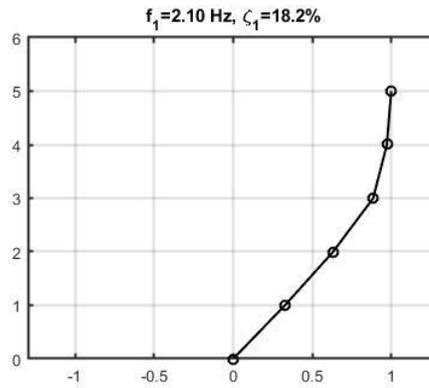


Figura 8.76. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración E2.

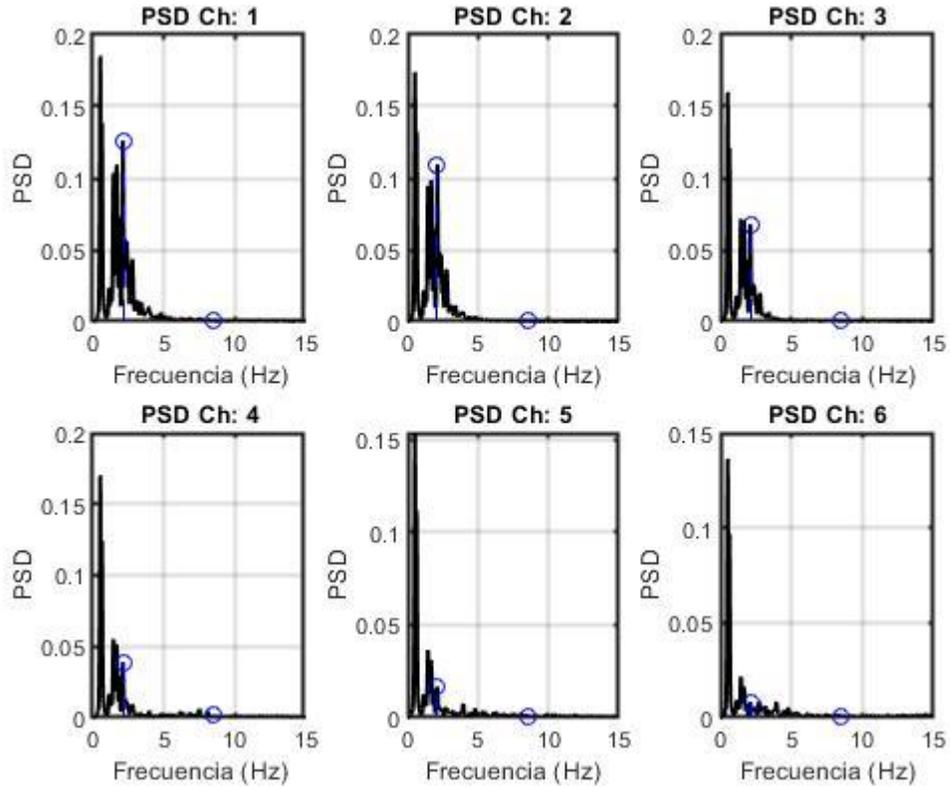


Figura 8.77. Espectro de Potencia - Configuración E2.

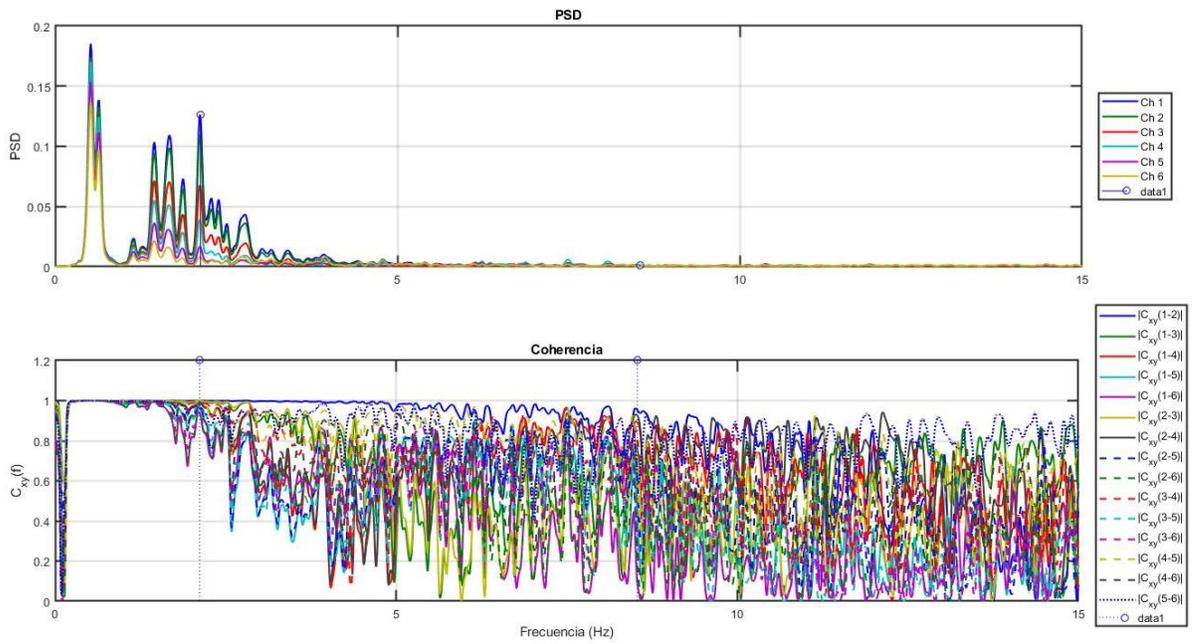


Figura 8.78. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración E2.

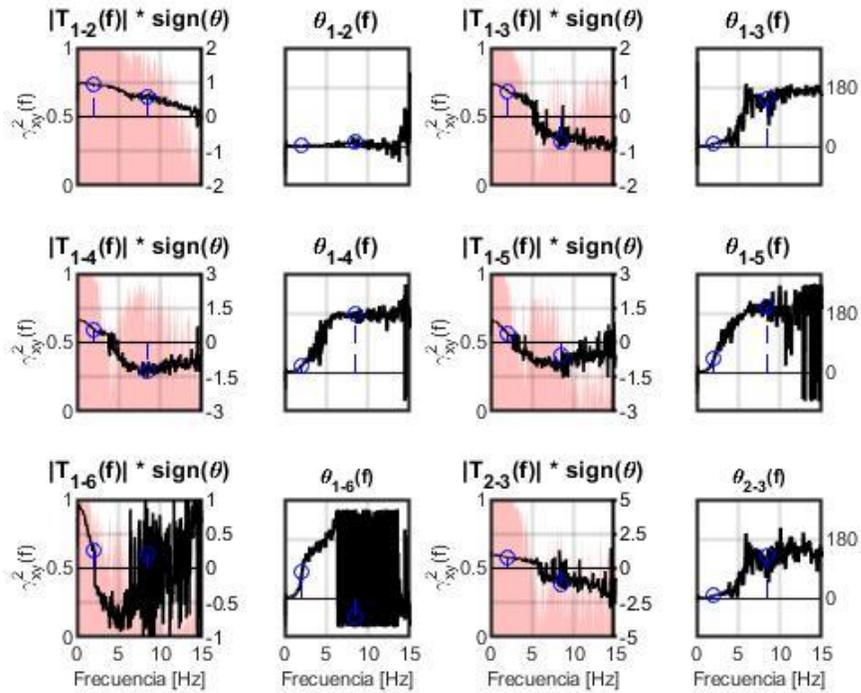


Figura 8.79. Función de Transferencia (1) - Configuración E2.

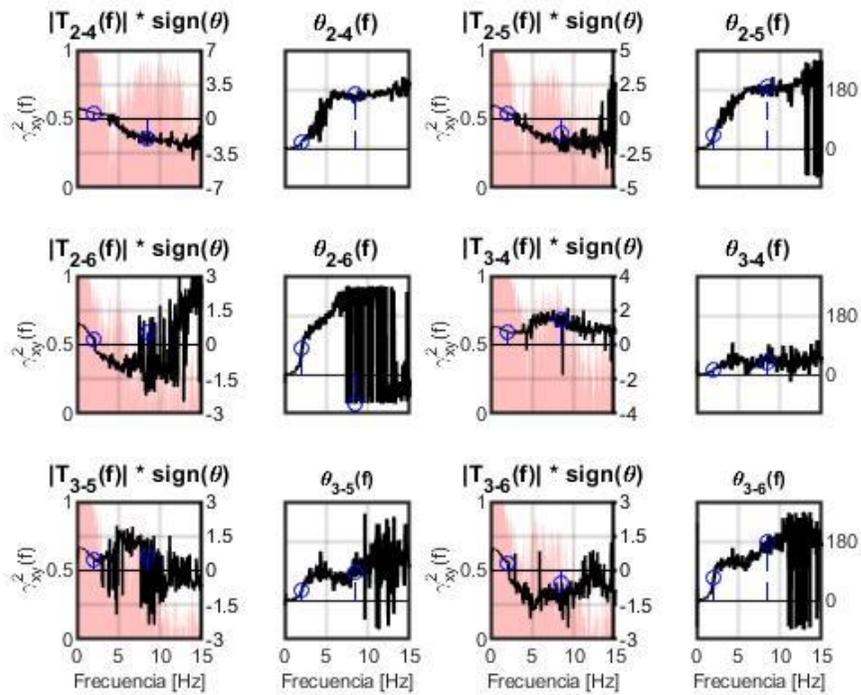


Figura 8.80. Función de Transferencia (2) - Configuración E2.

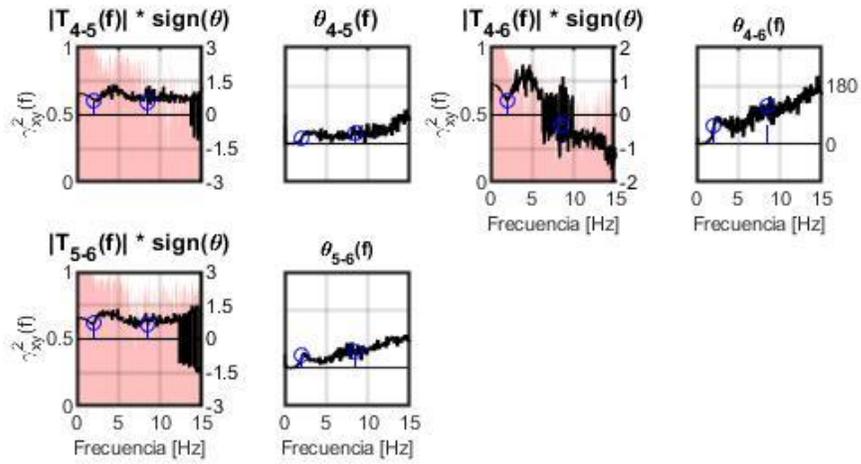


Figura 8.81. Función de Transferencia (3) - Configuración E2.

8.3.8. Configuración F ¹²⁰

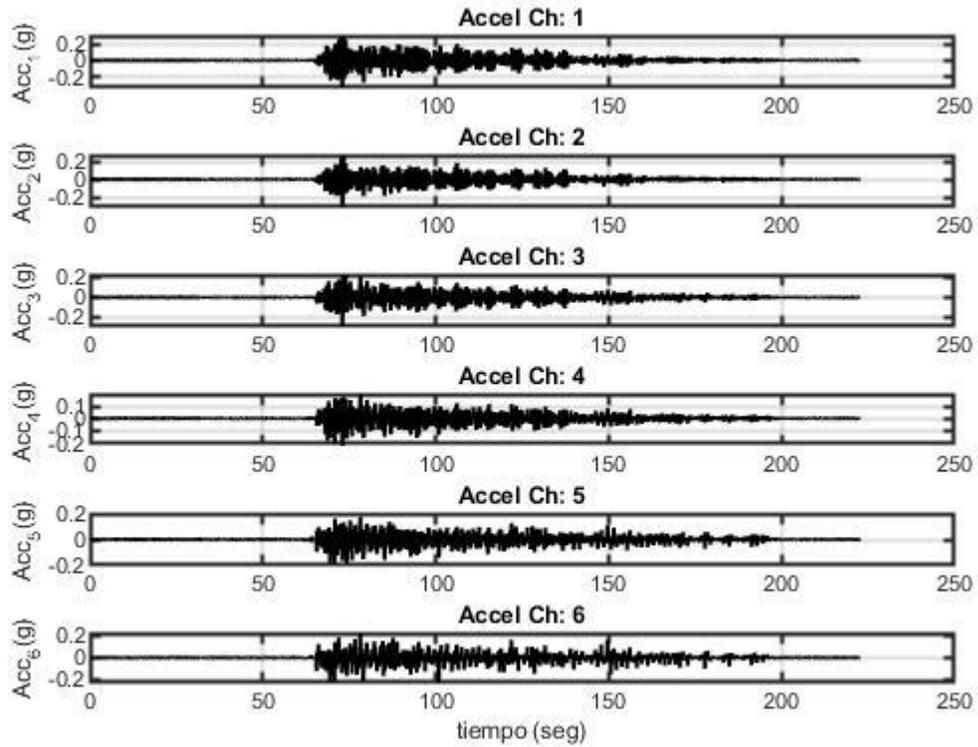


Figura 8.82. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración F.

¹²⁰ Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

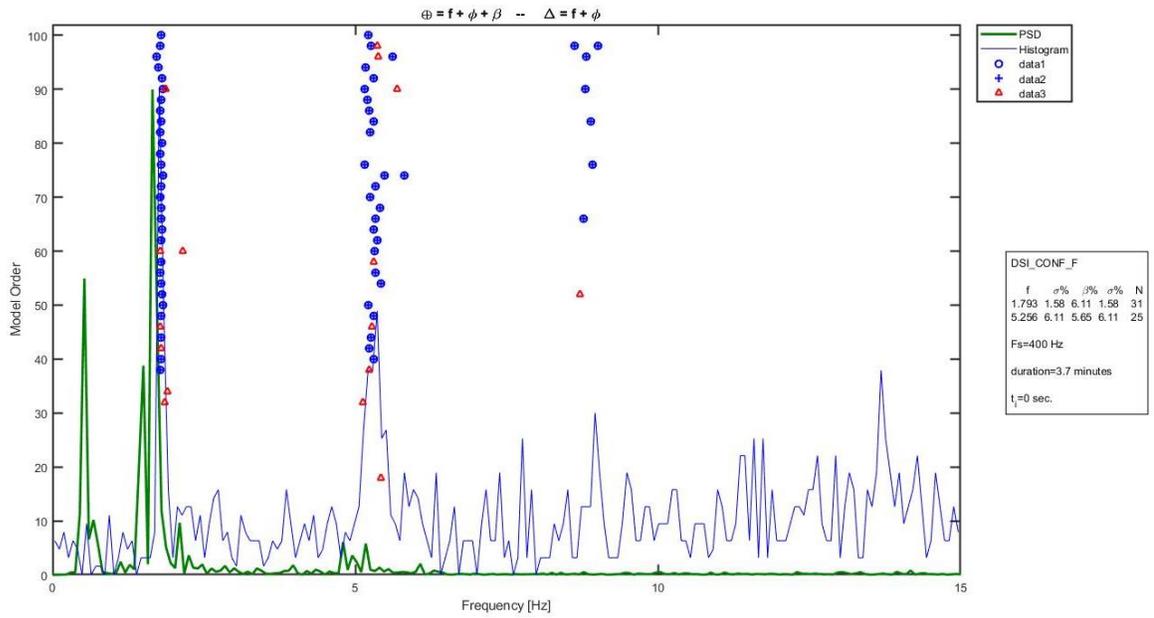


Figura 8.83. Diagrama de Estabilidad - Configuración F.

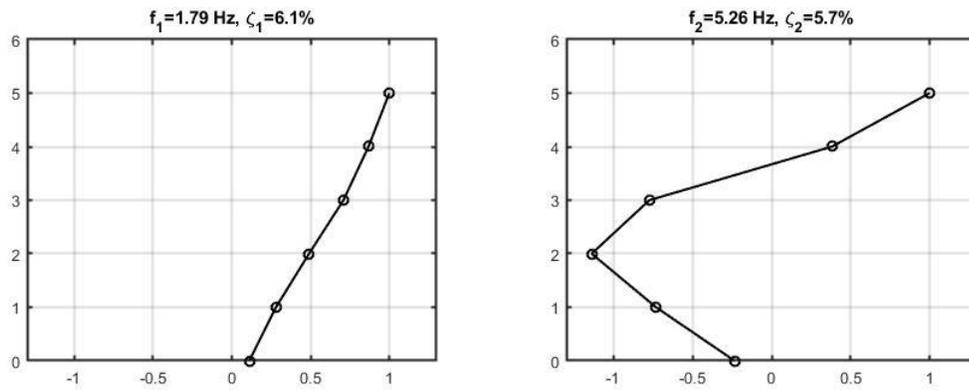


Figura 8.84. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración F.

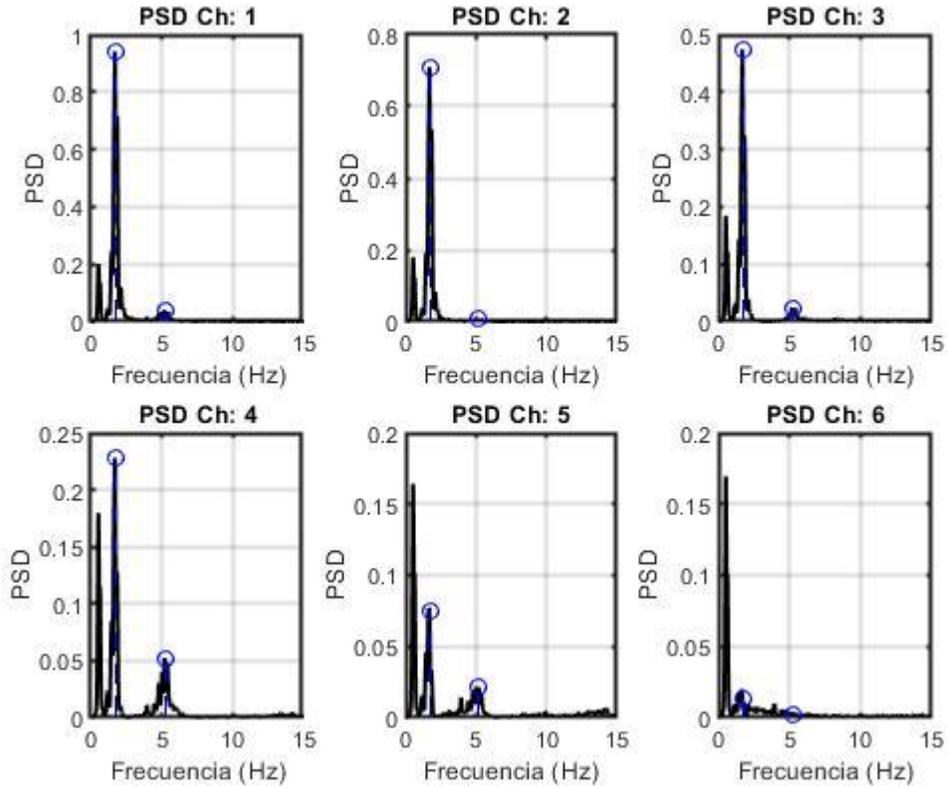


Figura 8.85. Espectro de Potencia - Configuración F.

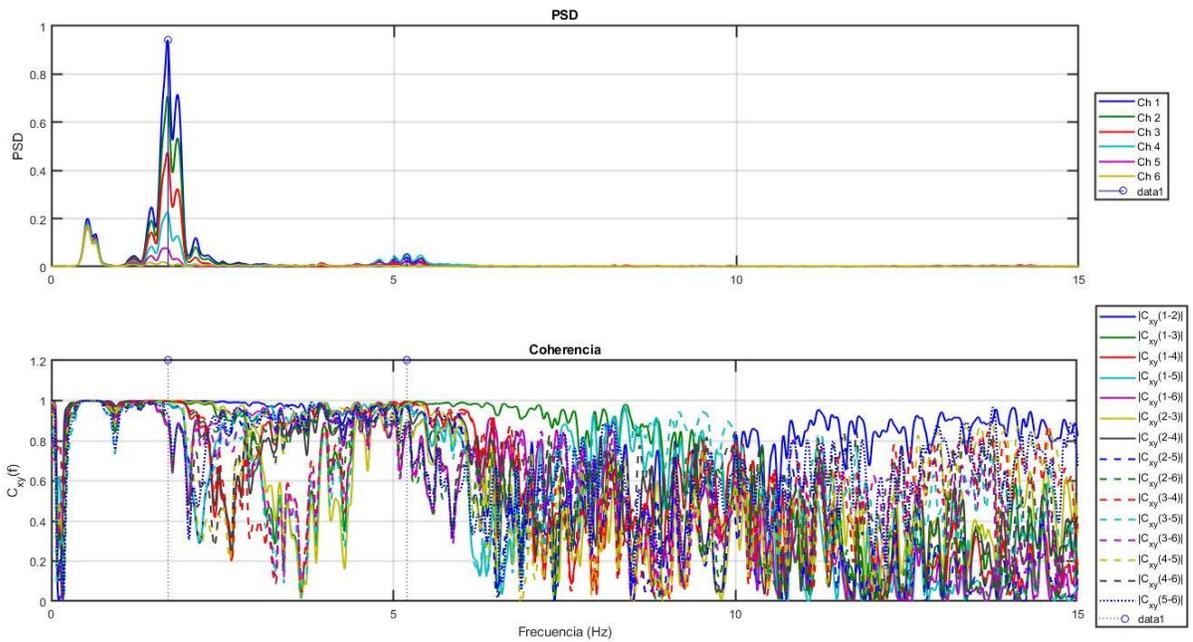


Figura 8.86. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración F.

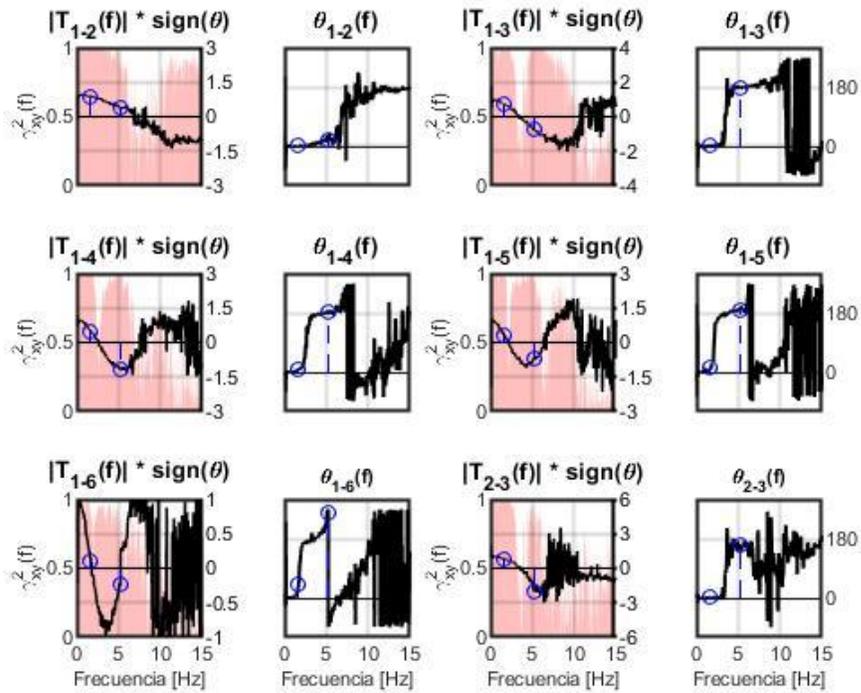


Figura 8.87. Función de Transferencia (1) - Configuración F.

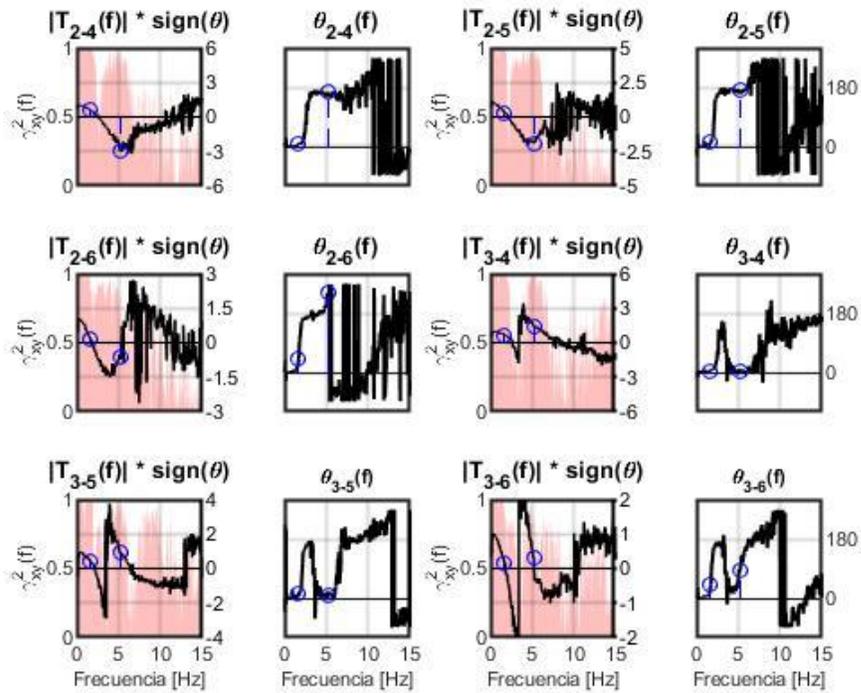


Figura 8.88. Función de Transferencia (2) - Configuración F.

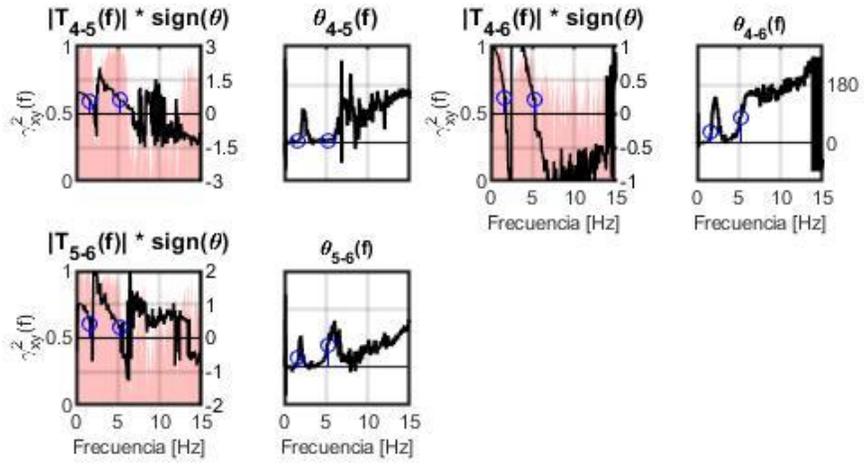


Figura 8.89. Función de Transferencia (3) - Configuración F.

8.3.9. Configuración F2 ¹²¹

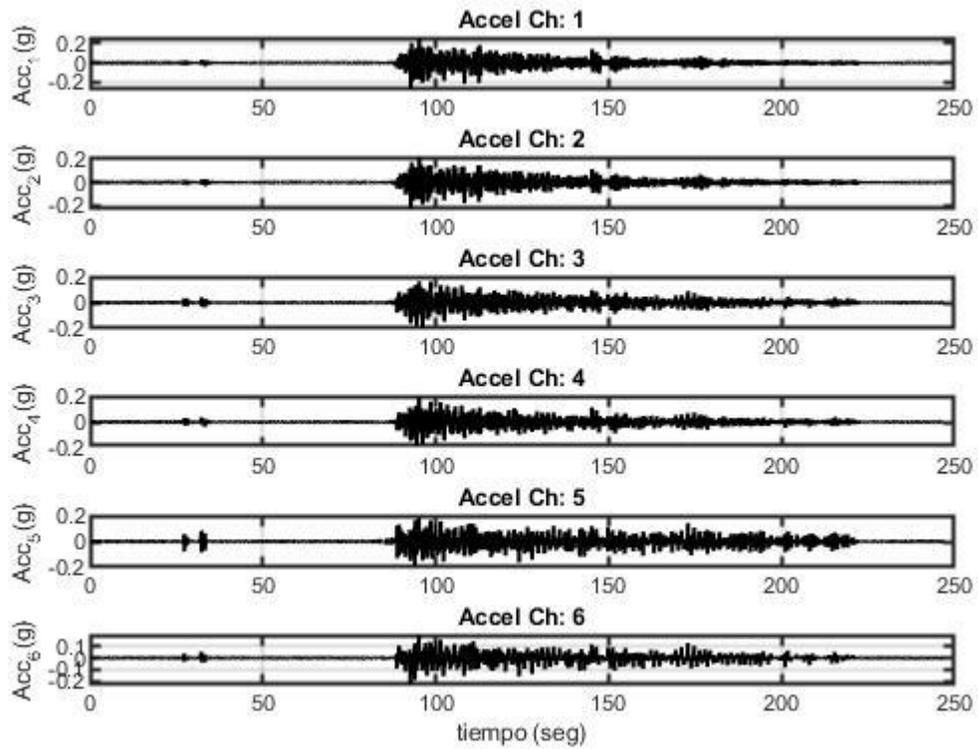


Figura 8.90. Registro de Aceleraciones, Ensayos Dinámicos - Configuración F2.

¹²¹ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

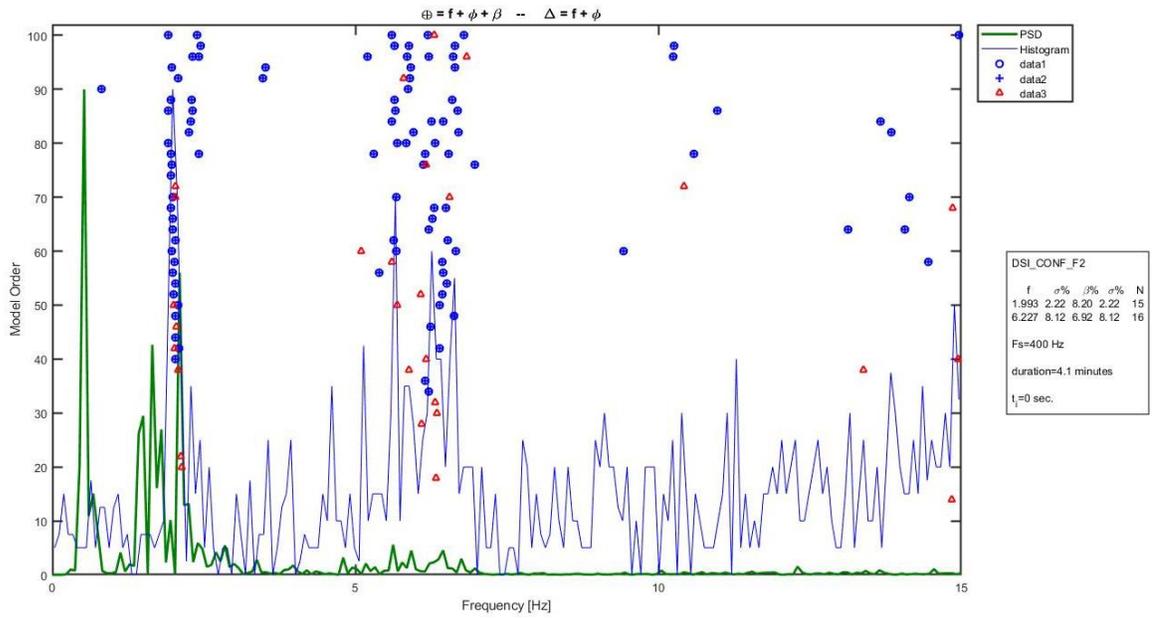


Figura 8.91. Diagrama de Estabilidad - Configuración F2.

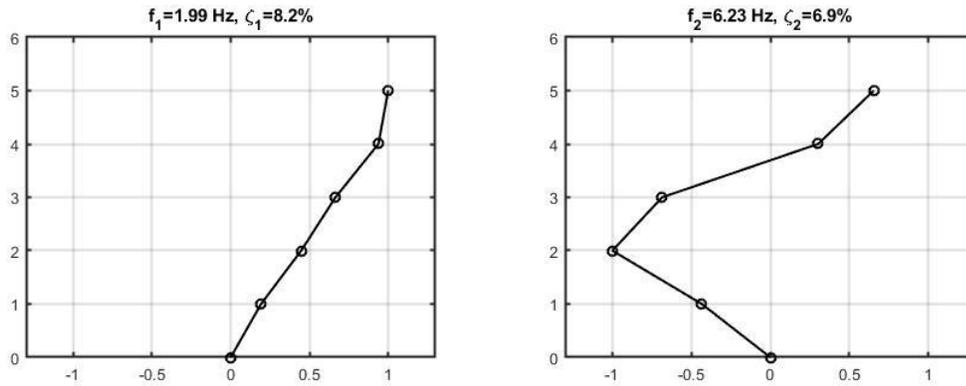


Figura 8.92. Formas Modales, Frecuencias y Amortiguamientos - Configuración F2.

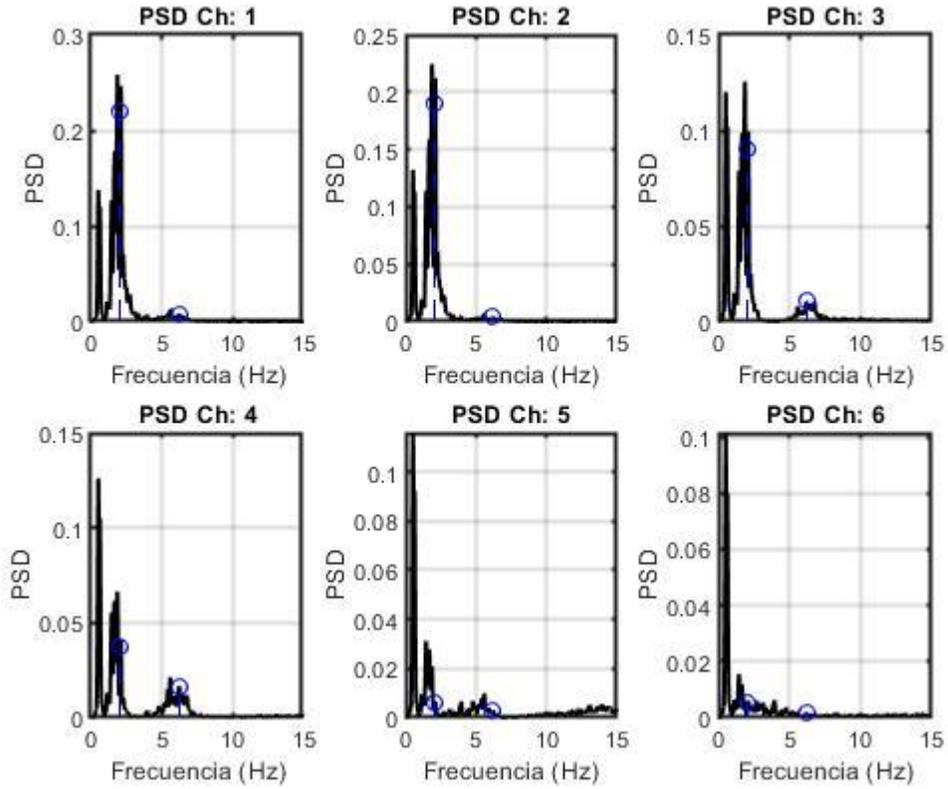


Figura 8.93. Espectro de Potencia - Configuración F2.

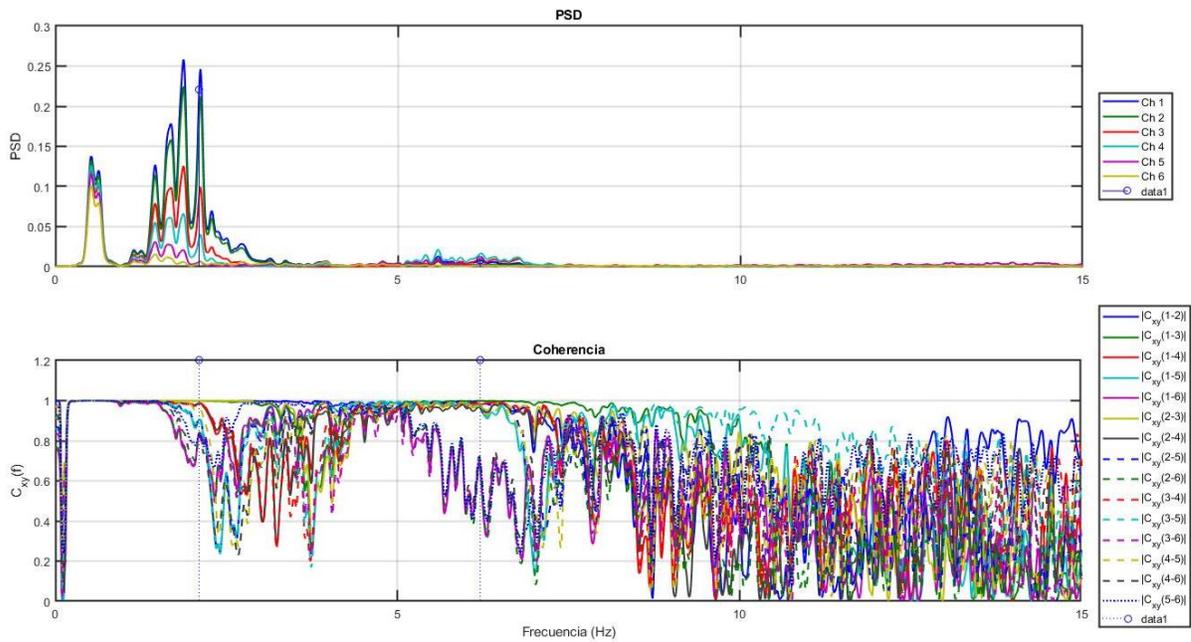


Figura 8.94. Coherencia de Frecuencias Identificadas - Configuración F2.

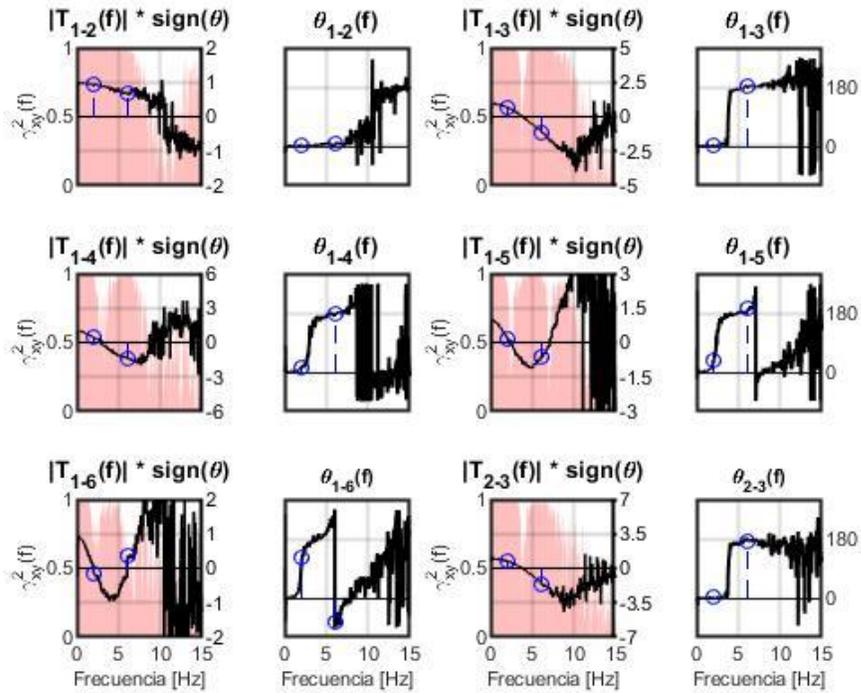


Figura 8.95. Función de Transferencia (1) - Configuración F2.

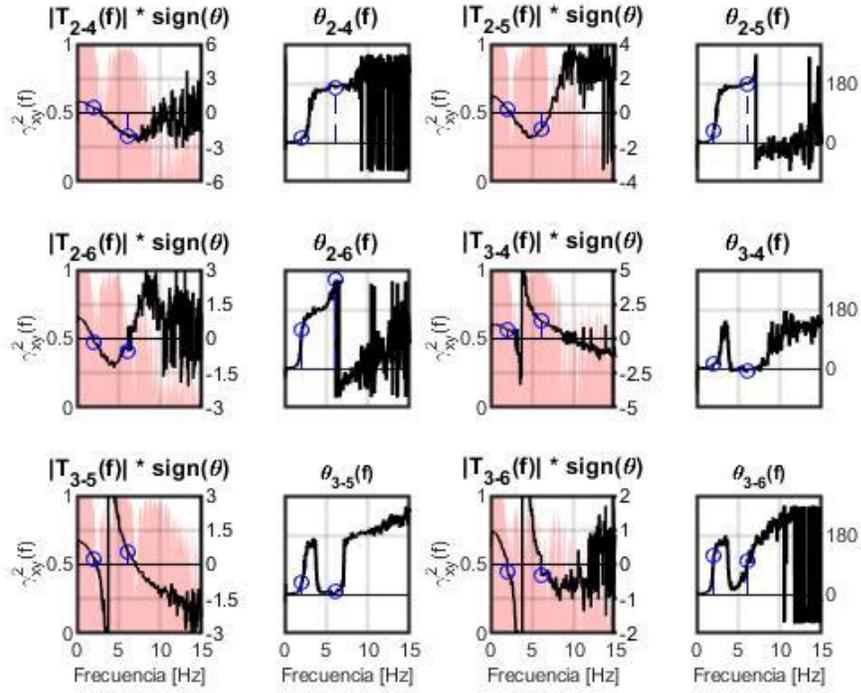


Figura 8.96. Función de Transferencia (2) - Configuración F2.

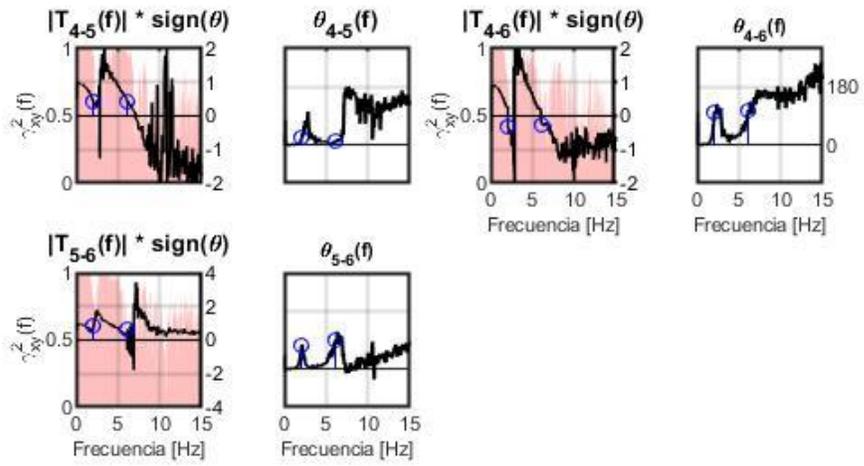


Figura 8.97. Función de Transferencia (3) - Configuración F2.

8.4. Anexo D: Resultados mediante DSI para Pequeñas Ventanas de Tiempo

8.4.1. Configuración A ¹²²

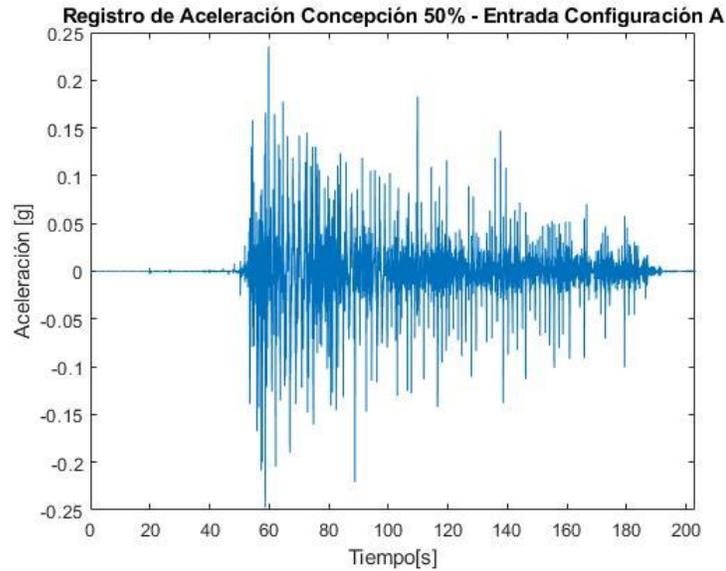


Figura 8.98. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración A.

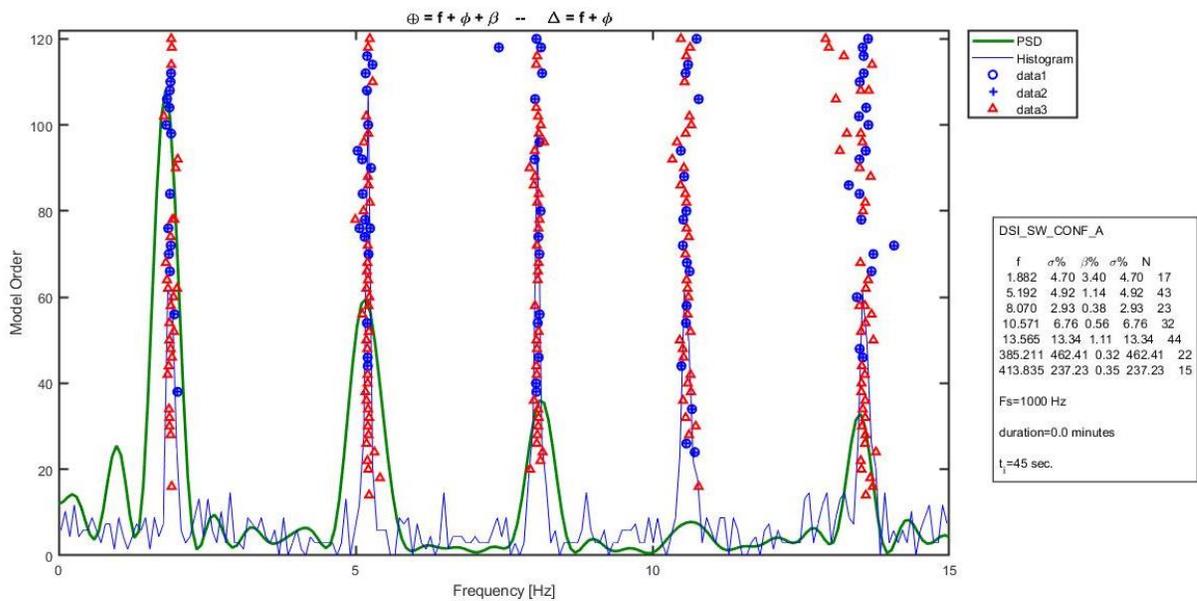


Figura 8.99. Diagrama de Estabilidad, $t_1=45$ [s] - Configuración A.

¹²² Configuración A: Estructura base, sin presencia de cables ni disipadores.

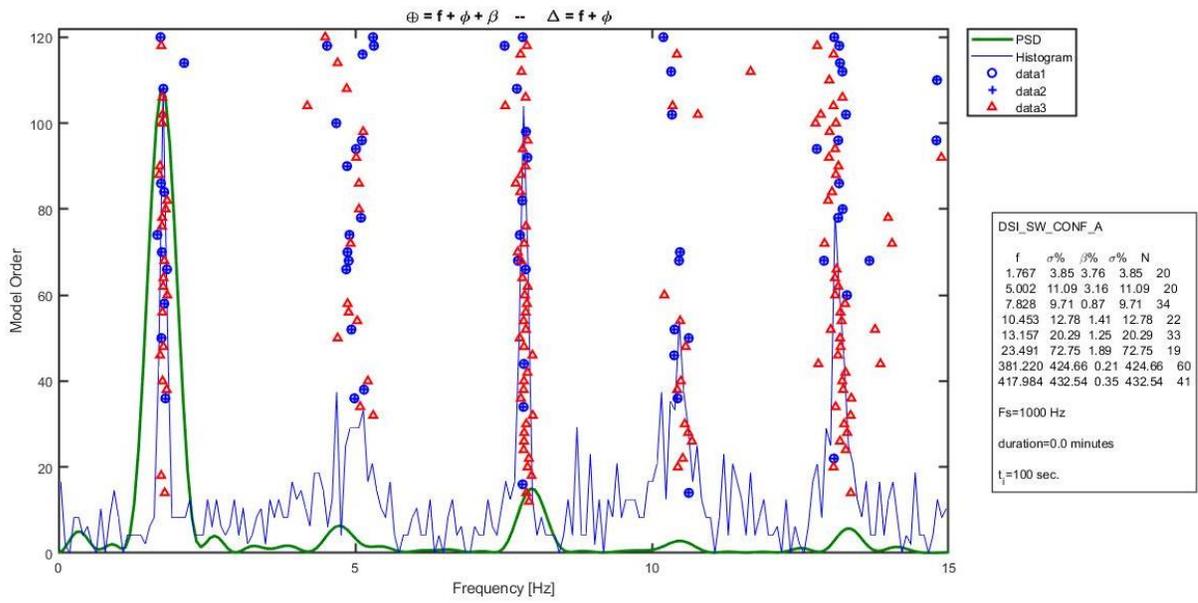


Figura 8.100. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración A.

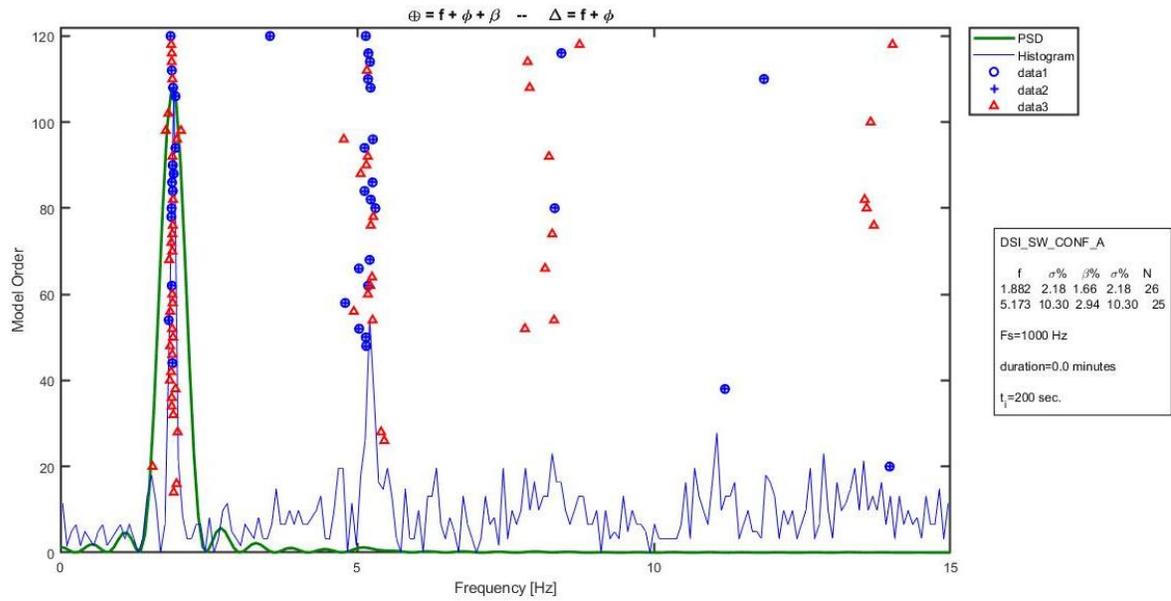


Figura 8.101. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración A.

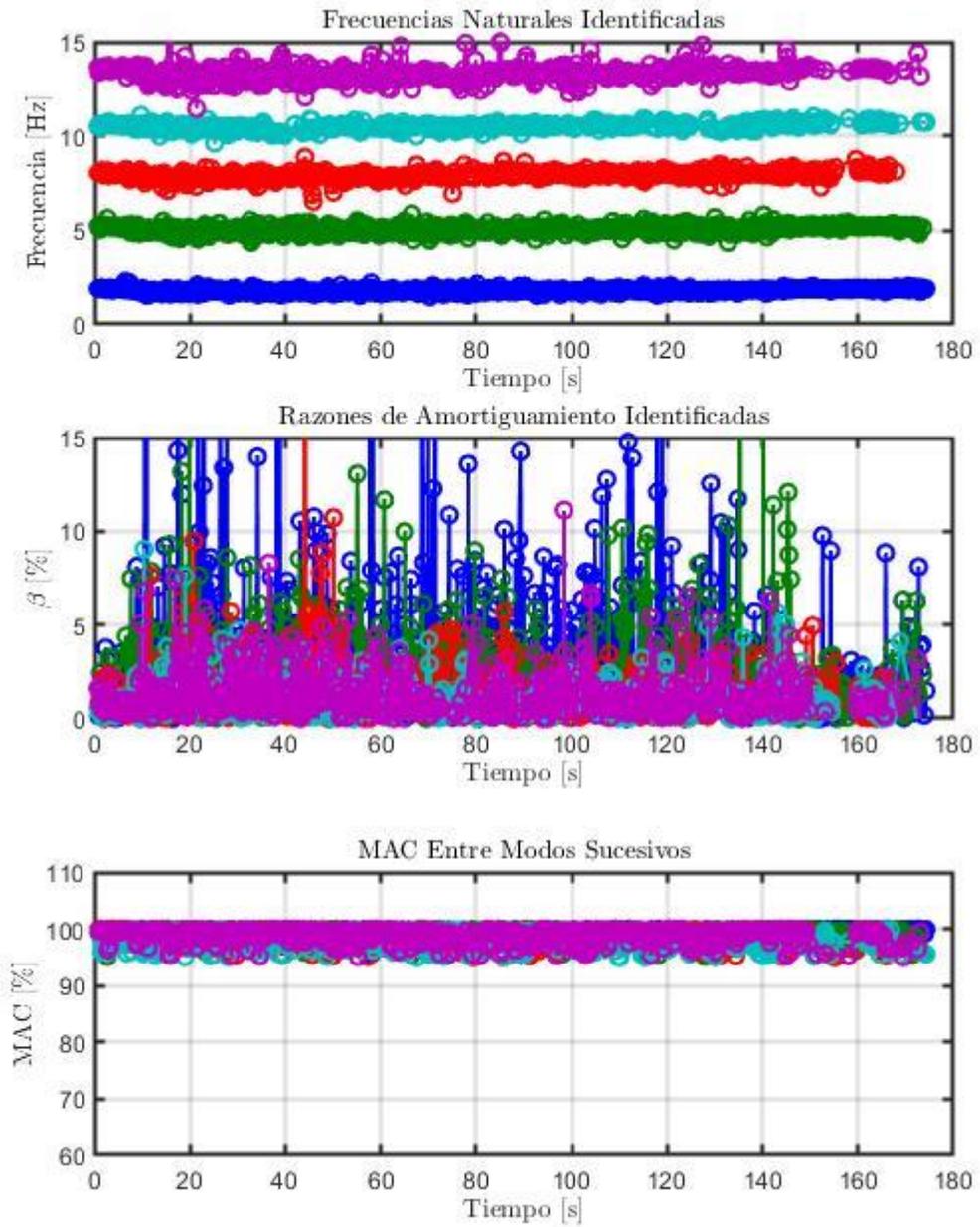


Figura 8.102. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración A.

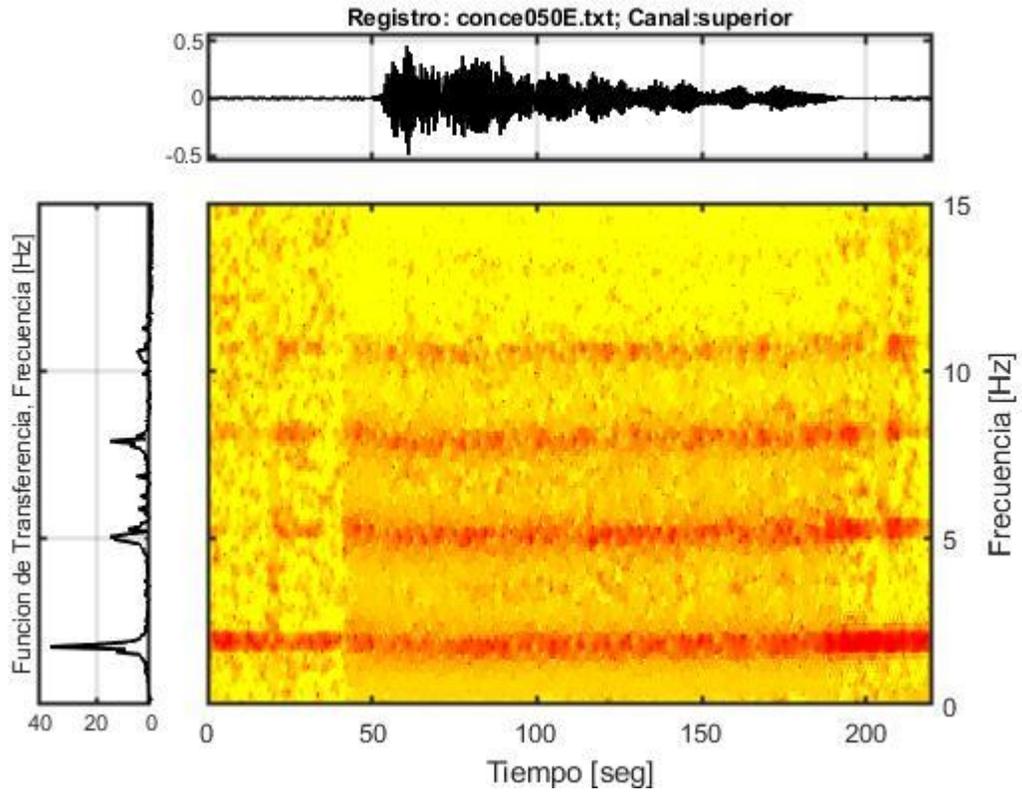


Figura 8.103. Función de Transferenciograma - Configuración A.

8.4.2. Configuración B ¹²³

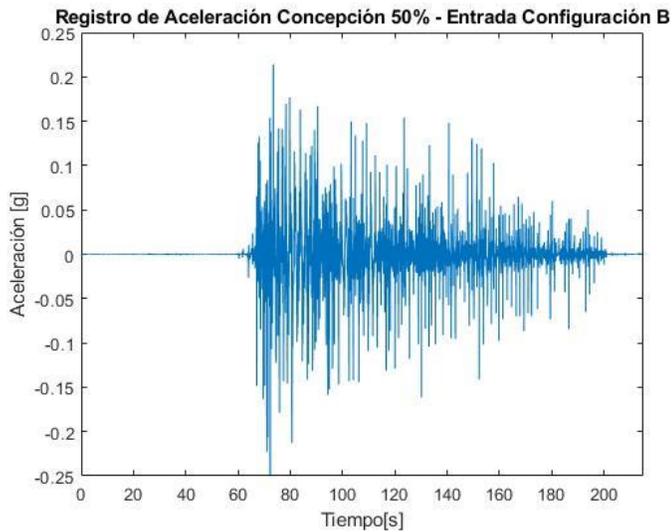


Figura 8.104. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración B.

¹²³ Configuración B: Estructura con un disipador Tipo I instalado en serie con el cable.

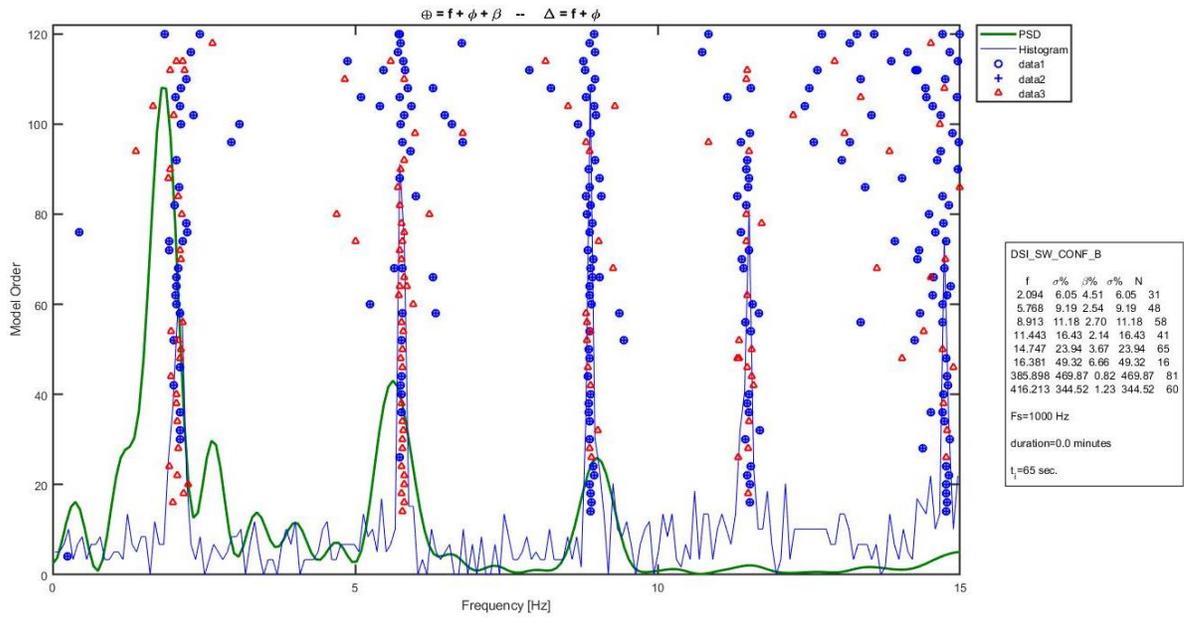


Figura 8.105. Diagrama de Estabilidad, $t_1=65$ [s] - Configuración B.

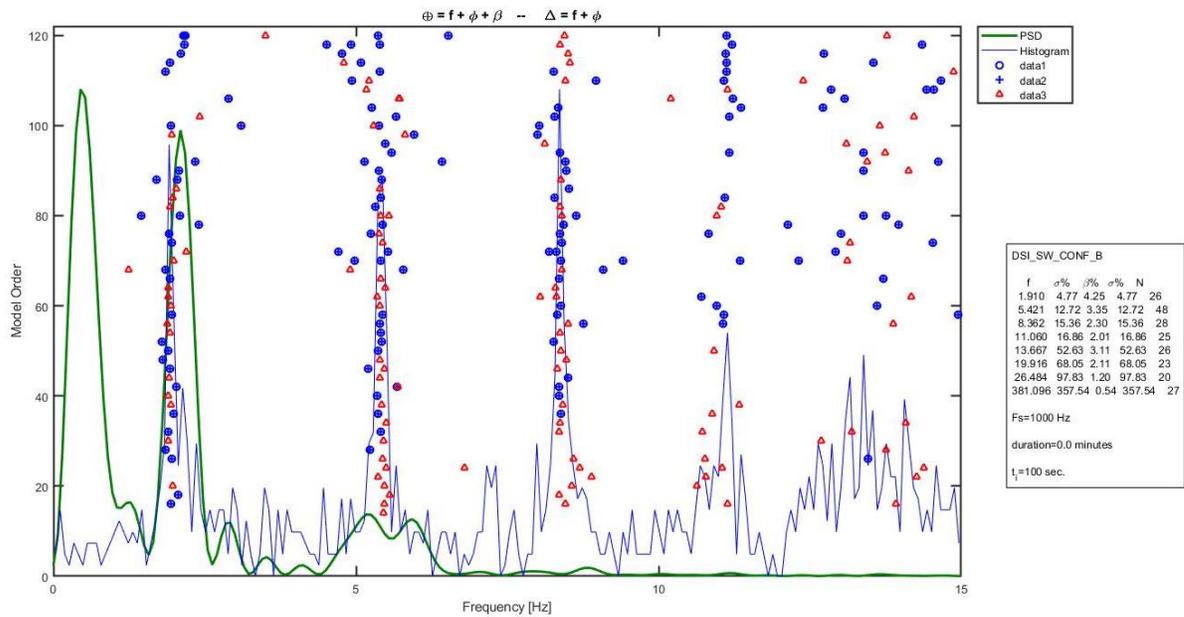


Figura 8.106. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración B.

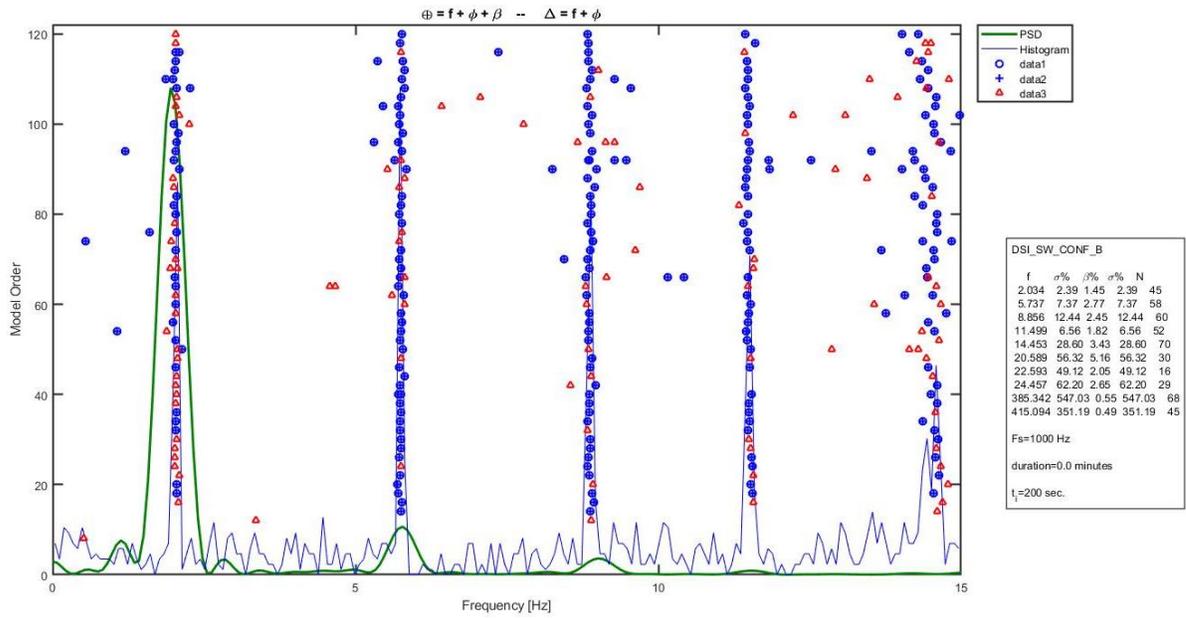


Figura 8.107. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración B.

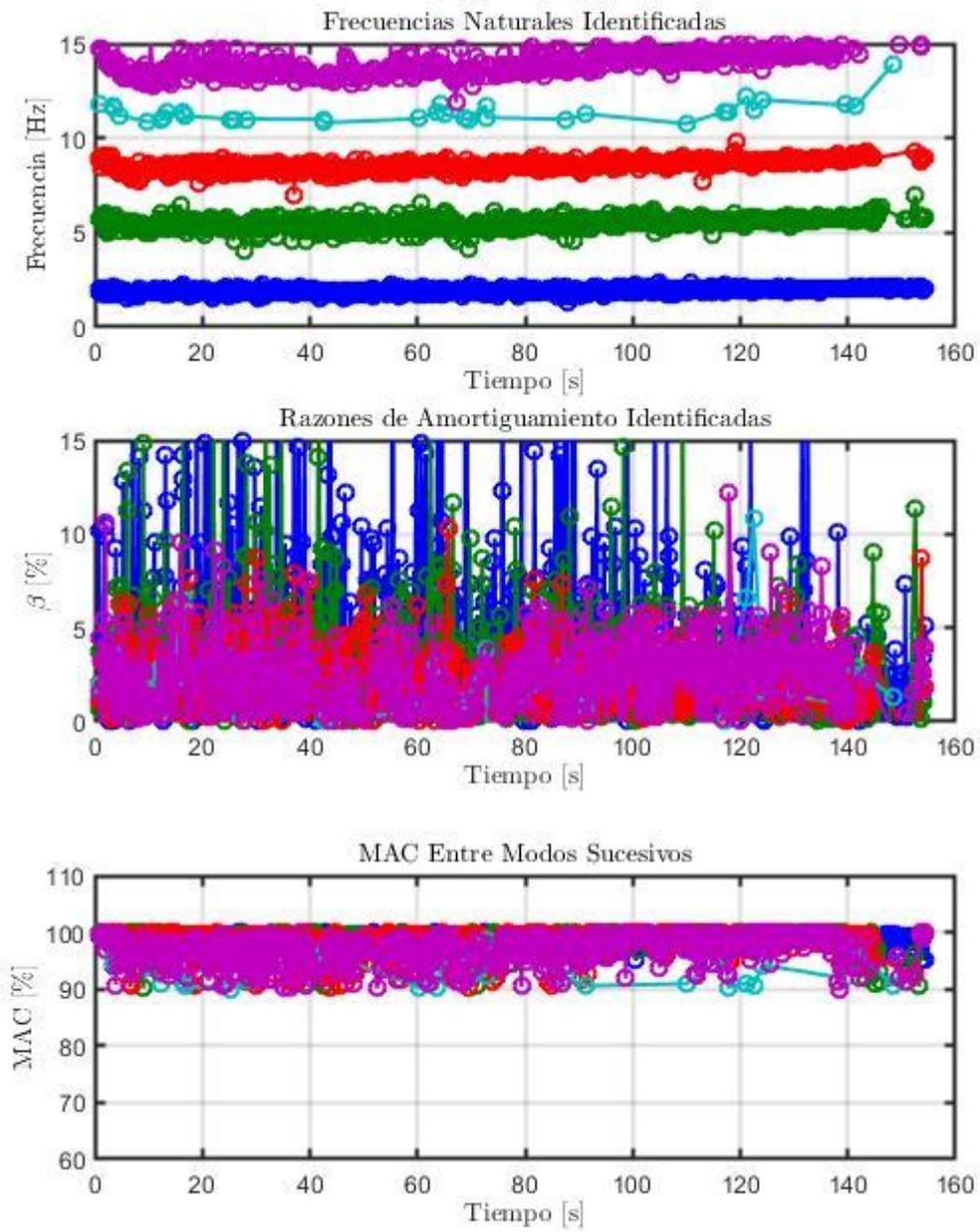


Figura 8.108. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración B.

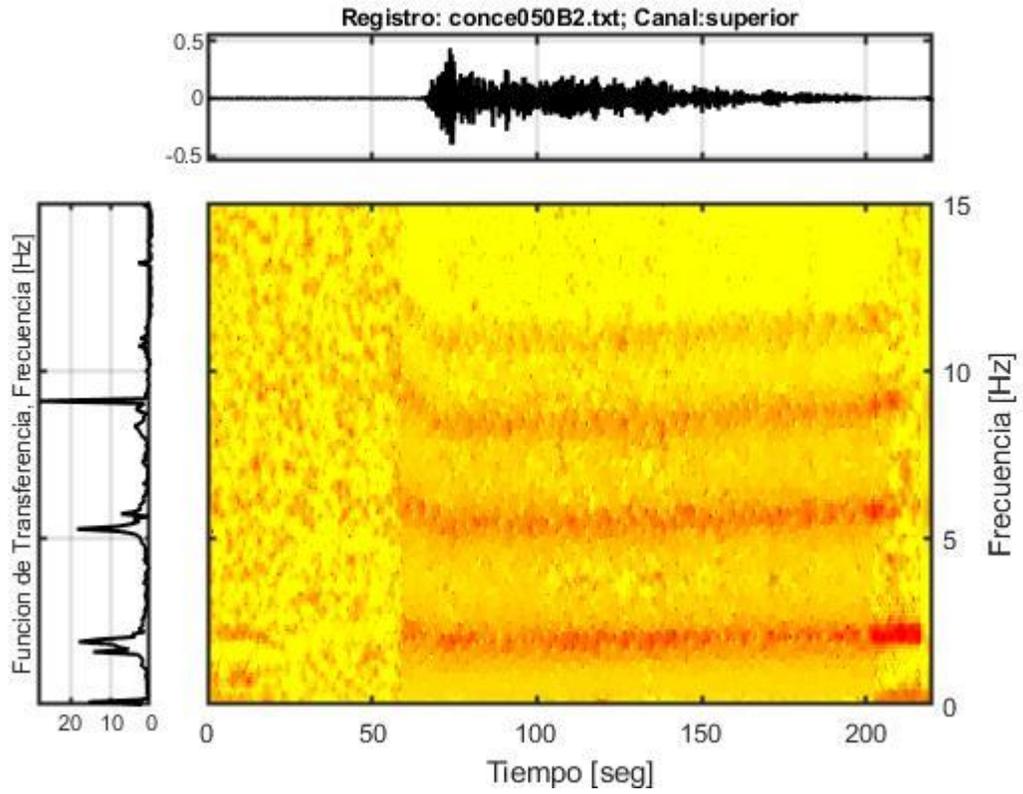


Figura 8.109. Función de Transferenciograma - Configuración B.

8.4.3. Configuración B2 ¹²⁴

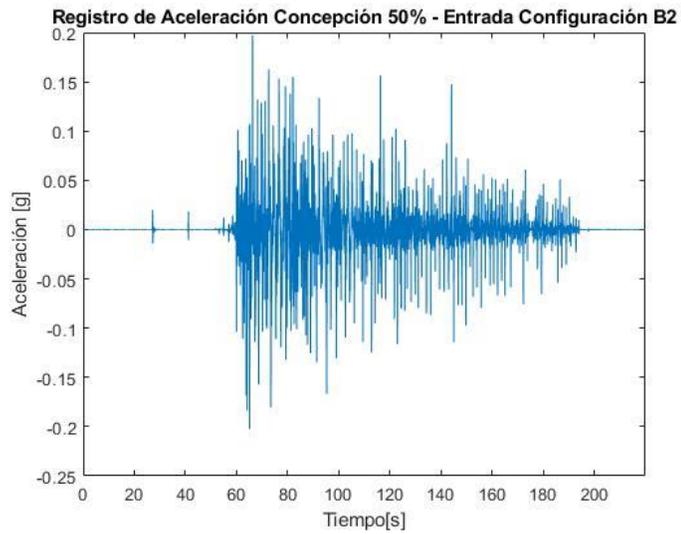


Figura 8.110. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración B2.

¹²⁴ Configuración B2: Estructura con un disipador Tipo II instalado en serie con el cable.

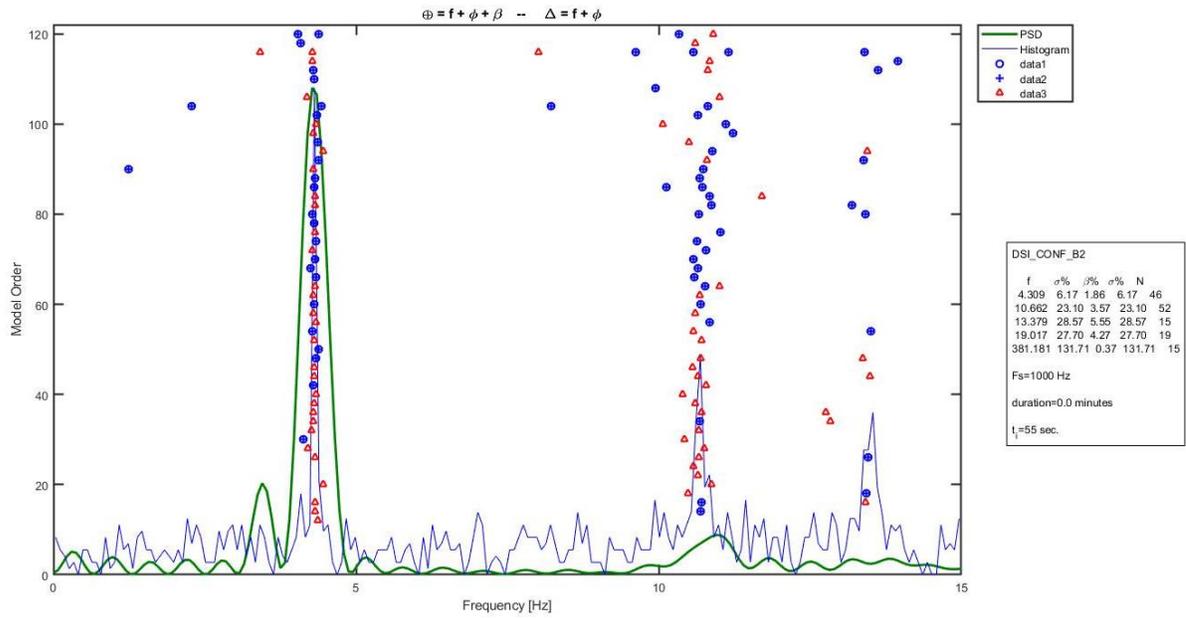


Figura 8.111. Diagrama de Estabilidad, $t_1=55$ [s] - Configuración B2.

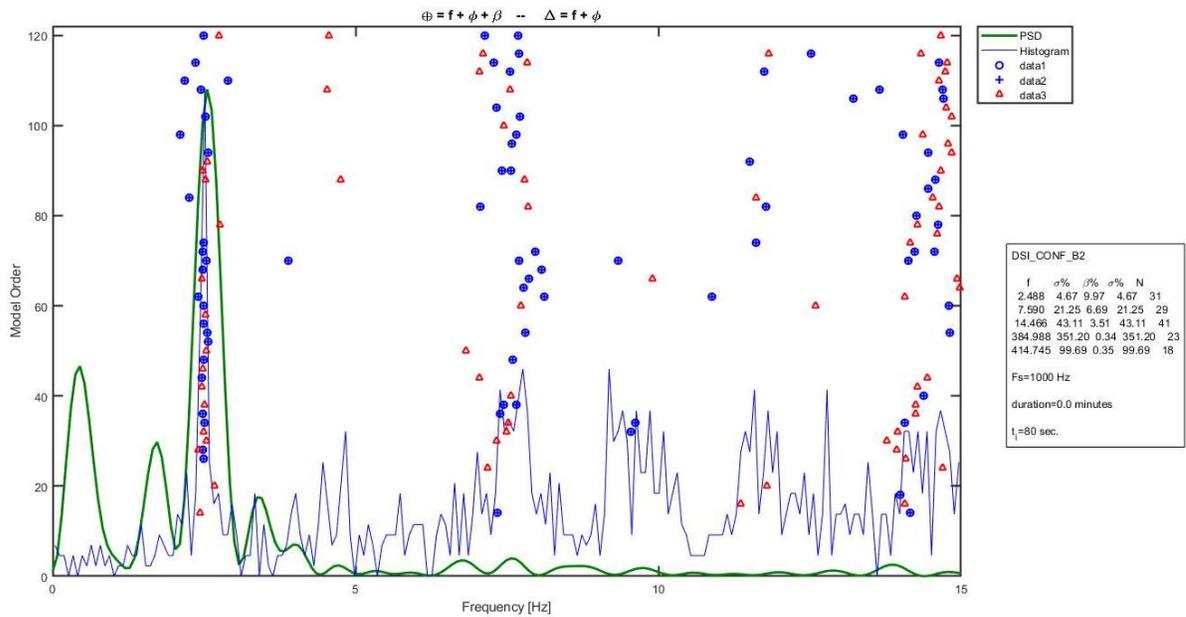


Figura 8.112. Diagrama de Estabilidad, $t_2=80$ [s] - Configuración B2.

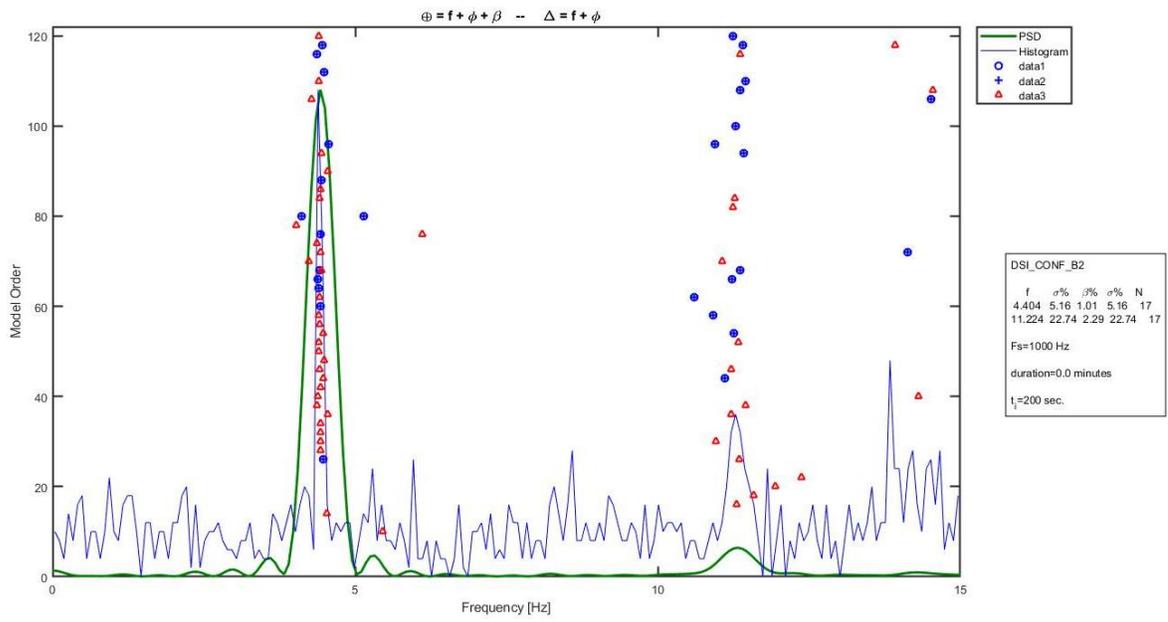


Figura 8.113. Diagrama de Estabilidad, t3=200 [s] - Configuración B2.

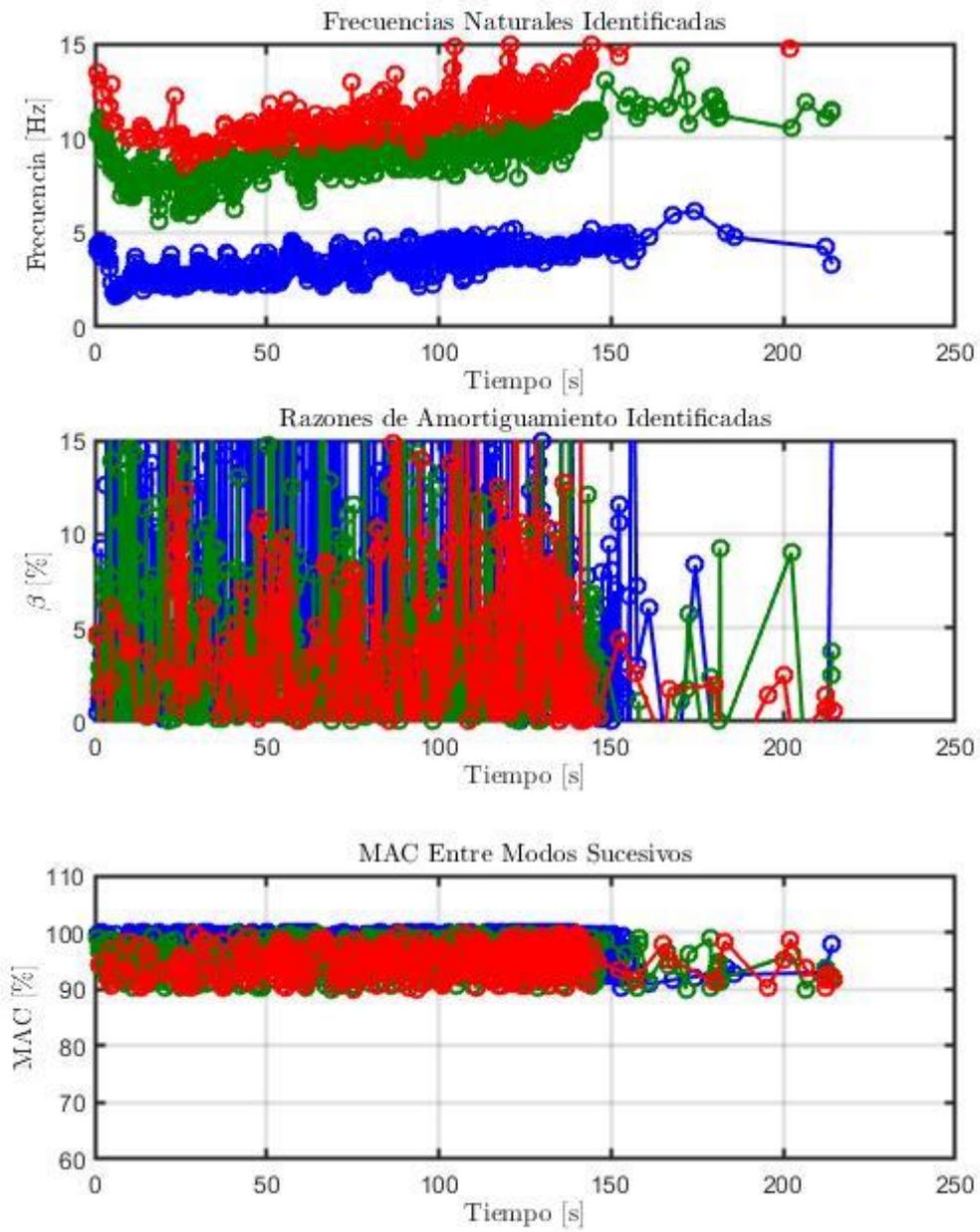


Figura 8.114. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración B2.

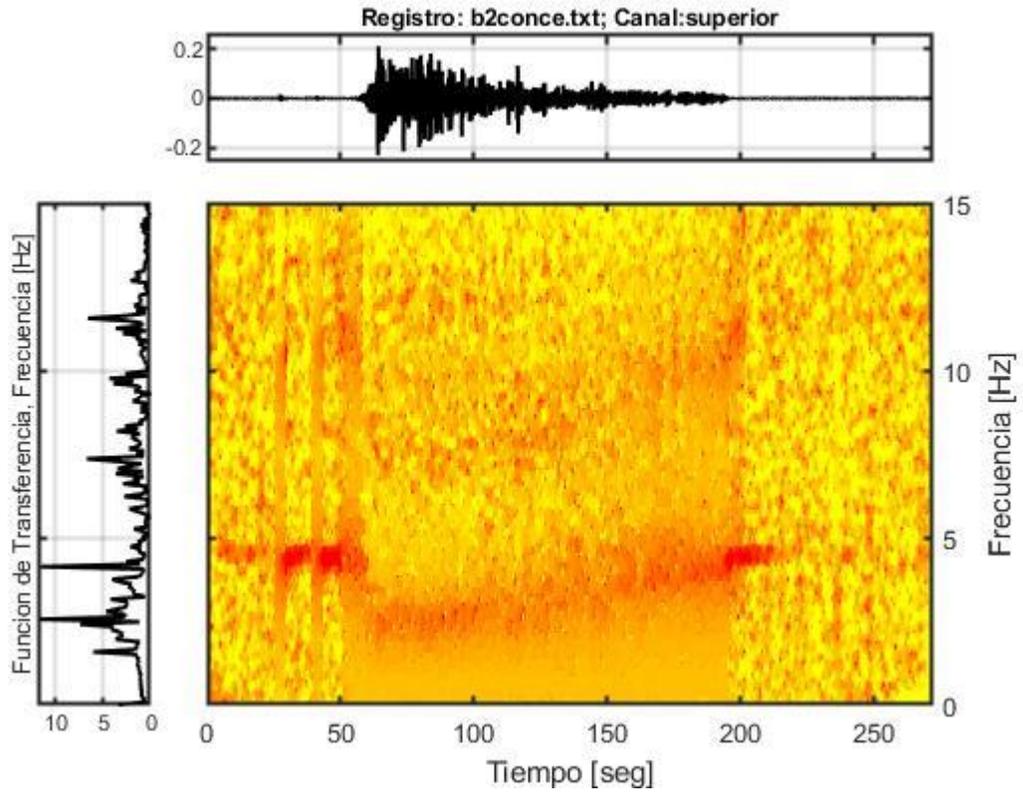


Figura 8.115. Función de Transferenciograma - Configuración B2.

8.4.4. Configuración C ¹²⁵

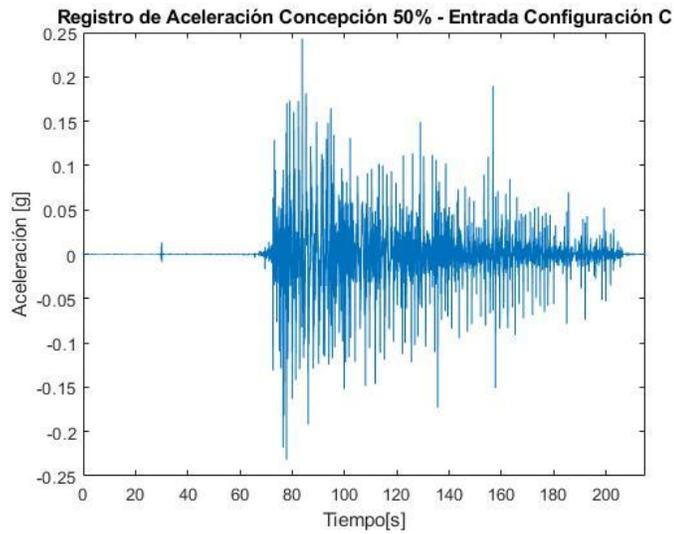


Figura 8.116. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración C.

¹²⁵ Configuración C: Estructura con presencia de cable con baja tensión.

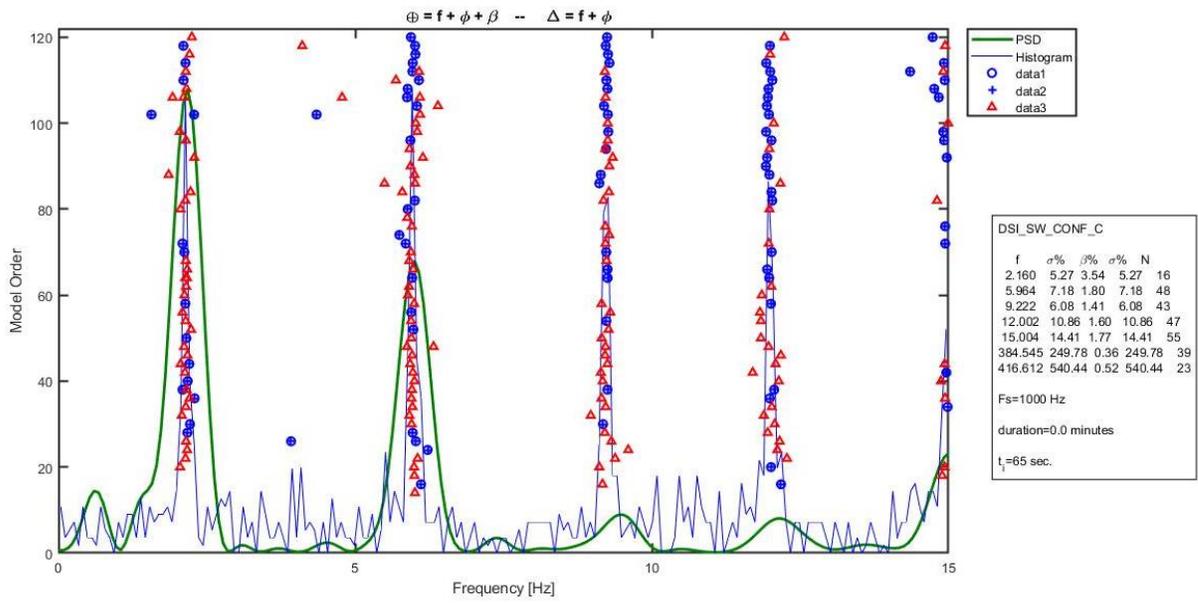


Figura 8.117. Diagrama de Estabilidad, $t_1=65$ [s] - Configuración C.

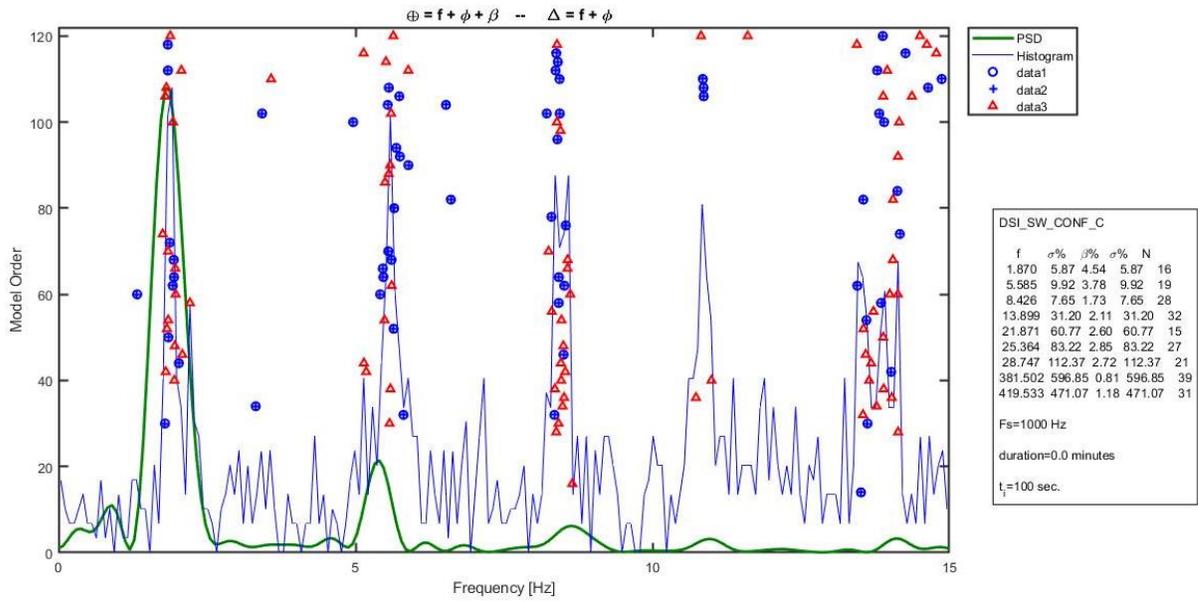


Figura 8.118. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración C.

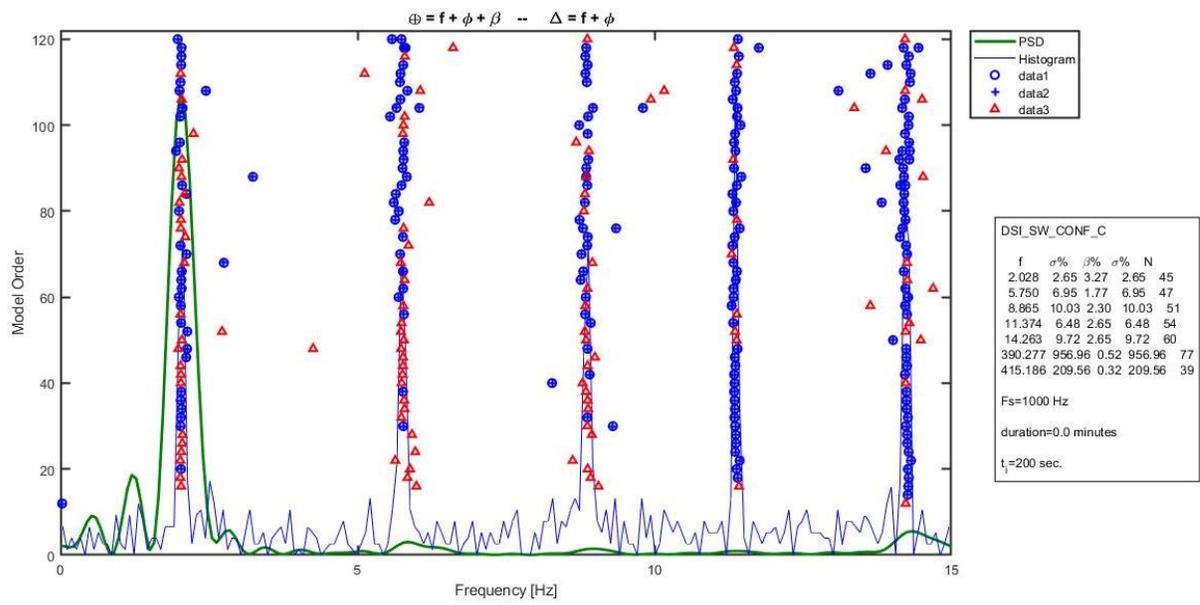


Figura 8.119. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración C.

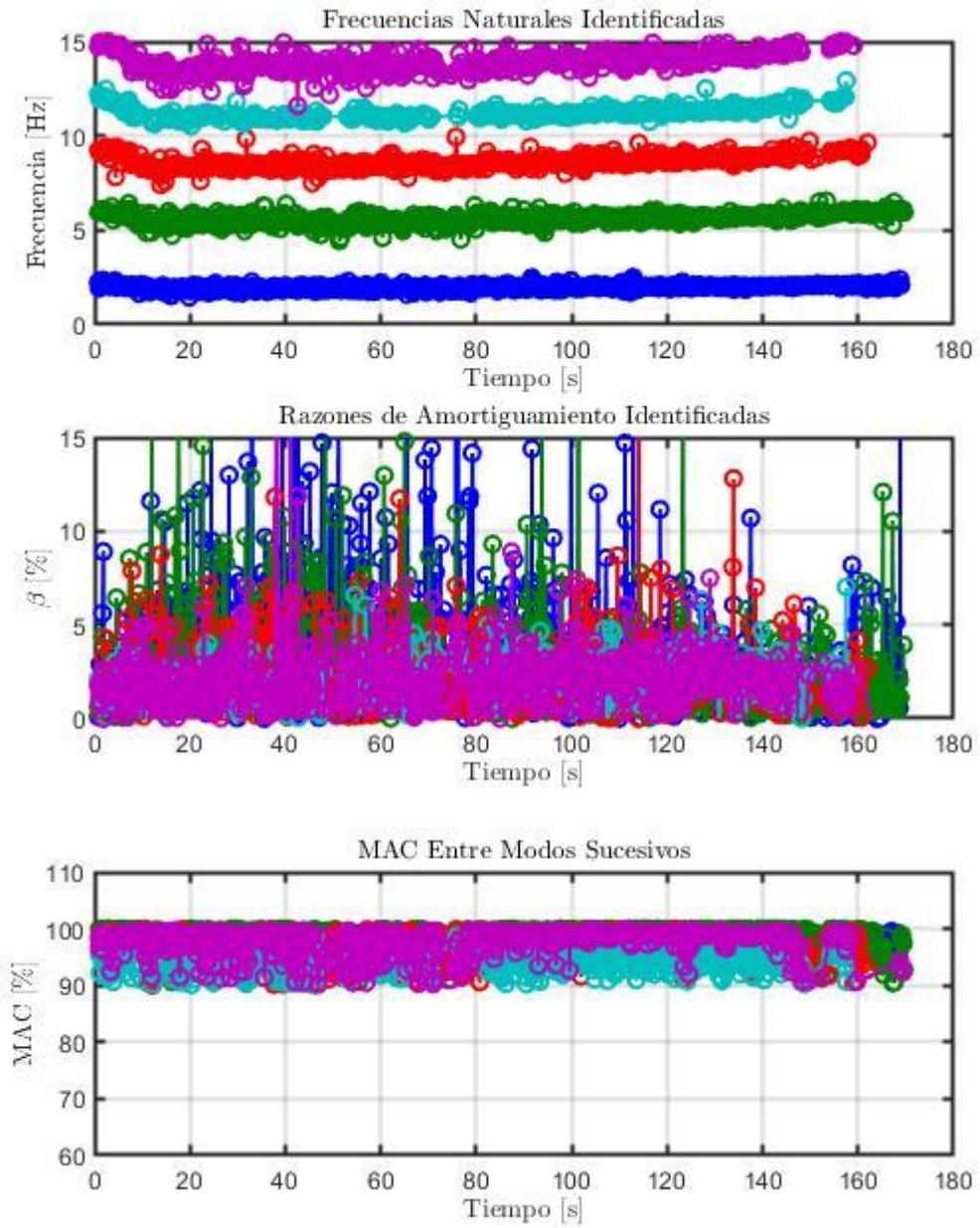


Figura 8.120. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración C.

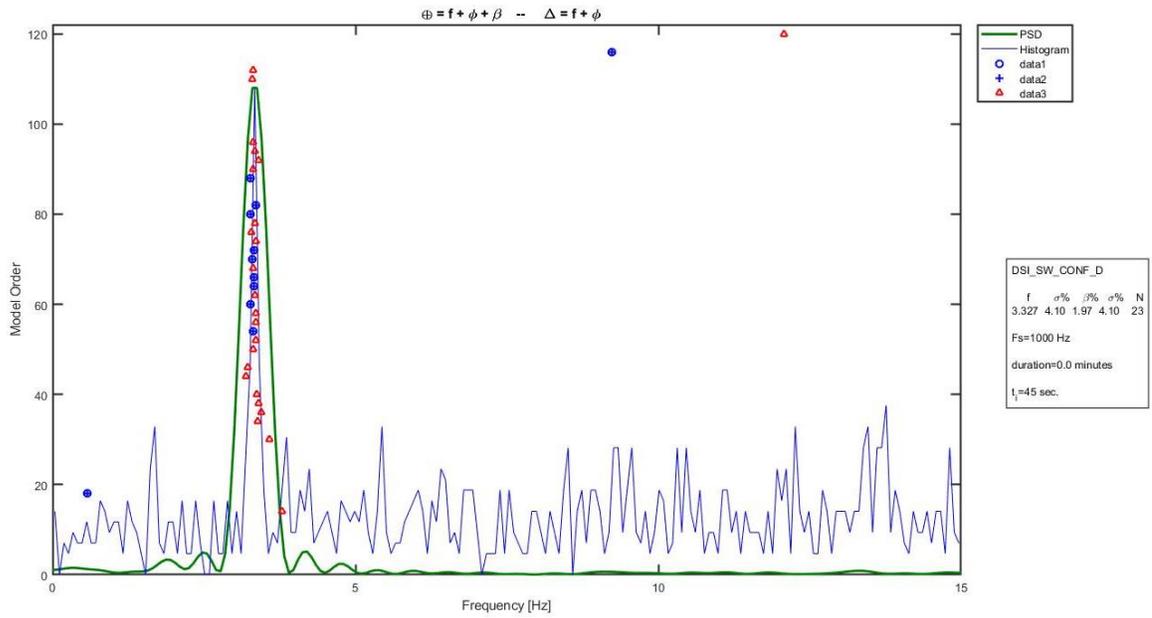


Figura 8.123. Diagrama de Estabilidad, $t_1=45$ [s] - Configuración D.

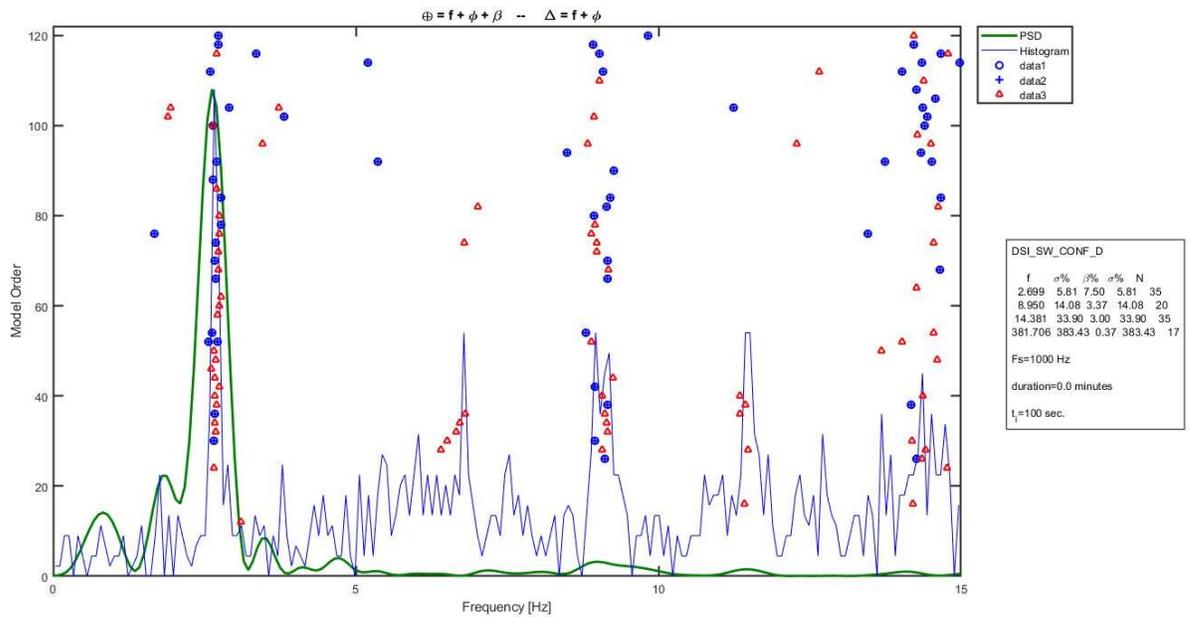


Figura 8.124. Diagrama de Estabilidad, $t_2=100$ [s] - Configuración D.

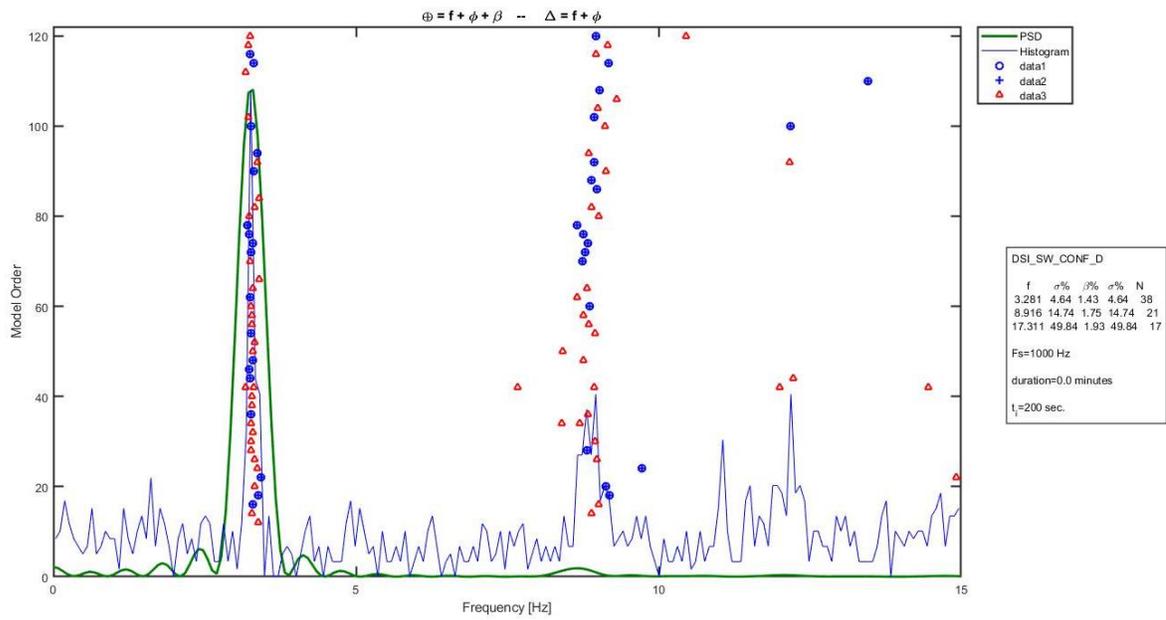


Figura 8.125. Diagrama de Estabilidad, t3=200 [s] - Configuración D.

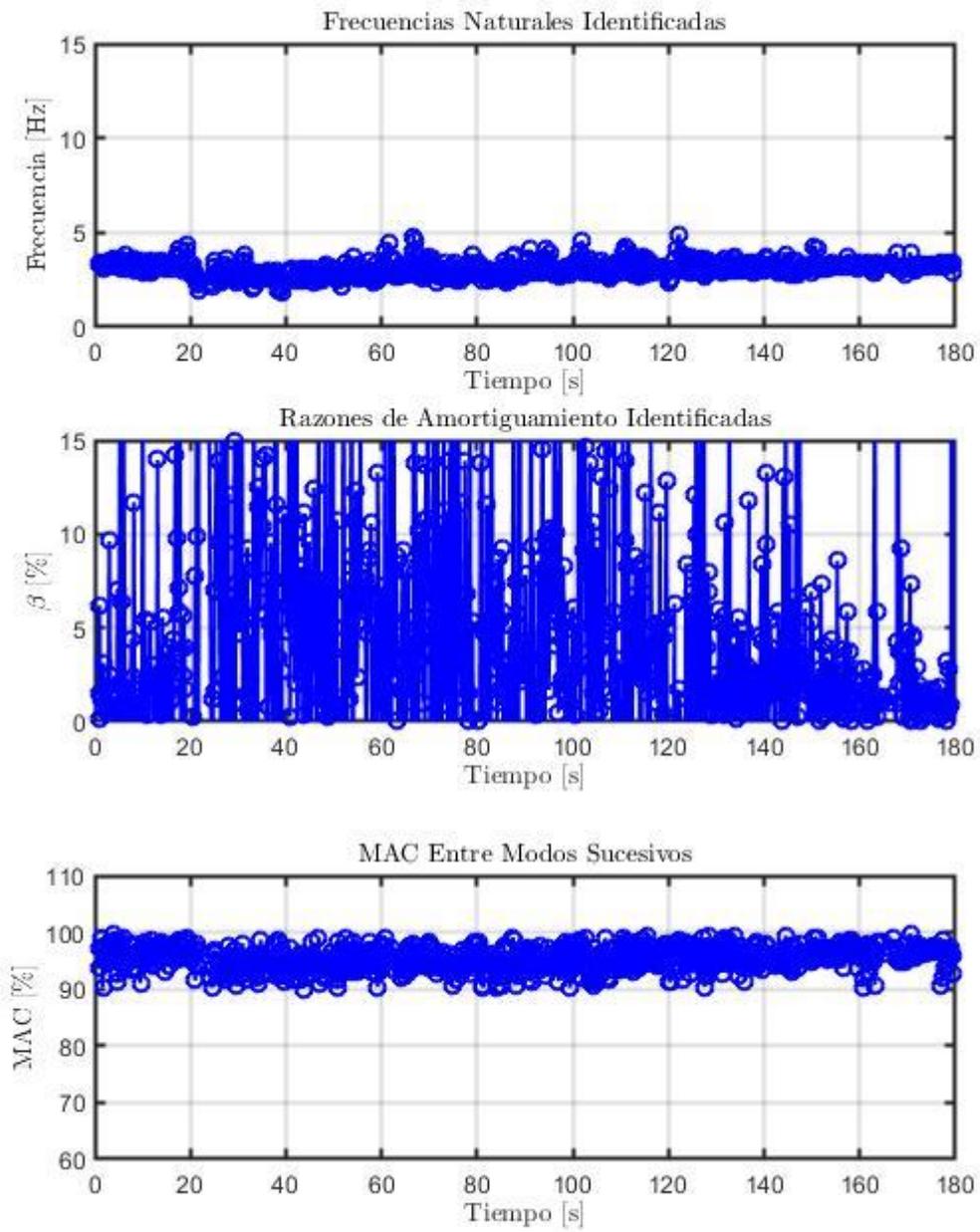


Figura 8.126. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración D.

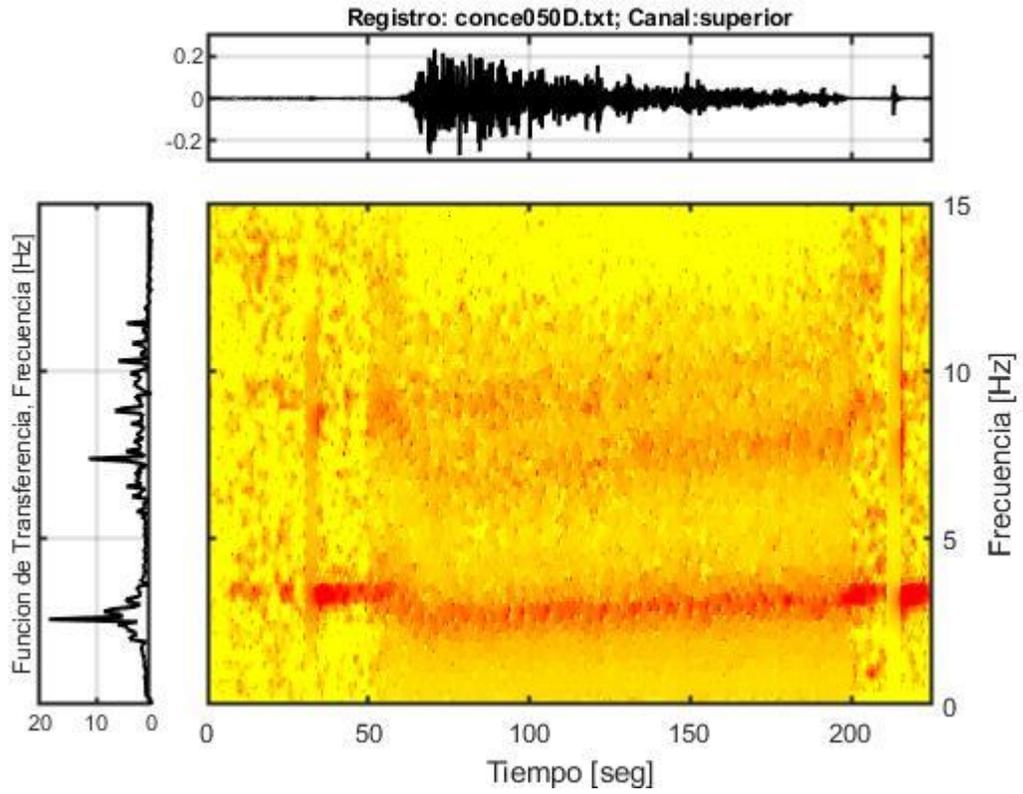


Figura 8.127. Función de Transferenciograma - Configuración D.

8.4.6. Configuración E ¹²⁷

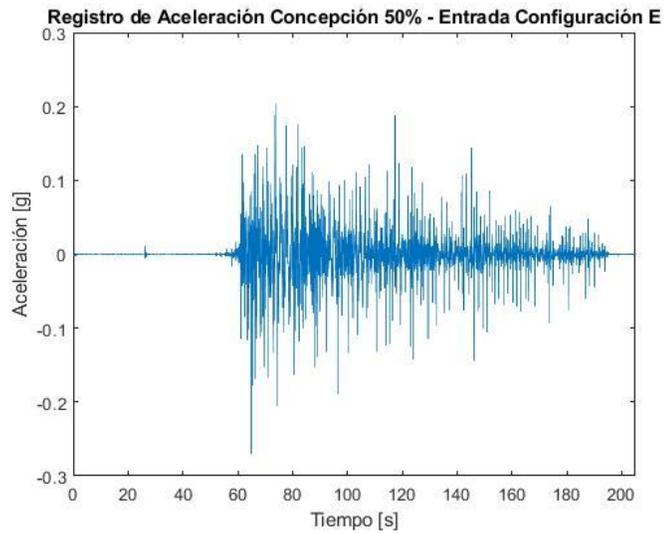


Figura 8.128. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración E.

¹²⁷ Configuración E: Estructura con disipadores Tipo I instalados en todos los niveles.

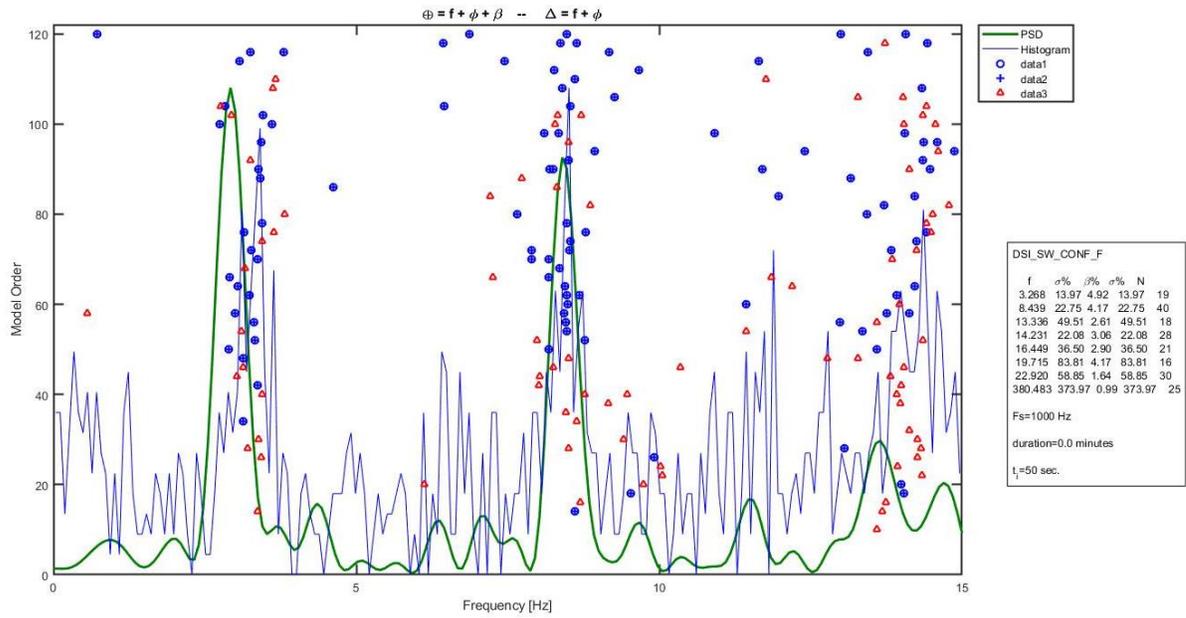


Figura 8.129. Diagrama de Estabilidad, $t_1=50$ [s] - Configuración E.

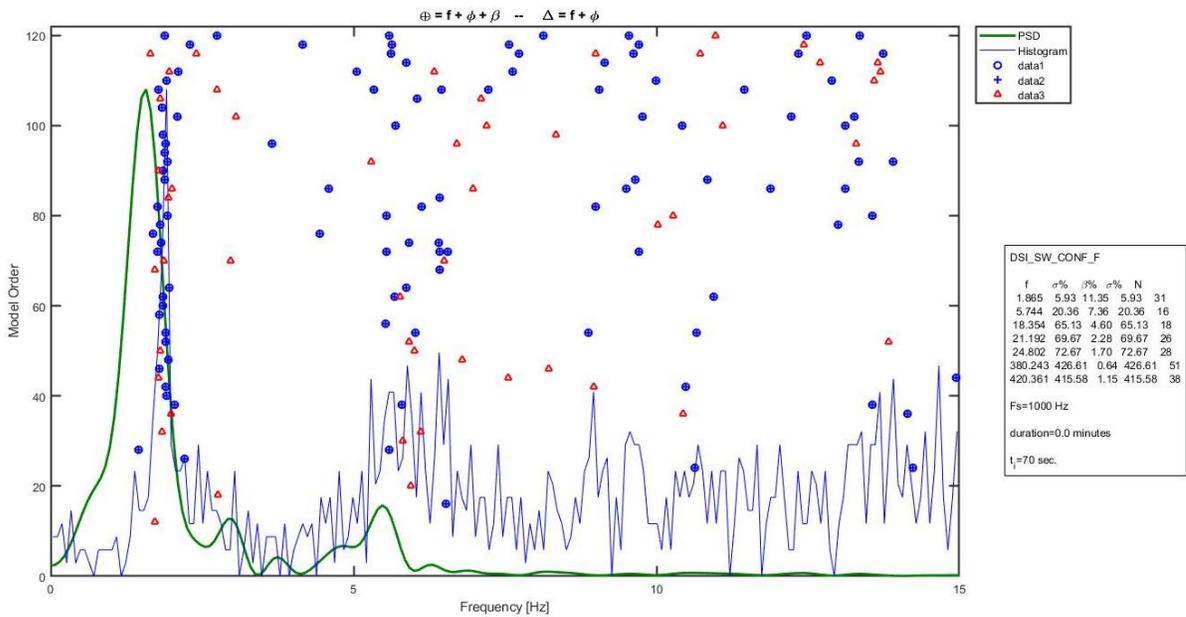


Figura 8.130. Diagrama de Estabilidad, $t_2=70$ [s] - Configuración E.

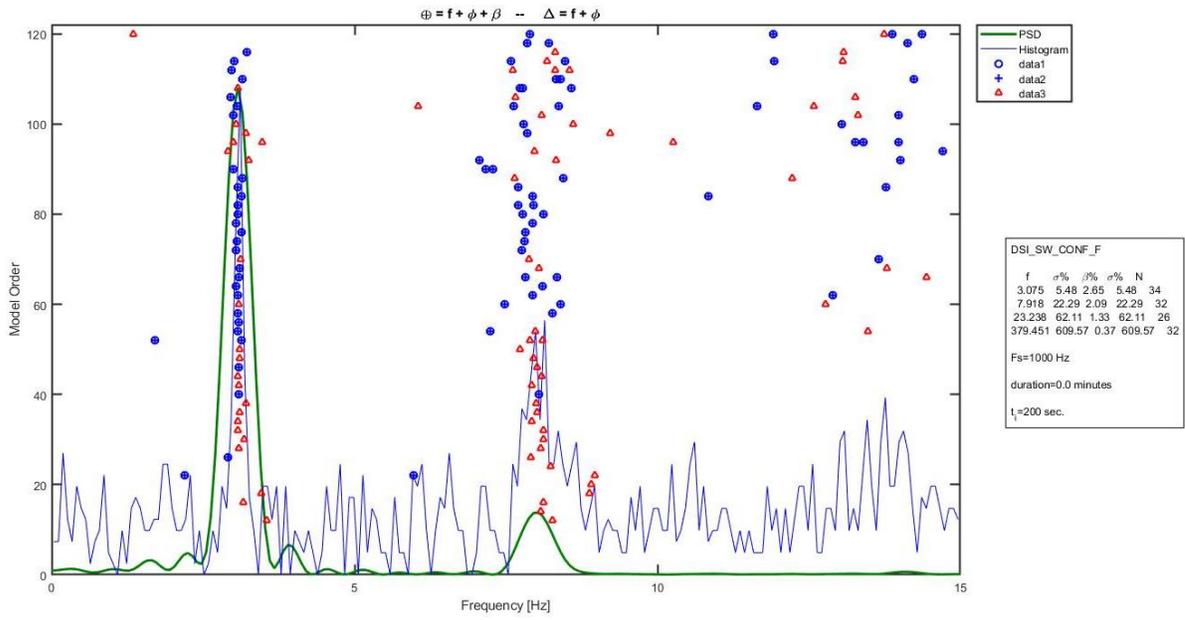


Figura 8.131. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración E.

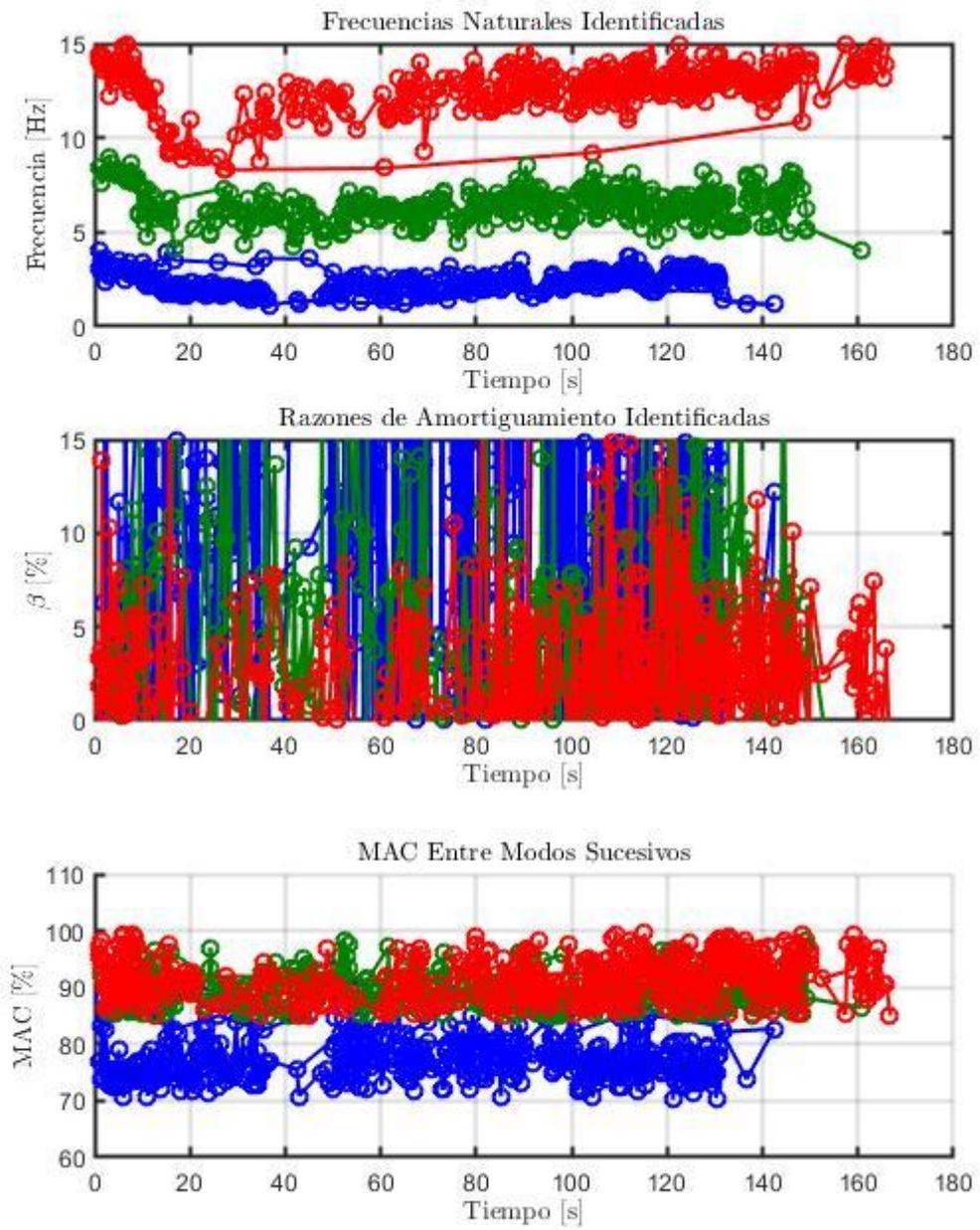


Figura 8.132. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración E.

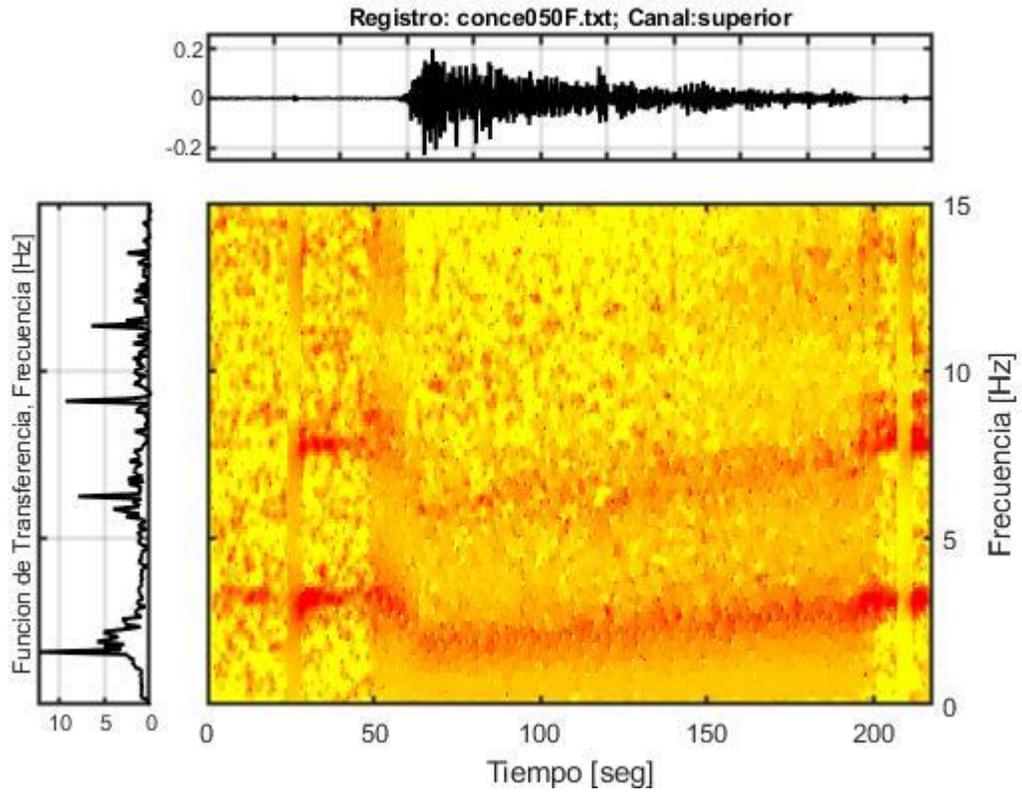


Figura 8.133. Función de Transferenciograma - Configuración E.

8.4.7. Configuración E2 ¹²⁸

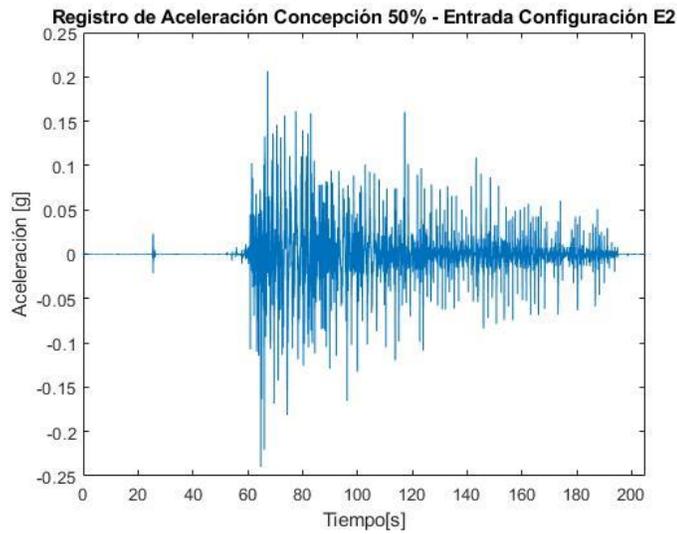


Figura 8.134. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración E2.

¹²⁸ Configuración E2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en todos los niveles.

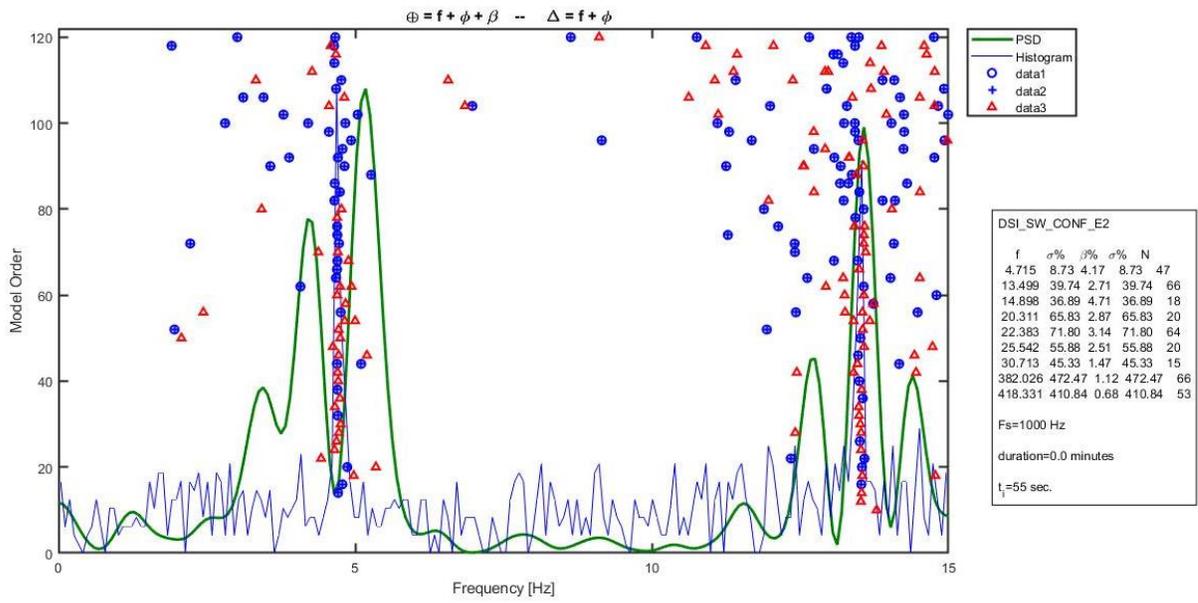


Figura 8.135. Diagrama de Estabilidad, $t_1=55$ [s] - Configuración E2.

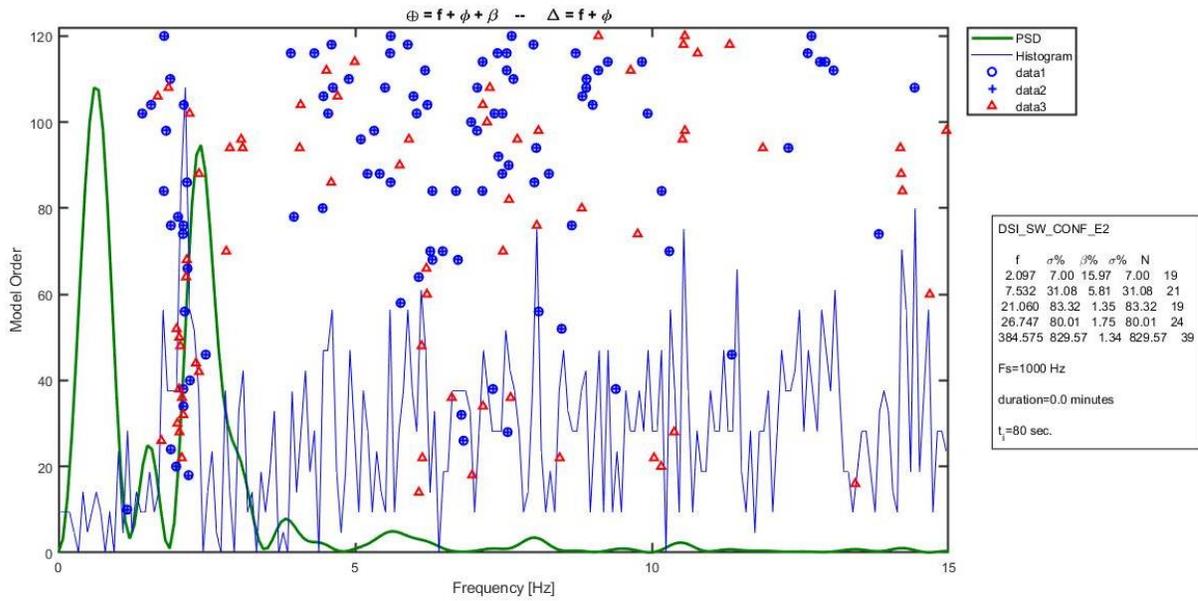


Figura 8.136. Diagrama de Estabilidad, $t_2=80$ [s] - Configuración E2.

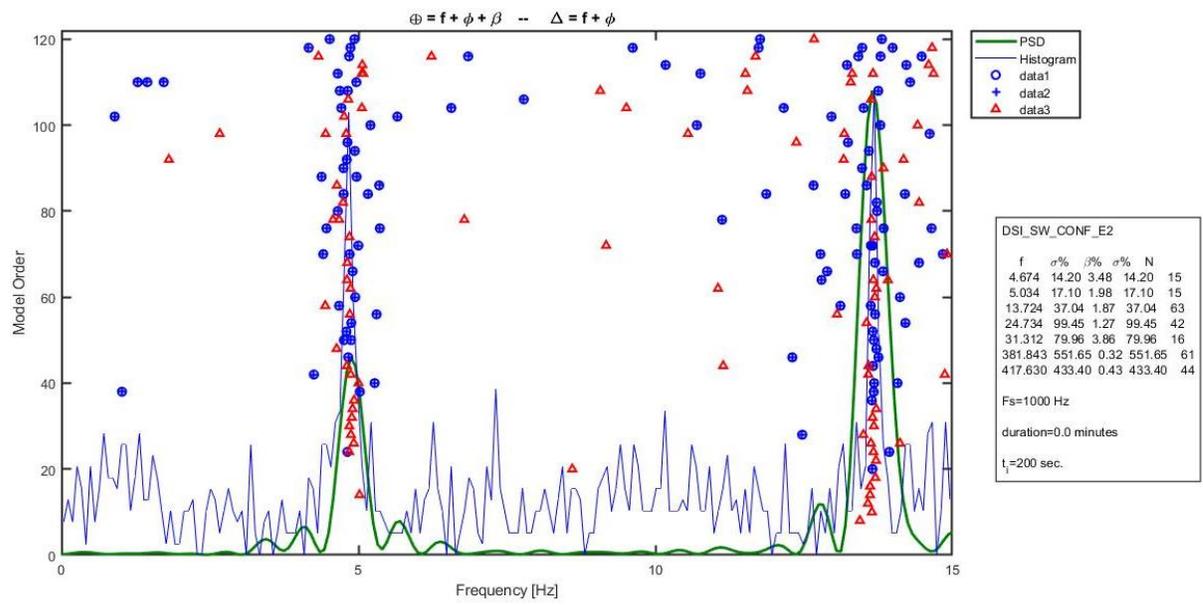


Figura 8.137. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración E2.

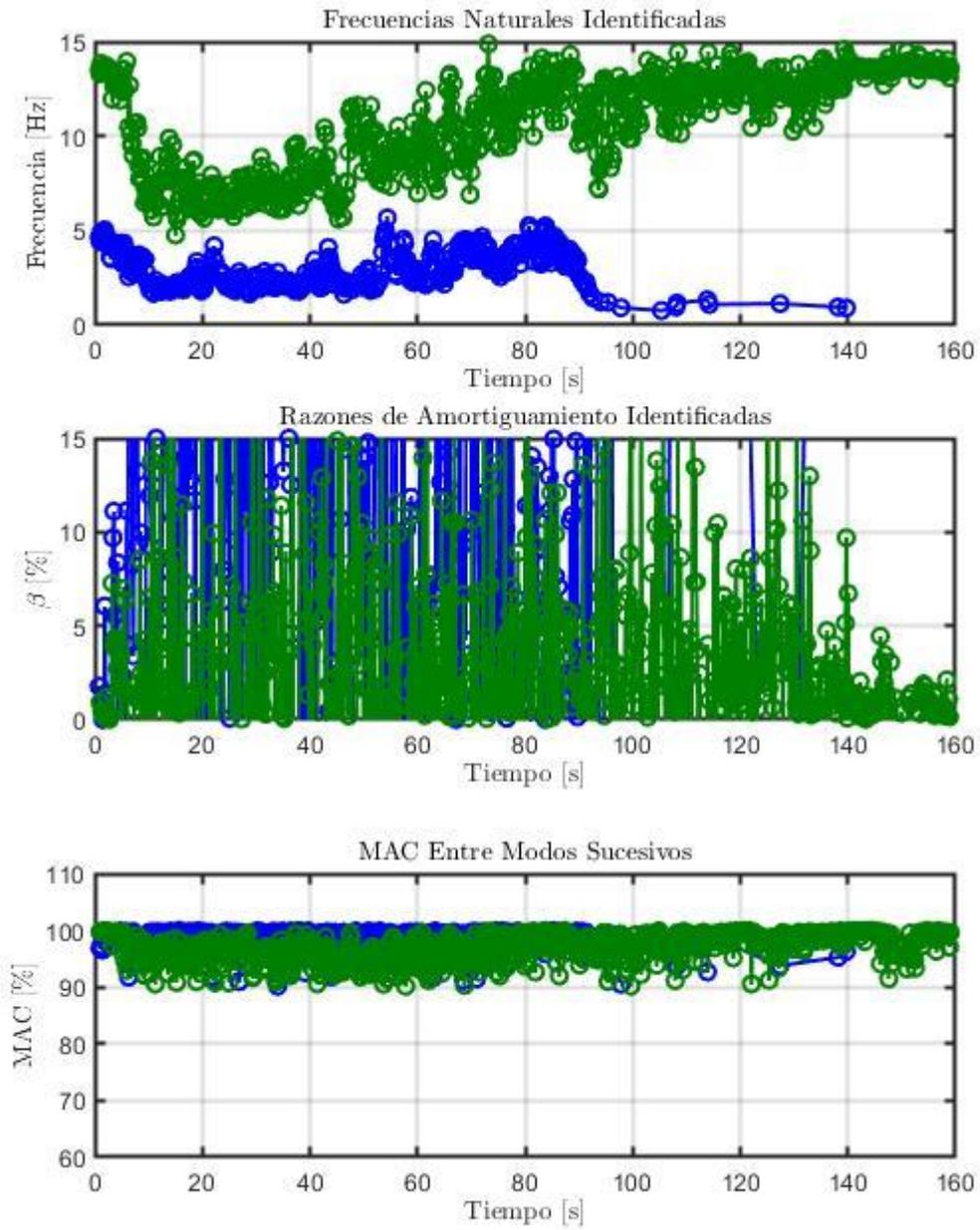


Figura 8.138. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración E2.

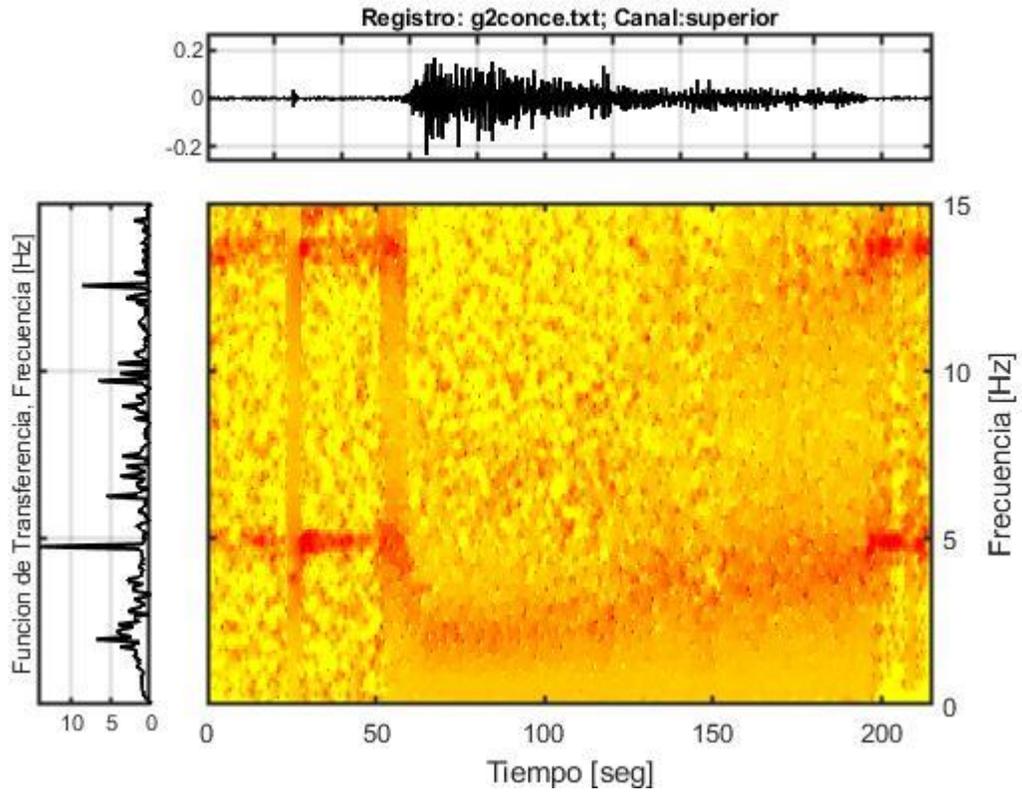


Figura 8.139. Función de Transferenciograma - Configuración E2.

8.4.8. Configuración F ¹²⁹

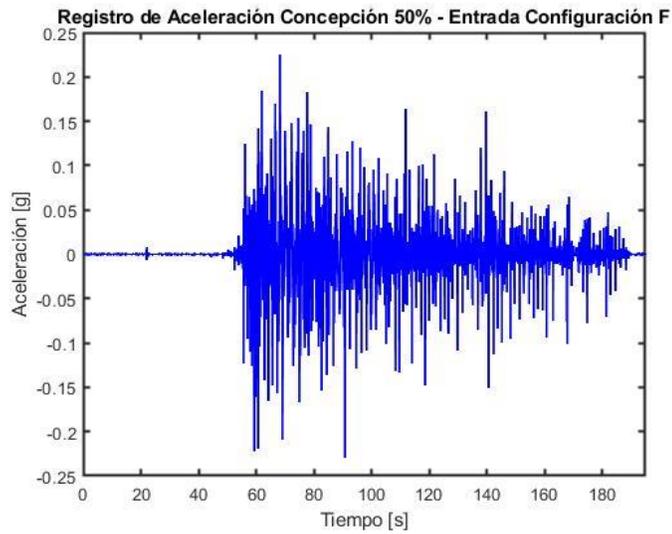


Figura 8.140. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración F.

¹²⁹ Configuración F: Estructura con disipadores Tipo I instalados en tres niveles.

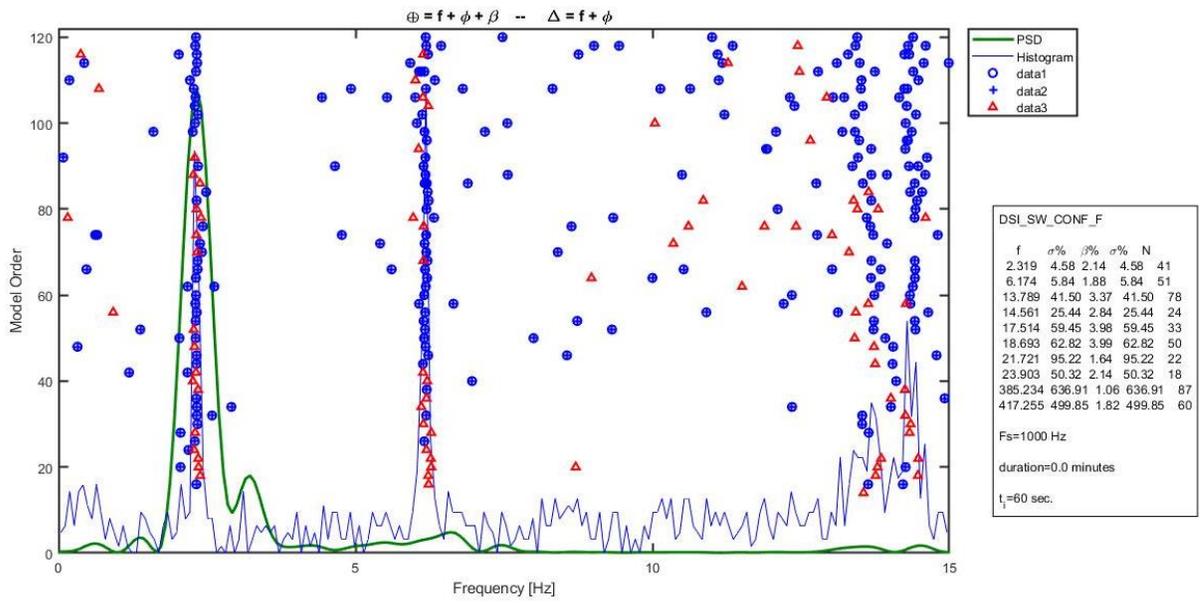


Figura 8.141. Diagrama de Estabilidad, $t_1=60$ [s] - Configuración F.

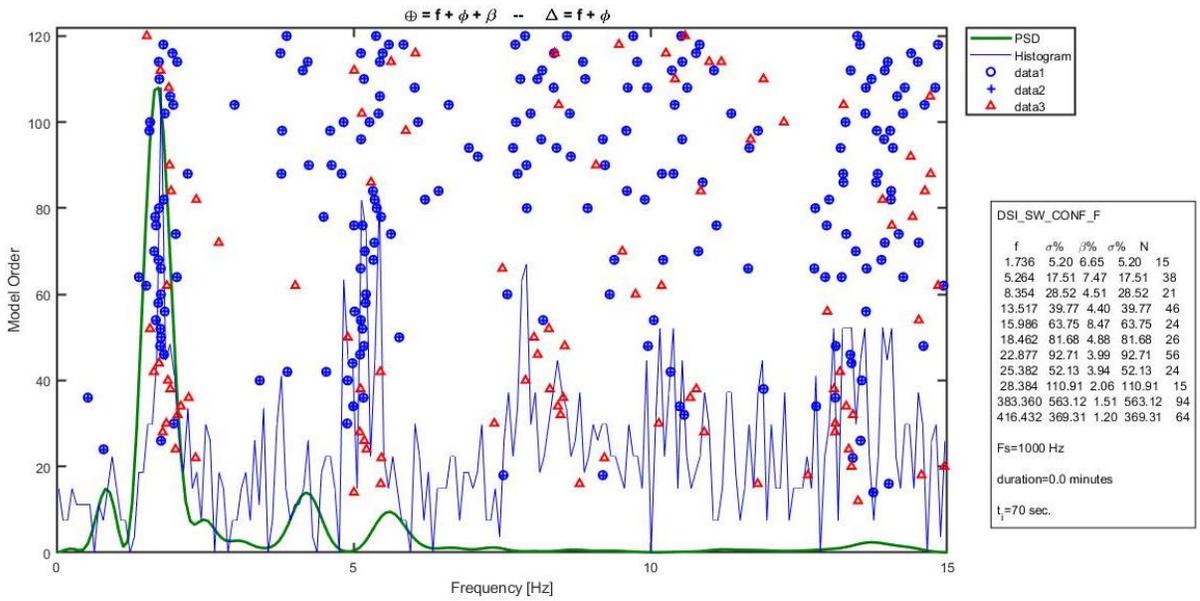


Figura 8.142. Diagrama de Estabilidad, $t_2=70$ [s] - Configuración F.

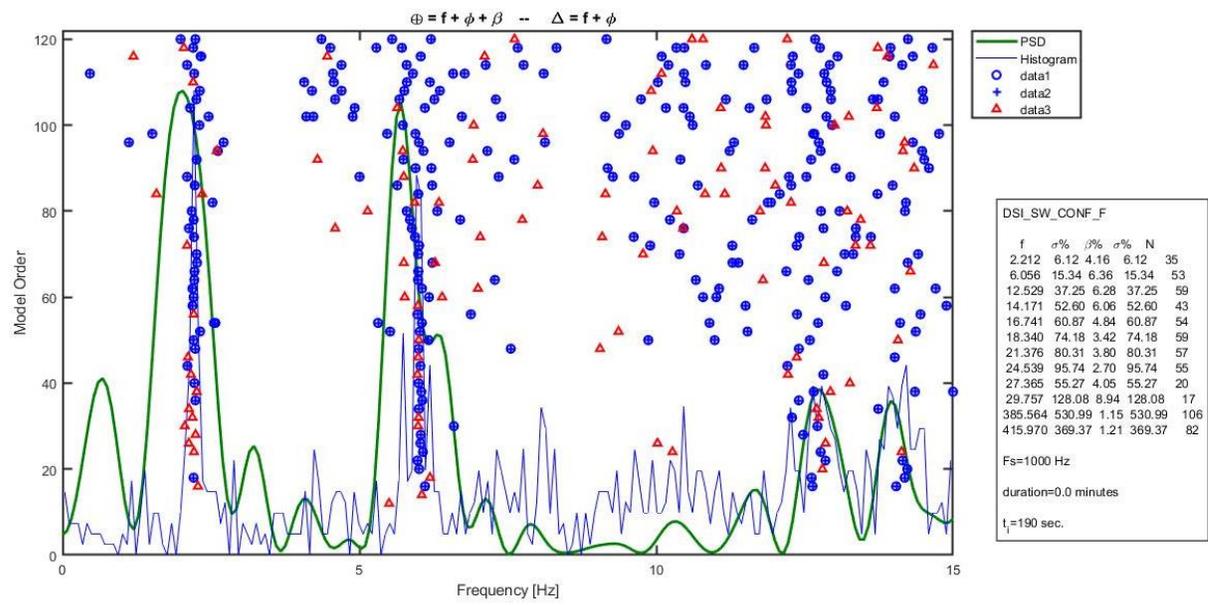


Figura 8.143. Diagrama de Estabilidad, t3=190 [s] - Configuración F.

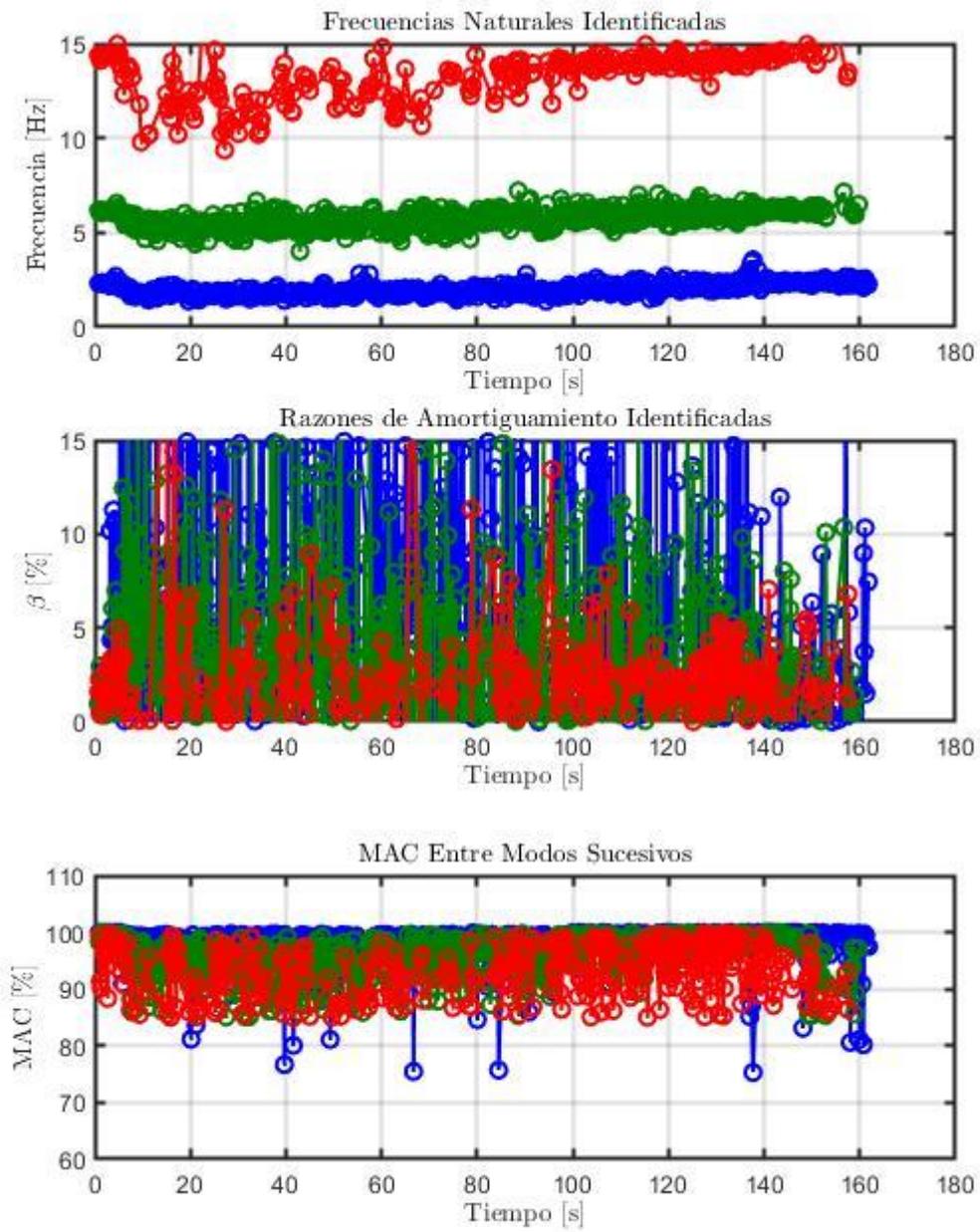


Figura 8.144. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración F.

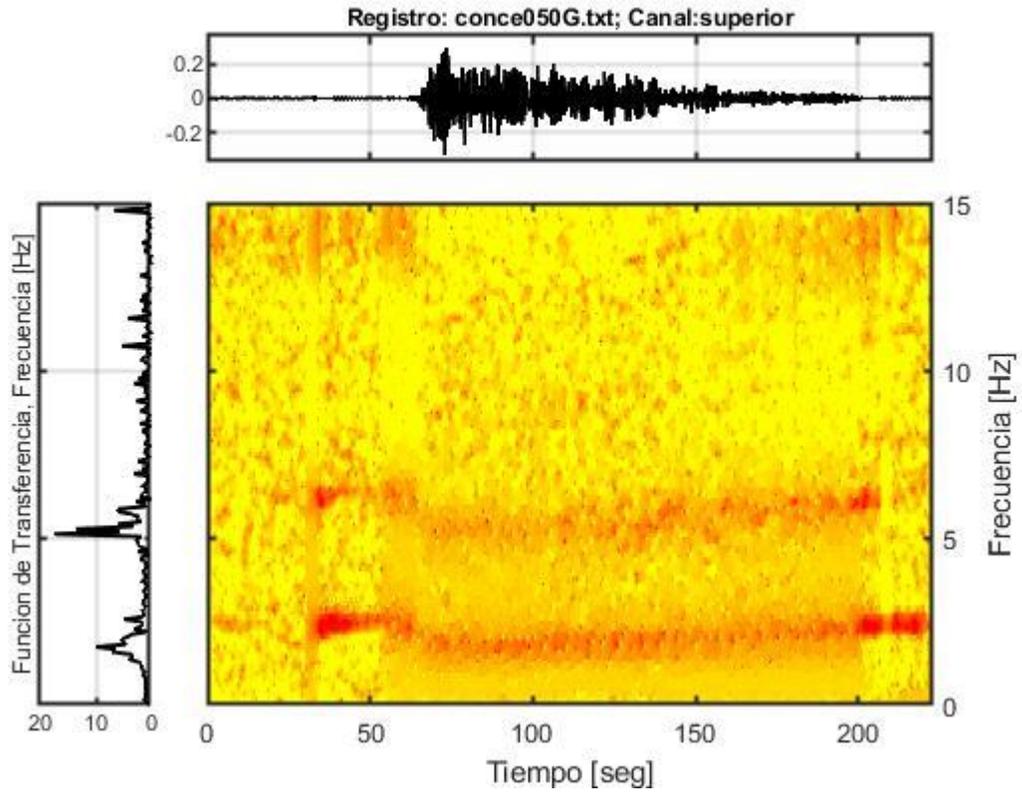


Figura 8.145. Función de Transferenciograma - Configuración F.

8.4.9. Configuración F2 ¹³⁰

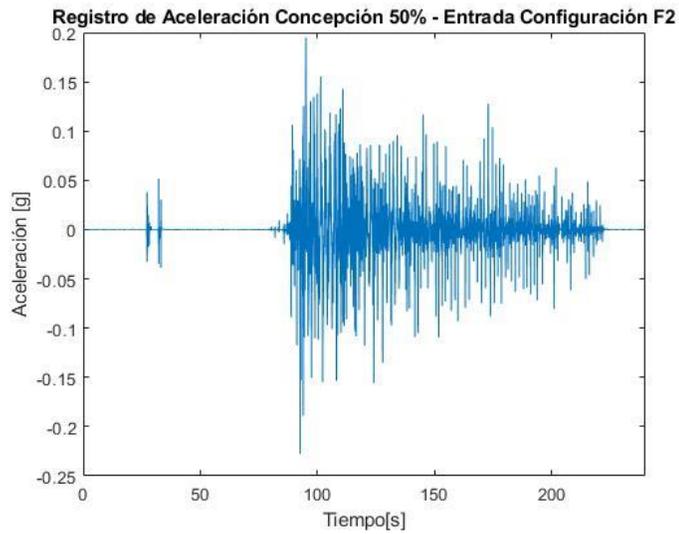


Figura 8.146. Registro de Entrada de Aceleraciones - Configuración F2.

¹³⁰ Configuración F2: Estructura con disipadores Tipo II instalados en tres niveles.

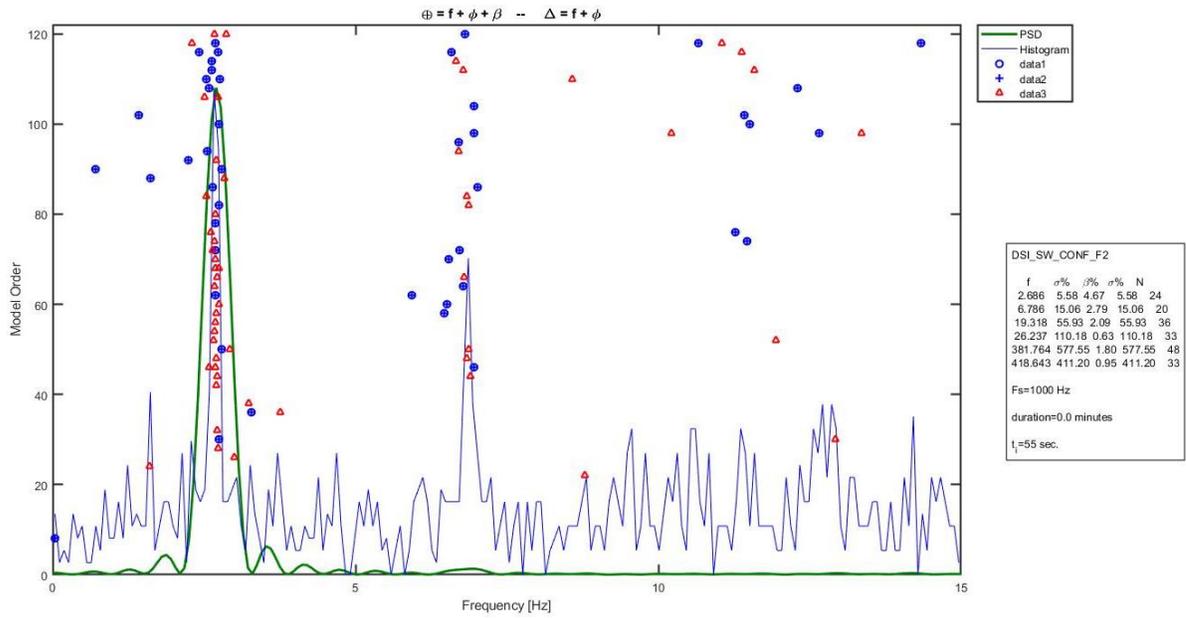


Figura 8.147. Diagrama de Estabilidad, t₁=55 [s] - Configuración F2.

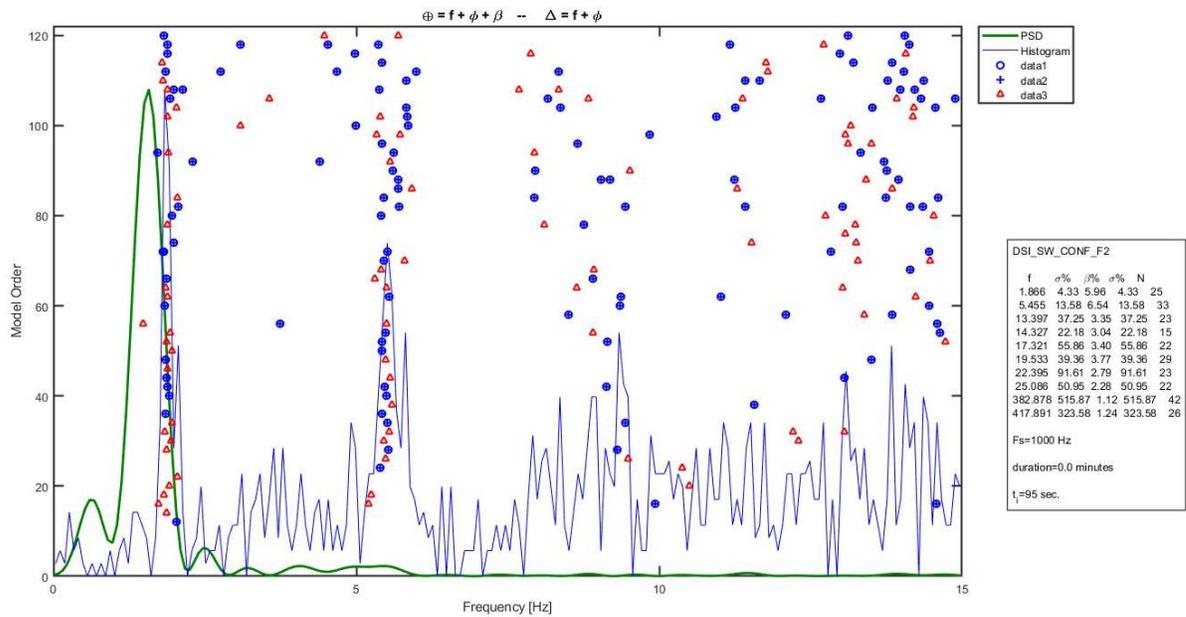


Figura 8.148. Diagrama de Estabilidad, t₂=95 [s] - Configuración F2.

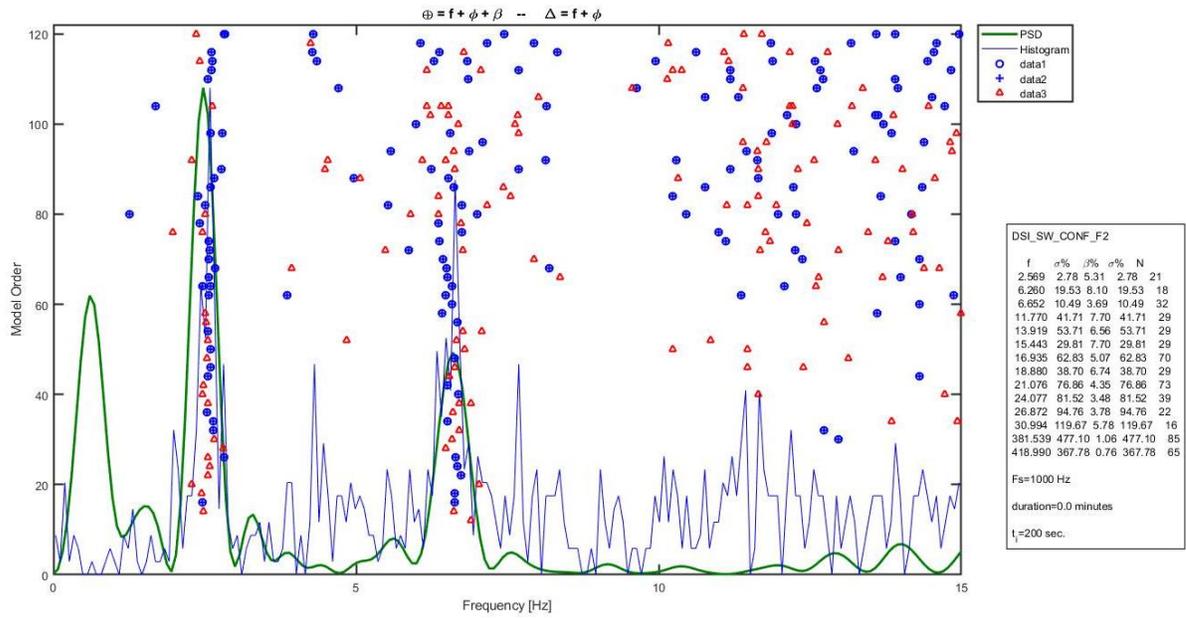


Figura 8.149. Diagrama de Estabilidad, $t_3=200$ [s] - Configuración F2.

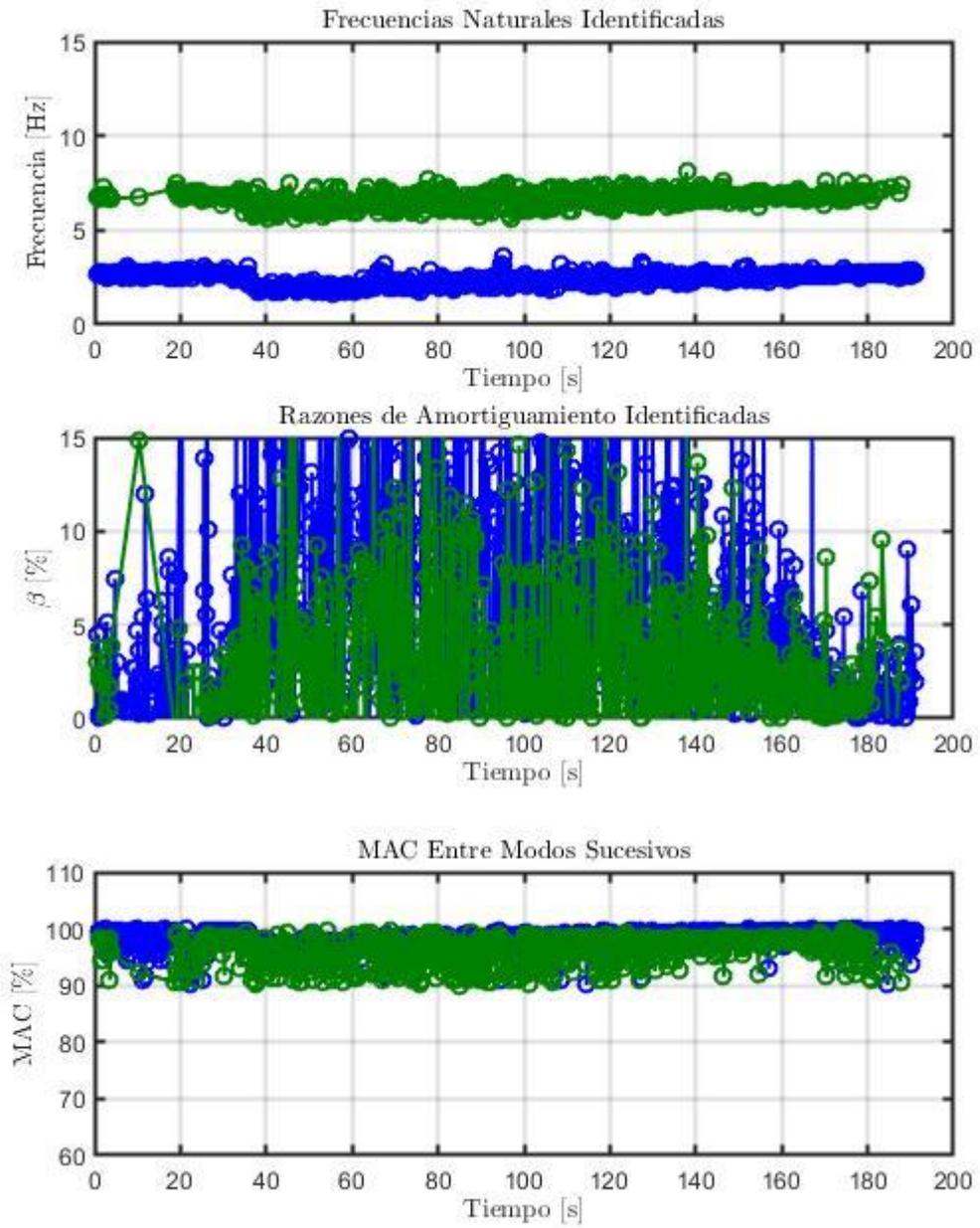


Figura 8.150. Evolución de las propiedades dinámicas estimadas - Configuración F2.

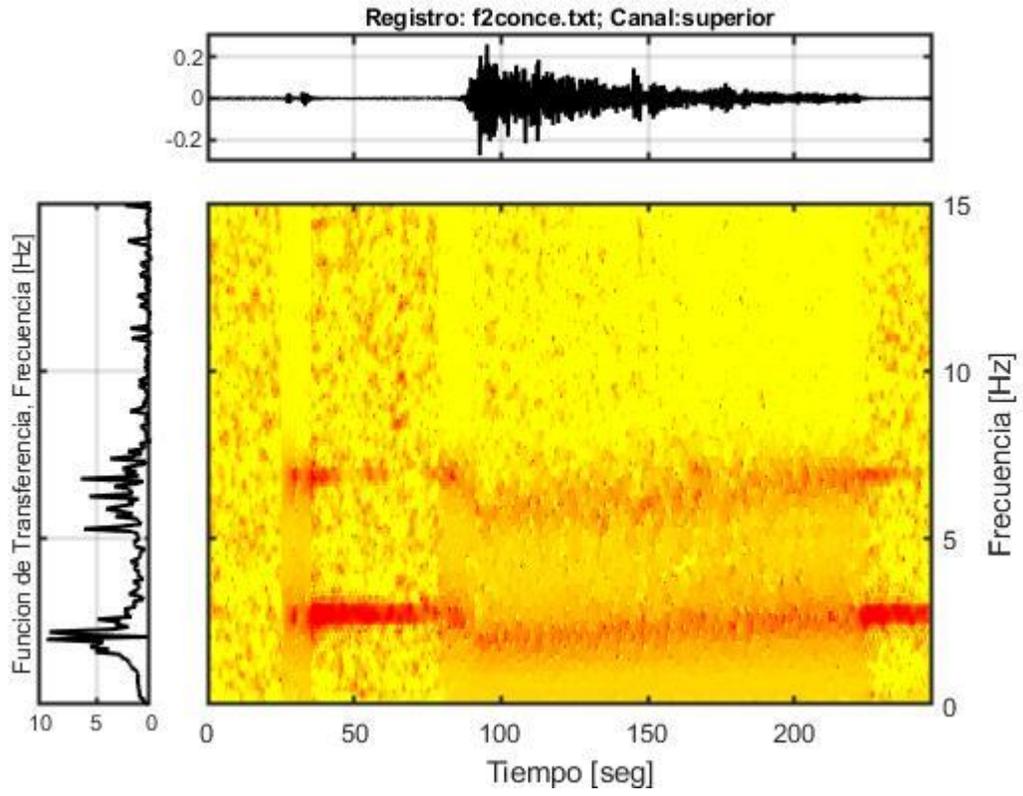


Figura 8.151. Función de Transferenciograma - Configuración F2.