



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

ESTUDIO DE MICROVIBRACIONES AMBIENTALES DEL PUENTE ÁGUILA
NORTE Y PLATAFORMA DE INFORMES SÍSMICOS DEL VIADUCTO EL SALTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NICOLÁS IGNACIO CONTRERAS CARRASCO

PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO JAVIER HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO ASTROZA EULIFÍ
JOSÉ LUIS SEGUEL RAMÍREZ

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniero Civil con mención en Estructuras, Construcción y Geotecnia.

ESTUDIANTE: Nicolás Ignacio Contreras Carrasco

FECHA: Septiembre 2019

PROFESOR GUÍA: Francisco Javier Hernández Prado

ESTUDIO DE MICROVIBRACIONES AMBIENTALES DEL PUENTE ÁGUILA NORTE Y PLATAFORMA DE INFORMES SÍSMICOS DEL VIADUCTO EL SALTO

El presente trabajo de título busca realizar la identificación de las propiedades dinámicas del puente Águila Norte, ubicado en Paine, mediante el análisis de registros de micro vibraciones ambientales por métodos de identificación de propiedades dinámicas estructurales. Cabe mencionar que la identificación de propiedades se enmarca en el proyecto FONDEF ID18I10103 “Bases y recomendaciones para complementar el análisis sísmico de puentes viales del Manual de Carreteras”.

Para realizar este objetivo, se analizarán los resultados de tres campañas de micro vibraciones ambientales realizadas en la estructura del puente, utilizando técnicas de análisis en frecuencia y el método SSI (Subspace System Identification), mediante las cuales se identifican frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento, de tal manera que estas propiedades sirvan a posteriori para generar modelos de elementos finitos detallados, que representen el comportamiento de las características elásticas del puente de forma más realista.

En cuanto a la plataforma computacional de generación automatizada de informes de la respuesta sísmica del viaducto El Salto, se adaptarán rutinas en MATLAB, que crean informes automáticos en LATEX, a partir de los datos recopilados de uno o varios eventos sísmicos, realizadas por Costa (2019) para el edificio Antígona en Viña del Mar, para el caso del viaducto. Adicionalmente, se incluyen nuevos resultados al informe automatizado que permiten estimar la variación de las frecuencias fundamentales del viaducto durante un evento sísmico, dado que la respuesta del tablero se ve altamente influenciada por el comportamiento histerético del sistema de aislación sísmico que se dispone bajo el tablero.

A Ema y Esteban.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a toda la gente que de una u otra forma me ayudó a lograr llegar hasta este punto de mi vida, en especial agradecer a mis padres y familia por aguantar todos mis caprichos y mal genio a lo largo de las largas jornadas de estudio.

Un gran abrazo a mis amigos de la pecera, cuyo apoyo moral y emocional en este último tramo de la carrera, fue vital para mantener la motivación y foco en el objetivo.

Reconocer a la comisión de título por su siempre buena disposición y apoyo, en especial al profesor Hernández por su guía e incansable espíritu docente a lo largo del trabajo.

Un especial agradecimiento al equipo de tenis de la Universidad de Chile, por aportar los momentos de distensión en momentos de estrés estudiantil y por enseñarme que la pasión y perseverancia no solo se aplican en la cancha.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	18
1.1	Motivación.....	18
1.2	Objetivos.....	20
1.2.1	Objetivos generales	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.3	Metodología.....	21
1.4	Resultados esperados.....	23
2	Antecedentes generales.....	24
2.1	Antecedentes Puente Águila Norte.....	24
2.2	Antecedentes Viaducto El Salto	29
2.2.1	Identificación de la estructura.....	29
2.2.2	Identificación del sistema de aislación sísmica	35
2.2.3	Red de acelerómetros instalados en Viaducto el Salto	36
2.2.4	Identificación de Propiedades dinámicas.....	41
2.3	Plataforma Edificio Antígona.....	44
2.4	Métodos de identificación de propiedades dinámicas.....	49
2.4.1	Espectros de respuesta elásticos.....	49
2.4.2	Métodos de análisis de frecuencias	50
2.4.3	Métodos de identificación de propiedades dinámicas DSI y SSI.....	56
2.4.4	Método de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo.	63
3	Campañas de medición del puente Águila Norte.....	66
3.1	Equipos utilizados.....	67
3.2	Primera campaña de mediciones.....	70

3.3	Segunda campaña de mediciones	74
3.4	Tercera campaña de mediciones	78
4	Resultados campañas de mediciones puente Águila Norte.....	82
4.1	Calibración de las mediciones.....	82
4.2	Resultados primera campaña de mediciones.....	86
4.2.1	Resultados comportamiento longitudinal.....	86
4.2.2	Resultados comportamiento transversal.....	89
4.2.3	Resultados comportamiento vertical.....	92
4.2.4	Propiedades identificadas primera campaña de mediciones.....	95
4.3	Resultados segunda campaña de mediciones.....	97
4.3.2	Propiedades identificadas segunda campaña de mediciones	104
4.4	Resultados tercera campaña de mediciones	107
4.4.1	Medición Águila 15.....	107
4.4.2	Propiedades identificadas tercera campaña de mediciones.....	115
5	Descripción de la plataforma	118
5.1	Composición de la plataforma.....	119
5.1.1	Carpeta de resultados	120
5.1.2	Funciones Matlab.....	121
5.1.3	Informe_2018_X.....	122
5.1.4	Informe base	123
5.1.5	Registros marga-marga	124
5.2	Uso de la interfaz de la plataforma.....	126
5.2.1	Zona de configuración de informes.....	126
5.2.2	Zona de configuración de métodos	131
5.2.3	Zona de directorios y Zona de etiquetas de gráficos.....	134
5.2.4	Comienzo de cálculos y zona de resultados previos.....	134
5.2.5	Zona de resultados	135
5.2.6	Zona de guardado de resultados y zona código LATEX	135
5.3	Funcionamiento general de la plataforma.....	135
5.3.1	Biblioteca de registros sísmicos del RENADIC	136
5.3.2	Informe base en LATEX.....	136

5.3.3	Programas utilizados.....	138
5.3.4	Información de los sismos.....	139
5.3.5	Informe final	140
5.3.6	Calibración de datos	143
6	Análisis de resultados de la plataforma.....	145
6.1	Análisis de la aislación sísmica	146
6.2	Análisis en el espacio de las frecuencias.....	151
6.3	Análisis método de identificación DSI	154
6.4	Análisis de propiedades variables en el tiempo.....	159
7	Conclusiones.....	165
7.1	Conclusiones generales.....	165
7.2	Conclusiones Puente Águila Norte	166
7.3	Conclusiones Viaducto El Salto.....	168
7.4	Comentarios y aprendizajes	169
	Bibliografía	173
8	Anexos.....	176
Anexo A.....		176
	Respuesta longitudinal de la primera campaña de mediciones.....	176
	Respuesta transversal de la primera campaña de mediciones.....	179
	Respuesta vertical de la primera campaña de mediciones	185
	Resultados segunda campaña de mediciones	193
	Resultados tercera campaña de mediciones.....	215
Anexo B.....		222
	Contenido carpeta de resultados	222
	Contenido informe base.....	224
	Variables de selección de métodos.....	225
	Variables de configuración de métodos	229
	Calibración método de identificación DSI.....	236
	Calibración método de identificación DSI por pequeñas ventanas	238
Anexo C.....		240
	PSD del viaducto El Salto	240

Formas modales viaducto El Salto.....	245
Anexo D.....	250
Anexo E.....	289

Índices de Ilustraciones

Figura 2-1: Ubicación puente Águila Norte.....	25
Figura 2-2: Elastómeros y barras antisísmicas del puente Águila Norte (vista estribo)	26
Figura 2-3: Viga de coronamiento, vigas independientes y topes sísmicos puente Águila Norte	27
Figura 2-4: Tipología de Puentes chilenos. (a) Diseño original previo a las concesionarias. Diseños posteriores a 2010 (b) Estructura sin diafragma rígido y (c) estructura sin diafragma rígido ni topes sísmicos (Kawashima, Unjoh, Hoshikuma, Kosa, & K, 2011)	28
Figura 2-5: Ubicación Viaducto El Salto (Google Maps, 2019).....	29
Figura 2-6: Corte longitudinal del viaducto El Salto, distancias en [cm] (Daza, 2003)	30
Figura 2-7: Corte transversal del viaducto El Salto, dimensiones en [mm] (Daza, 2003)	31
Figura 2-8: Corte transversal y vista en planta de los pilotes del viaducto El Salto, dimensiones en [m] (Daza, 2003)	32
Figura 2-9: Detalle de la sección de las vigas del viaducto El Salto, dimensiones en [mm] (Daza, 2003)....	33
Figura 2-10: Distribución secciones de viga del viaducto El Salto, dimensiones en [m] (Daza, 2003)	34
Figura 2-11: Estratigrafía del suelo bajo el viaducto El Salto (Berrios, 2003).....	34
Figura 2-12: Esquema aislador sísmico típico del viaducto El Salto (Daza, 2003).....	35
Figura 2-13: Numeración actual de los sensores del viaducto El Salto (RENADIC, 2019).....	39
Figura 2-14: Numeración antigua de los sensores del viaducto El Salto (RENADIC, 2017).....	40
Figura 2-15: Formas modales identificadas del viaducto El Salto (Balsebre, 2019).....	42
Figura 2-16: Ubicación del edificio Antígona (Google Maps, 2019)	44
Figura 2-17: Localización de los sensores del edificio Antígona.....	45
Figura 2-18: Diagrama plataforma edificio Antígona (Costa, 2019).....	46
Figura 2-19: Modelo de elementos finitos del edificio Antígona (Costa, 2019)	48
Figura 2-20: Reemplazo de palabras claves de la plataforma del edificio Antígona (Costa, 2019)	48
Figura 2-21: Metodología de cálculo de un espectro de respuesta (Crisafulli, 2002).....	50
Figura 2-22: Ejemplo de Función Transferencia, Coherencia y fase, para los canales 3 y 18 del viaducto El Salto.....	52
Figura 2-23: Ejemplo de espectro de densidad de potencia y función coherencia del puente Águila Norte. 53	
Figura 2-24. Ejemplo de Espectrograma de tonalidades en el espacio tiempo-frecuencia (Arrochas, 2019). 54	
Figura 2-25: Ejemplo de función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo, utilizada para analizar la variación de las frecuencias fundamentales del tablero, durante el terremoto del Maule del 2010 en el viaducto El Salto.	55
Figura 2-26: Diagrama de flujo del método de identificación SSI (Hernández, 2009).....	60
Figura 2-27: Resumen del método DSI (Astroza, Erahimian, Conte, Restrepo, & Hutchinson, 2015)	61
Figura 2-28: Ejemplo diagrama de estabilidad y tabla resumen asociada.....	63
Figura 2-29: Ejemplo de la identificación de la variación de frecuencia por el método DSI por pequeñas ventanas. Resultado obtenido para el viaducto El Salto en el terremoto del Maule de 2010.	65
Figura 3-1: Equipo DAQBOOK/2005 utilizado en las mediciones.....	68

Figura 3-2: Acelerómetros utilizados durante la campaña de enero de 2019.....	69
Figura 3-3 Camión de inspección utilizado para la instalación de sensores en las cepas.....	69
Figura 3-4: Medición de calibración Águila 0.....	70
Figura 3-5: Disposición en dirección vertical y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 1.....	71
Figura 3-6: Disposición en dirección transversal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 1.....	71
Figura 3-7: Disposición en dirección vertical y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 2.....	72
Figura 3-8: Disposición en dirección longitudinal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 2.....	72
Figura 3-9: Disposición en dirección transversal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 2.....	72
Figura 3-10: Disposición en dirección vertical y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 3.....	73
Figura 3-11: Disposición en dirección longitudinal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 3.....	73
Figura 3-12: Disposición en dirección transversal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 3.....	73
Figura 3-13: Disposición en dirección vertical y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 4.....	74
Figura 3-14: Medición de calibración Águila 5.....	75
Figura 3-15: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 6.....	75
Figura 3-16: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 7.....	76
Figura 3-17: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 8.....	76
Figura 3-18: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 10.....	77
Figura 3-19: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 11.....	77
Figura 3-20: Medición de calibración Águila 12.....	78
Figura 3-21: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 13.....	79
Figura 3-22: Ubicación de los sensores sobre la viga de coronamiento, en la medición Águila 13.....	79
Figura 3-23: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 14.....	80
Figura 3-24: Ubicación de los sensores sobre las vigas de coronamiento, en la medición Águila 14.....	80
Figura 3-25: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 15.....	81
Figura 3-26: Ubicación de los sensores sobre las vigas de coronamiento, en la medición Águila 15.....	81
Figura 4-1: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 0, en la dirección longitudinal.....	83
Figura 4-2: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 12, en la dirección longitudinal.....	84
Figura 4-3: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 0, en la dirección vertical.....	84
Figura 4-4: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 5.....	85
Figura 4-5: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 12, en la dirección vertical.....	85
Figura 4-6: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 2, dirección longitudinal.....	87
Figura 4-7: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 2, dirección longitudinal.....	88

Figura 4-8: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 2, dirección longitudinal.....	88
Figura 4-9: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 1, dirección transversal	90
Figura 4-10: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 1, dirección transversal.....	90
Figura 4-11: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 1, dirección transversal.....	91
Figura 4-12: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 1, dirección transversal.....	91
Figura 4-13: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 1, dirección vertical.....	93
Figura 4-14: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 1, dirección vertical	93
Figura 4-15: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 1, dirección vertical.....	94
Figura 4-16: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 1, dirección vertical.....	94
Figura 4-17: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 6	100
Figura 4-18: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila 6.	100
Figura 4-19: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 6.....	101
Figura 4-20: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 6.....	101
Figura 4-21: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 1, correspondiente a la medición Águila 6.....	102
Figura 4-22: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 1, correspondiente a la medición Águila 6	102
Figura 4-23: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 1, correspondientes a la medición Águila 6.....	103
Figura 4-24: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 1, correspondientes a la medición Águila 6.....	103
Figura 4-25: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 6.....	104
Figura 4-26: Forma modal normalizada para la frecuencia global 4.34 [Hz].....	105
Figura 4-27: Forma modal normalizada para la frecuencia global 4.99 [Hz].....	106
Figura 4-28: Espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición Águila 15, excluyendo el comportamiento no-lineal de la estructura.	108
Figura 4-29: Espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición Águila 15, incluyendo el comportamiento no-lineal de la estructura.....	109
Figura 4-30: Espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición Águila 15, incluyendo el comportamiento no-lineal de la estructura.....	109
Figura 4-31: Espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición Águila 15, excluyendo el comportamiento no-lineal de la estructura.	110
Figura 4-32: Espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales longitudinales opuestos ubicados en las cepas.....	110
Figura 4-33: Diagrama de estabilidad del comportamiento longitudinal de la medición Águila 15.....	111
Figura 4-34: Diagrama de estabilidad del comportamiento transversal de la medición Águila 15.....	111

Figura 4-35: Formas modales asociadas al comportamiento transversal del diagrama de estabilidad	112
Figura 4-36: Formas modales asociadas al espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición Águila 15.....	113
Figura 4-37: Formas modales asociadas al espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición Águila 15.....	113
Figura 4-38: Formas modales asociadas al comportamiento longitudinal del diagrama de estabilidad	114
Figura 4-39: Formas modales asociadas al espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición Águila 15	115
Figura 4-40: Espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales longitudinales opuestos ubicados en las cepas.....	117
Figura 5-1: Carpetas bases de la plataforma de generación de informes sísmicos.....	120
Figura 5-2: Carpeta de resultados	121
Figura 5-3: Carpeta Funciones Matlab.....	122
Figura 5-4: Carpeta Informe_2018_X	123
Figura 5-5: Carpeta informe base.....	124
Figura 5-6: Carpeta de registros marga-marga.....	125
Figura 5-7: Biblioteca de sismos del RENADIC.....	125
Figura 5-8: Zona de configuración de informe	126
Figura 5-9: Métodos a seleccionar en la zona de configuración	127
Figura 5-10: Diagrama de flujo sobre selección de cálculo de métodos de informe.....	128
Figura 5-11: Diagrama de flujo del funcionamiento de la plataforma.....	129
Figura 5-12: Diagrama de flujo del funcionamiento de la plataforma.....	130
Figura 5-13: Configuración de parámetros generales.....	131
Figura 5-14: Configuración de los parámetros de los espectros de densidad de potencia.....	131
Figura 5-15: Configuración de los parámetros de los espectros de densidad de potencia por pequeñas ventanas.....	132
Figura 5-16: Configuración de los parámetros de la función transferencia por pequeñas ventanas de tiempo	132
Figura 5-17: Configuración de los parámetros del método de identificación DSI.....	133
Figura 5-18: Configuración de los parámetros del método de identificación DSI por pequeñas ventanas..	133
Figura 5-19: Cambio de palabras claves.....	138
Figura 5-20: Información sobre registros	139
Figura 5-21: Diagrama de flujo de preparación de la plataforma.....	140
Figura 5-22: Creación de carpeta de resultados.....	141
Figura 5-23: Archivo que contiene el código del informe final	141
Figura 5-24: Compilación del código LATEX	142
Figura 5-25: Archivo final en formato PDF	142
Figura 5-26: Diagrama de flujo de creación del informe final.....	143
Figura 6-1: PSD Canales longitudinales (a) (Sarrazín, Moroni, Neira, & Venegas, 2012). (b)Plataforma El Salto.....	151
Figura 6-2: PSD Canales transversales (a) (Sarrazín, Moroni, Neira, & Venegas, 2012).(b)Plataforma El Salto.....	151
Figura 6-3: (a) y (b) PSD longitudinal y transversal del sismo del 16/07/2018. (c) y (d) PSD longitudinal y transversal del terremoto del Maule.....	152
Figura 6-4: Movimiento del estribo norte en la forma modal de la frecuencia 2.051 [Hz]. (A) y (B)Forma modal calculada para dos I_a diferentes. (C) (Balsebre, 2019).....	157

Figura 6-5: Movimiento del estribo norte en la forma modal de la frecuencia 2.151 [Hz]. (A) y (B) Forma modal calculada para dos I_a diferentes. (C) (Balsebre, 2019).....	157
Figura 6-6: Variación de las frecuencias características en función de la intensidad de Arias de los eventos sísmicos.....	158
Figura 6-7: Función de transferencia por pequeñas ventanas, terremoto del Maule, dirección longitudinal.	160
Figura 6-8: Función de transferencia por pequeñas ventanas, terremoto del Maule, dirección transversal.....	161
Figura 6-9: Espectrograma terremoto del Maule, dirección longitudinal.....	161
Figura 6-10: Espectrograma terremoto del Maule, dirección transversal.....	162
Figura 6-11: Espectrogramas sismo del 12/05/2018.....	162
Figura 6-12: Función de transferencia por pequeñas ventanas, sismo del 12/05/2018.....	163
Figura 6-13: DSI por pequeñas ventanas, terremoto del Maule, dirección longitudinal.....	163
Figura 6-14: DSI por pequeñas ventanas, terremoto del Maule, dirección transversal.....	164
Figura 8-1: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 3, dirección longitudinal.....	177
Figura 8-2: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 3, dirección longitudinal.....	177
Figura 8-3: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 3, dirección longitudinal.....	178
Figura 8-4: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 2, dirección transversal.....	180
Figura 8-5: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 2, dirección transversal.....	180
Figura 8-6: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondientes a la medición Águila 2, dirección transversal.....	181
Figura 8-7: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondientes a la medición Águila 2, dirección transversal.....	181
Figura 8-8: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 3, dirección transversal.....	183
Figura 8-9: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 3, dirección transversal.....	183
Figura 8-10: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 3, dirección transversal.....	184
Figura 8-11: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 2, dirección vertical.....	186
Figura 8-12: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 2, dirección vertical.....	186
Figura 8-13: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 2, dirección vertical.....	187
Figura 8-14: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 3, dirección vertical.....	188
Figura 8-15: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 3, dirección vertical.....	189
Figura 8-16: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 3, dirección vertical.....	189
Figura 8-17: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 4, dirección vertical.....	191
Figura 8-18: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 4, dirección vertical.....	191
Figura 8-19: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 4, dirección vertical.....	192
Figura 8-20: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 4, dirección vertical.....	192

Figura 8-21: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 7	194
Figura 8-22: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila 7	194
Figura 8-23: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 7	195
Figura 8-24: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 7	195
Figura 8-25: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 2, correspondiente a la medición Águila 7	196
Figura 8-26: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 2, correspondiente a la medición Águila 7	196
Figura 8-27: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 2, correspondientes a la medición Águila 7	197
Figura 8-28: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 2, correspondientes a la medición Águila 7	197
Figura 8-29: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 7	198
Figura 8-30: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 8	199
Figura 8-31: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila 8	200
Figura 8-32: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 8	200
Figura 8-33: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 8	201
Figura 8-34: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 3, correspondiente a la medición Águila 8	201
Figura 8-35: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 3, correspondiente a la medición Águila 8	202
Figura 8-36: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 3, correspondientes a la medición Águila 8	202
Figura 8-37: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 3, correspondientes a la medición Águila 8	203
Figura 8-38: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila 10	205
Figura 8-39: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 10	205
Figura 8-40: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 10	206
Figura 8-41: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 10	206
Figura 8-42: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 4, correspondiente a la medición Águila 10	207
Figura 8-43: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 4, correspondiente a la medición Águila 10	207
Figura 8-44: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 10	208
Figura 8-45: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 4, correspondientes a la medición Águila 10	208

Figura 8-46: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 4, correspondientes a la medición Águila 10.....	209
Figura 8-47: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 4, correspondientes a la medición Águila 10.....	209
Figura 8-48: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 11	211
Figura 8-49: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila 11....	211
Figura 8-50: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 11.....	212
Figura 8-51: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 11.....	212
Figura 8-52: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 11	213
Figura 8-53: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 5, correspondiente a la medición Águila 11	213
Figura 8-54: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 5, correspondiente a la medición Águila 11	214
Figura 8-55: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 5, correspondientes a la medición Águila 11.....	214
Figura 8-56: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 5, correspondientes a la medición Águila 11.....	215
Figura 8-57: Espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición águila 13	216
Figura 8-58: Formas modales del comportamiento longitudinal de la cepa 1	217
Figura 8-59: Espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales ubicados en la cepa 1... 217	217
Figura 8-60: Espectro de densidad de potencia del comportamiento Transversal de la medición águila 13	218
Figura 8-61: Espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición águila 14	219
Figura 8-62: Espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición águila 14219	219
Figura 8-63: Formas modales del comportamiento longitudinal de la cepa 1 y 2	220
Figura 8-64: Espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales ubicados en la cepa 2... 220	220
Figura 8-65: Formas modales del comportamiento transversal de la cepa 1 y 2.....	221
Figura 8-66: Formas modales del comportamiento transversal de la cepa 1 y 2.....	221
Figura 8-67: Ubicación rutina de calibración del método DSI	236
Figura 8-68: Variables para calibrar los resultados del método DSI	237
Figura 8-69: Ubicación rutina de calibración del método DSI por pequeñas ventanas	238
Figura 8-70: Variables para calibrar los resultados del método DSI por pequeñas ventanas de tiempo.... 239	239
Figura 8-71: Espectro de densidad de potencia longitudinal, terremoto del Maule (Sarrazín, Moroni, Neira, & Venegas, 2012).....	240
Figura 8-72: Espectro de densidad de potencia Longitudinal, terremoto del Maule.....	240
Figura 8-73: Espectro de densidad de potencia transversal, terremoto del Maule (Sarrazín, Moroni, Neira, & Venegas, 2012).....	241
Figura 8-74: Espectro de densidad de potencia transversal, terremoto del Maule	241
Figura 8-75: Espectro de densidad de potencia longitudinal, sismo del 16/07/2018.....	242
Figura 8-76: Espectro de densidad de potencia transversal, sismo del 16/07/2018.....	242
Figura 8-77: Formas modales frecuencia 1.035 [Hz]	245

Figura 8-78: Formas modales frecuencia 1.195 [Hz]	246
Figura 8-79: Formas modales frecuencia 1.625 [Hz]	247
Figura 8-80: Formas modales frecuencia 2.051 [Hz]	248
Figura 8-81: Formas modales frecuencia 2.151 [Hz]	249

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Características de las vigas del puente Águila Norte.....	26
Tabla 2-2: Características de las cepas del puente Águila Norte.....	26
Tabla 2-3: Dimensiones de las cepas del viaducto El Salto (Daza, 2003).....	31
Tabla 2-4: Dimensiones de los pilotes del viaducto El Salto (Daza, 2003).....	32
Tabla 2-5: Dimensiones de las secciones de viga del viaducto El Salto (Daza, 2003).....	33
Tabla 2-6: Localización de los equipos de la estación QDR 754 (RENADIC, 2017).....	36
Tabla 2-7: Localización de los equipos de la estación DOLOMITE+ (RENADIC, 2017).....	37
Tabla 2-8: Características de los acelerómetros Kinometrics (RENADIC, 2017).....	38
Tabla 2-9: Frecuencias naturales identificadas del viaducto El Salto (Balsebre, 2019).....	41
Tabla 2-10: Propiedades identificadas del viaducto El Salto (Sarrazín, Moroni, & Roesset, 2005).....	43
Tabla 3-1: Sensibilidad de sensores.....	68
Tabla 3-2: Datos medición Águila 0.....	70
Tabla 3-3: Datos medición Águila 1.....	71
Tabla 3-4: Datos medición Águila 2.....	72
Tabla 3-5: Datos medición Águila 3.....	73
Tabla 3-6: Datos medición Águila 4.....	74
Tabla 3-7: Datos medición Águila 5.....	75
Tabla 3-8: Datos medición Águila 6.....	75
Tabla 3-9: Datos medición Águila 7.....	76
Tabla 3-10: Datos medición Águila 8.....	76
Tabla 3-11: Datos medición Águila 10.....	77
Tabla 3-12: Datos medición Águila 11.....	77
Tabla 3-13: Datos medición Águila 12.....	78
Tabla 3-14: Datos medición Águila 13.....	79
Tabla 3-15: Datos medición Águila 14.....	80
Tabla 3-16: Datos medición Águila 15.....	81
Tabla 4-1: Frecuencias verticales identificadas durante las calibraciones (vano central).....	83
Tabla 4-2: Frecuencias longitudinales identificadas durante las calibraciones.....	83
Tabla 4-3: Frecuencias identificadas en la medición Águila 2, dirección longitudinal.....	87
Tabla 4-4: Frecuencias identificadas en la medición Águila 1, dirección transversal.....	89
Tabla 4-5: Frecuencias identificadas en la medición Águila 1, dirección vertical.....	92
Tabla 4-6: Frecuencias transversales identificadas, primera campaña de mediciones.....	95
Tabla 4-7: Frecuencias longitudinales identificadas, primera campaña de mediciones.....	96
Tabla 4-8: Frecuencias verticales identificadas, primera campaña de mediciones.....	97
Tabla 4-9: Frecuencias globales identificadas en cada medición, segunda campaña de mediciones.....	104
Tabla 4-10: Frecuencias identificadas para cada vano, segunda campaña de mediciones.....	105
Tabla 4-11: Frecuencias de cepa identificadas, medición Águila 15.....	108

Tabla 4-12: Frecuencias de cepa longitudinales identificadas, tercera campaña.....	116
Tabla 4-13: Frecuencias de torsión longitudinal identificadas, tercera campaña	116
Tabla 4-14: Frecuencias de cepa transversales identificadas, tercera campaña.....	117
Tabla 6-1: Sismos procesados por la plataforma	145
Tabla 6-2: Comparación resultados amplificación sísmica	147
Tabla 6-3: Comparación resultados amplificación sísmica (continuación)	148
Tabla 6-4: Comportamiento de la amplificación sísmica durante el sismo del 16/07/2018.....	148
Tabla 6-5: Aceleraciones máximas eventos del 16/07/2018 al 14/09/2018 y evento del 27/02/2010	149
Tabla 6-6: Aceleraciones máximas eventos del 05/12/2018 al 03/06/2019	150
Tabla 6-7: Casos de análisis del método DSI.....	154
Tabla 6-8: Descripción de canales utilizados en los casos de la Tabla 6-7	154
Tabla 6-9: Frecuencias identificadas mediante el método DSI.....	156
Tabla 6-10: Descripción de canales utilizados en los espectrogramas y funciones de transferencia por pequeñas ventanas	160
Tabla 7-1: Frecuencias asociadas al movimiento independiente de los vanos	167
Tabla 8-1: Frecuencias identificadas en la medición Águila 3, dirección longitudinal	176
Tabla 8-2: Frecuencias identificadas en la medición Águila 2, dirección transversal.....	179
Tabla 8-3: Frecuencias identificadas en la medición Águila 3, dirección transversal.....	182
Tabla 8-4: Frecuencias identificadas en la medición Águila 2, dirección vertical.....	185
Tabla 8-5: Frecuencias identificadas en la medición Águila 3, dirección vertical.....	188
Tabla 8-6: Frecuencias identificadas en la medición Águila 4, dirección vertical.....	190
Tabla 8-7: Amplificación sísmica eventos del 16/07/2018 al 14/09/2018 y evento del 27/02/2010.....	243
Tabla 8-8: Amplificación sísmica eventos del 05/12/2018 al 03/06/2019	244

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

Chile es un país con una extensa red de puentes viales, catastrándose en diciembre del 2015 un total de 6.593 puentes, totalizando 194.390 metros construidos. (Dirección de vialidad, 2015). La red vial de puentes se caracteriza por dos notorias tipologías estructurales, la tipología tradicional y la tipología posterior a la llegada de las concesiones. La primera se diferencia por contar con diafragmas transversales rígidos y topes sísmicos en la viga de coronación de las columnas, en cambio, en la tipología de puentes construidos por concesiones, se eliminaron los topes sísmicos de hormigón armado y los diafragmas transversales en los extremos de las vigas o tablero, y los sistemas antisísmicos tradicionales son reemplazados por topes de acero o simplemente son omitidos (Buckle, Hube, Yen, & Arias, 2012).

Los múltiples eventos sísmicos que ocurren en Chile y, en especial el terremoto del Maule del 2010, han dejado en evidencia la vulnerabilidad de la tipología de puentes viales construidos según los criterios utilizados por las concesionarias, observándose daños debidos al desplazamiento transversal o giro excesivo de la superestructura, pérdida del apoyo vertical, daños asociados a los efectos dinámicos del esviaje de la superestructura y daños en vigas de hormigón armado debido al choque contra llaves de corte exteriores sobredimensionadas (Wilches, 2017), en especial en puentes que se ubicaban sobre un suelo de baja rigidez.

Debido al daño provocado por el terremoto del Maule, es que se requiere desarrollar herramientas que mejoren la resiliencia de los puentes carreteros chilenos ante sismos extremos, es dentro de este contexto es que el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Chile, se encuentra desarrollando el proyecto FONDEF ID18I10103 “Bases y recomendaciones para complementar el análisis sísmico de puentes viales del Manual de Carreteras”, con el objetivo de proveer una

herramienta complementaria al manual de carreteras que permita la evaluación a través de un análisis sísmico no lineal de la respuesta sísmica de puentes chilenos. Dentro de los objetivos del estudio, se encuentra la identificación de las propiedades dinámicas de un puente que sea representativo de la red vial Nacional.

El presente trabajo de título tiene dos objetivos distintos que son independientes. Uno corresponde a la identificación de las propiedades dinámicas del puente Águila Norte en Paine a partir de registros de micro vibraciones. El segundo corresponde a la generación de una plataforma computacional desarrollada en el programa MATLAB que permite la generación automática de informes a partir de registros de eventos sísmicos adquiridos por la central de monitoreo dispuesta en el puente por RENADIC. Si bien estos dos temas son independientes, se entiende que ambos se relacionan en el sentido de que ambos están asociados a la temática de puentes chilenos y al hecho que ambos se refieren a la evaluación y tratamiento de señales registradas con el afán de determinar propiedades dinámicas de las estructuras (a partir de micro vibraciones o a partir de registros sísmicos).

Como fue mencionado, la primera motivación del presente trabajo de título es determinar las propiedades dinámicas del puente Águila Norte en Paine, mediante técnicas de identificación de estructuras aplicables a registros ambientales registrados mientras el puente fue excitado por tráfico vehicular normal, que permitan identificar los modos de vibración de la estructura y sus frecuencias características, a partir de los registros de micro vibraciones ambientales obtenidos por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Para esto se requiere analizar los resultados de tres campañas de micro vibraciones ambientales llevadas a cabo en el puente durante el año 2019.

Como segunda motivación general del trabajo de título, se desarrolla una plataforma computacional en MATLAB que lee la base de registros sísmicos del viaducto El Salto pertenecientes a la RENADIC, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, con la finalidad de generar informes automáticos de la respuesta sísmica del puente. Para ello se leerá la base de datos de RENADIC y se procesará los resultados en MATLAB generando informes automáticos en LATEX. Estos informes son una herramienta de vital importancia, ya que permiten robustecer en forma significativa los informes que se generan periódicamente en forma manual por RENADIC, el cual es proporcionada en la página web de la RENADIC y es provista periódicamente al Ministerio de Obras Públicas. Adicionalmente, esta herramienta permitirá el procesamiento automático de los datos cuando acontezca un evento sísmico de alta intensidad, permitiendo tener información valiosa a pocos minutos de ocurrido un sismo de importancia.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

Puente Águila Norte:

- ✓ Identificar las propiedades dinámicas del puente Águila Norte a partir de registros de micro vibraciones ambientales.

Viaducto El Salto:

- ✓ Realizar una plataforma que genere informes automáticos de la respuesta sísmica del viaducto El Salto, a partir de su biblioteca de registros sísmicos o a partir de un registro sísmico medido en un nuevo evento.

1.2.2 Objetivos específicos

Puente Águila Norte:

- ✓ Planificar y realizar campañas de mediciones de micro vibraciones del puente Águila Norte que permita identificar las propiedades dinámicas del puente utilizando diversos arreglos de sensores para determinar las características del puente en sentido longitudinal, transversal y de sus cepas.
- ✓ Procesar y analizar los resultados de micro vibraciones ambientales, de tal manera que se puedan estimar las propiedades dinámicas de los diferentes comportamientos estructurales de interés.

Viaducto El Salto:

- ✓ Adaptar una plataforma que genere informes automáticos de la respuesta del viaducto El Salto, a partir de la plataforma del edificio Antígona generada por Costa (2019).
- ✓ Añadir a la plataforma métodos de identificación de propiedades dinámicas variables en el tiempo, de tal manera de observar el comportamiento no-lineal del sistema de aislación sísmica del viaducto El Salto.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos de la plataforma del viaducto El Salto, mediante el uso de 10 registros sísmicos, de tal manera de corroborar, y calibrar los resultados, además de identificar comportamientos típicos del viaducto.

1.3 Metodología

Puente Águila Norte:

1. Medición en terreno de las micro vibraciones producidas por la excitación del tráfico vehicular sobre la estructura del Puente Águila Norte.

Se busca realizar tres fechas de mediciones de micro vibraciones ambientales en el puente Águila Norte, las que se planifican para enero, mayo y julio del 2019. Las campañas de mediciones son diseñadas con arreglos espaciales de acelerómetros (adecuados para la medición de micro vibraciones) de manera de identificar los modos fundamentales de la estructura en sentido longitudinal, transversal, vertical (y “warping”) y la respuesta local de las cepas.

2. Análisis de los registros de micro vibraciones ambientales mediante métodos de análisis de propiedades dinámicas de estructuras.

Se emplean las técnicas de análisis en frecuencia y el método SSI (Subspace System Identification) para identificar las propiedades dinámicas del puente aplicables para registros de vibraciones ambientales. Los resultados de las diversas campañas permiten obtener una visualización de los modos fundamentales del puente, permitiendo inferir comportamientos generales y específicos de la estructura.

Viaducto El Salto:

1. Revisar el código de programación con el cual se están generando informes automáticos a partir de sismos, del edificio Antígona (Costa, 2019) y adaptar este para el uso en el análisis de registros sísmicos del viaducto El Salto.

Esta etapa busca llevar a cabo un análisis y estudio sobre la plataforma de generación automática de informes del edificio Antígona creada por Costa (2019). Luego de este análisis, se adaptará la plataforma mediante la modificación de las rutinas programadas en MATLAB, con el fin de generar informes en LATEX de manera detallada y específica del viaducto El Salto, a partir la biblioteca de registros sísmicos de RENADIC, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Finalmente, se calibrarán los métodos de análisis presentes en la plataforma, con el fin de que muestren comportamientos estructurales del viaducto El Salto acordes a lo observado en la literatura.

2. Analizar el comportamiento no-lineal del viaducto El Salto, mediante la inclusión en la plataforma de métodos de identificación de propiedades dinámicas variables en el tiempo.

La plataforma adaptada para el caso del viaducto El Salto, cuenta con la inclusión de métodos de identificación de propiedades dinámicas, como es el método de análisis de frecuencias y el método de identificación DSI. Estos métodos permiten observar la variación de las propiedades dinámicas durante eventos sísmicos, pero su objetivo es el análisis del comportamiento estructural sin considerar efectos no-lineales. Es debido a esto por lo que se busca implementar a la plataforma, métodos de análisis de propiedades dinámicas variables en el tiempo que permitan identificar la existencia de variaciones en las propiedades estructurales durante el tiempo de duración de los eventos sísmicos de interés, para esto se programaran en la plataforma 3 métodos basados en el concepto del uso de varias ventanas de tiempo pequeñas, los espectrogramas, las funciones de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo y el método DSI por pequeñas ventanas de tiempo . Una vez implementados, se deben calibrar estos métodos, de tal forma que entreguen resultados definitivos sobre si ocurre la variación, y en el caso de ocurrir, que anexe los resultados al informe.

1.4 Resultados esperados

Puente Águila Norte:

El presente trabajo busca realizar una completa identificación de la respuesta estructural del puente Águila Norte, esto mediante el análisis de registros de micro vibraciones ambientales medidas en terreno por el departamento de ingeniería civil de la Universidad de Chile. Se espera que las propiedades dinámicas identificadas sirvan como base para los modelos de elementos finitos que se están realizando del puente, además de analizar el comportamiento de un puente compuesto por vigas independiente entre vanos, lo que sugiere que cada vano se comportara de forma independiente.

Viaducto El Salto:

Finalmente se busca dejar operativa una plataforma que genere informes automáticos para el viaducto El Salto, ante el ingreso de registros sísmicos. Esta plataforma permitirá generar informes robustos de la respuesta del viaducto El Salto de manera que permita tener un procesamiento de los datos más acabados de manera que puedan ser publicados por RENADIC, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile y ser enviados al MOP. En este sentido, se generará un informe automatizado que será enviado al MOP correspondiente a los registros registrados durante el primer semestre del año 2019. Adicionalmente, la herramienta permitirá el procesamiento casi automático de la respuesta del viaducto luego de acontecido un sismo, lo cual será una información valiosa para entender el estado estructural del puente luego de acontecido un sismo de importancia.

Capítulo 2

Antecedentes generales

2.1 Antecedentes Puente Águila Norte

El puente Águila Norte, es un puente construido en el año 2008 que se encuentra sobre el río Angostura, uniendo las calles de la ruta G-550 Águila sur y Hospital, en la provincia del Maipo, región metropolitana ($33^{\circ}52'14.1''S$ $71^{\circ}45'00.1''W$). Su extensión es de 148 [m], divididos en 5 tramos equidistantes de 29.6 [m].

El tablero del puente consta de dos vías de tráfico vehicular, con pasillos a desnivel y barandas anti-impacto, completando estas tres áreas un total de 10.7 [m] de ancho. Las juntas elastómericas del tablero son del tipo TRANSFLEX JOINT 400 USL y el tablero consta de una losa continua de hormigón armado de 20 [cm] de espesor, cubierta de una carpeta de rodado asfáltico de 5 [cm] de espesor. El tablero se une a los estribos y vigas de coronamiento, mediante 6 barras antisísmicas en cada extremo del vano de 22 [cm] de diámetro encapsuladas en un tubo galvanizado de 3 [in]. Las vigas simples se apoyan en placas cuadradas de neopreno de dureza 60^º Shore A de dimensiones de 42 [cm] x 42 [cm] en los estribos (8 [cm] de alto y con 7 placas metálicas de 2 [mm] de 41 [cm] x 41 [cm] y de acero A37 -24 S) y cepas (6 [cm] de altos con 5 placas metálicas de 2 [mm] de espesor de acero A37-24S) de marca Ferrocaucho (Figura 2-2).

La estructura está conformada por 4 vigas individuales por vano (Figura 2-3), de hormigón postensado confeccionadas por la empresa TECSOCON (Tabla 2-1), las cuales se unen en los extremos de cada vano mediante un diafragma transversal de hormigón armado de 25 [cm] de espesor, dejando un espacio libre longitudinal entre viga de 20 [cm] sobre el apoyo en cada cepa (observándose que el tablero es aún continuo sobre este espacio).

La superestructura se apoya sobre 4 cepas (Tabla 2-2) de altura variable de entre 3.3 a 4.9 [m], las cuales se componen de 3 columnas de hormigón armado de un diámetro de 120 [cm], las cuales se unen en su parte superior mediante una viga de coronamiento de hormigón armado de 150 [cm] x 170 [cm] (Figura 2-3), y en su parte inferior mediante una viga encepada cuadrada de [cm] cm x 170 [cm]. Por otra parte, bajo del cabezal de pilotes se disponen de tres pilotes de hormigón armado de 120 [cm] de diámetro de un largo de 16,75 [m].

Los estribos retienen material compactado y son confeccionados de hormigón armado, con un muro frontal de un ancho de 10,70 [m], de un alto de 4,83 [m] de alto y de un espesor de 30 [cm]. El muro se apoya sobre una losa de fundación de 150 [cm] de espesor, que a la vez se sustenta en una doble fila de pilotes de 120 [cm] de diámetro. Por otra parte, los estribos se componen de 2 muros aletas de 310 [cm] de largo y de 35 [cm] de espesor.



Figura 2-1: Ubicación puente Águila Norte

Tabla 2-1: Características de las vigas del puente Águila Norte

Altura [m]	1.4
Separación [m]	2.6
Longitud [m]	29.4
Dimensiones placas de neopreno en los estribos [cm]	42x42x8
Dimensiones placas de neopreno en las cepas [cm]	41x41x6

Tabla 2-2: Características de las cepas del puente Águila Norte

Sección columna de la cepa [m]	1.2
Sección del pilote [m]	1.2
Enterramiento del pilote [m]	16.75
Altura de la viga de coronamiento [m]	1.5
Ancho de la viga de coronamiento [m]	1.7
Altura de los topes sísmicos [m]	0.3
Ancho de los topes sísmicos [m]	0.7
Altura de la viga encepada [m]	1.7



Figura 2-2: Elastómeros y barras antisísmicas del puente Águila Norte (vista estribo)



Figura 2-3: Viga de coronamiento, vigas independientes y topes sísmicos puente Águila Norte

El puente Águila Norte es parte del estudio del proyecto FONDEF ID18I10103 “Bases y recomendaciones para complementar el análisis sísmico de puentes viales del Manual de Carreteras”, el cual tiene por objetivo desarrollar un documento que defina bases y recomendaciones que permitan establecer protocolos de ensayos básicos y directrices de cómo llevar a cabo análisis numéricos de puentes viales sujetos a acciones sísmicas que consideren las condiciones sismogénicas del lugar, la respuesta del suelo, la interacción suelo-estructura, la respuesta estructural y las interacciones entre sus componentes estructurales. De esta manera, se espera que las directrices permitan a los ingenieros civiles tener herramientas de cómo llevar a cabo modelaciones de puentes sujetas a sismos considerando su comportamiento no-lineal e interacción entre elementos con el afán de proveer una herramienta complementaria al manual de carreteras que permita la evaluación a través de un análisis sísmico no lineal de la respuesta sísmica de puentes chilenos, aumentando su resiliencia ante eventos extremos.

En una primera instancia el proyecto se centra en definir la selección de un puente perteneciente a la red vial chilena, el cual sea representativo de la realidad del país de tal manera que su estudio sea aplicable a los demás puentes de la red, para esto la estructura debe cumplir ciertas características, dentro de las que se considera que el puente se adecue a las tipologías de puentes chilenos acordes al periodo de las concesiones, idealmente previo al terremoto del Maule del 2010 (Figura 2-4), la cual se identifica como la tipología más vulnerable.

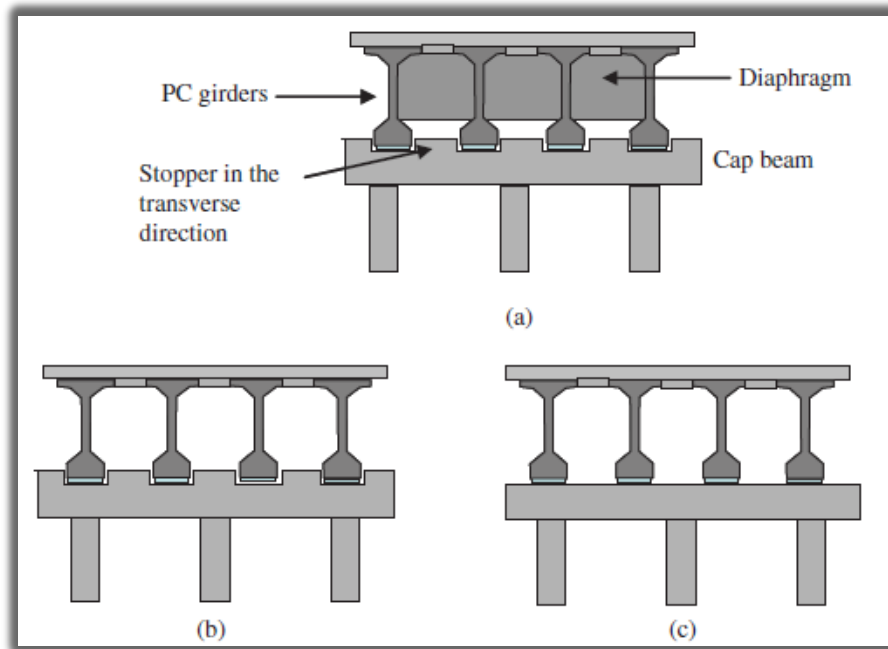


Figura 2-4: Tipología de Puentes chilenos. (a) Diseño original previo a las concesionarias. Diseños posteriores a 2010 (b) Estructura sin diafragma rígido y (c) estructura sin diafragma rígido ni topes sísmicos (Kawashima, Unjoh, Hoshikuma, Kosa, & K, 2011)

Como siguiente hito del proyecto se considera llevar a cabo campañas de medición de micro vibraciones ambientales sobre el caso de estudio, de tal manera que los datos recopilados en terreno permitan utilizar métodos sofisticados de identificación de propiedades dinámicas con el fin de definir propiedades fundamentales de la estructura, como lo son sus frecuencias características y formas modales. Es en este hito y contexto en el cual se enmarca uno de los objetivos principales del presente trabajo de título.

2.2 Antecedentes Viaducto El Salto

El viaducto El Salto se encuentra ubicado en Viña del Mar, sobre la calle Limache, en el Km. 7.3 de la Vía Las Palmas ($33^{\circ}02'51.1''S$ $71^{\circ}30'32.8''W$), y es la primera obra de infraestructura vial construida en Chile, que se encuentra aislada sísmicamente por un sistema de 36 aisladores sísmicos, y que fue fabricado y probado en la Universidad de Chile. Además, el puente se encuentra instrumentado por una red de 24 acelerógrafos, que es gestionada por la red de cobertura nacional de acelerógrafos del departamento de ingeniería de la Universidad de Chile (RENADIC). Sobre estas y otras características de la estructura, se profundiza en la presente sección.

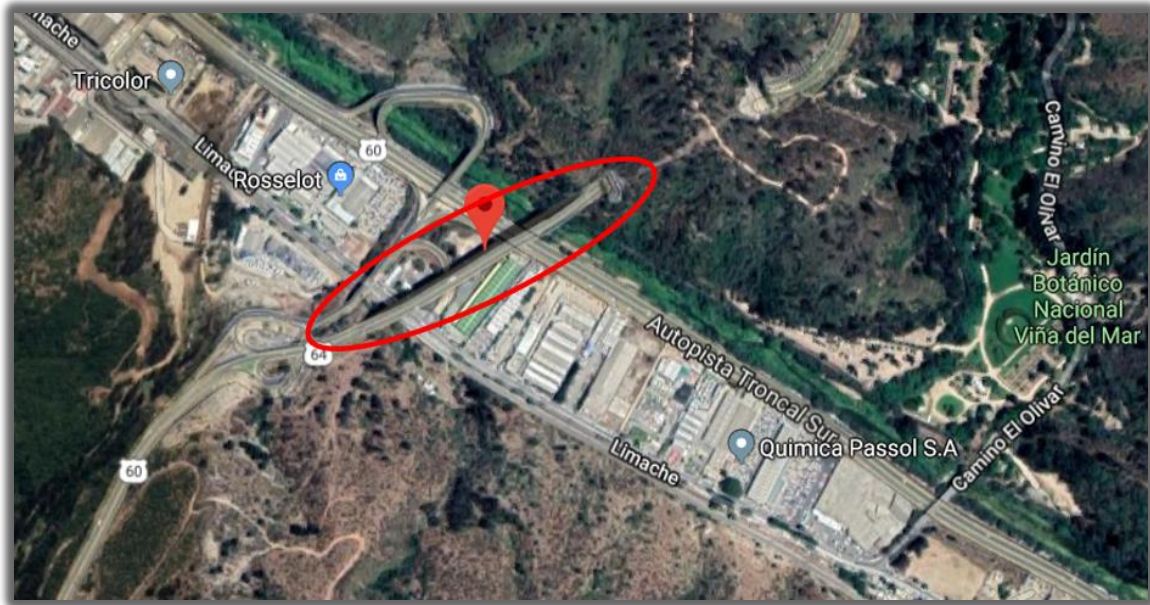


Figura 2-5: Ubicación Viaducto El Salto (Google Maps, 2019)

2.2.1 Identificación de la estructura

Según la descripción realizada por Daza (2003), la estructuración del viaducto El Salto se compone por una calzada de 18 [m] de ancho y 383 [m] de largo, los cuales se dividen en 8 tramos delimitados por las cepas y estribos del puente. El primer

tramo, ubicado entre el estribo sur y la primera cepa, tiene una longitud de 33 [m], mientras que los 7 tramos restantes poseen 50 [m] de extensión.

La infraestructura consiste en 7 cepas con una altura variable de entre 20 a 30 [m], con un ancho de 10 [m]. Las cepas ubicadas en los extremos del puente se encuentran fundadas directamente, mientras que las otras 5 cepas consisten en fundaciones piloteadas, conformadas por dos hileras de 5 pilotes circulares de 1 [m] diámetro cada uno, que se entierran a una profundidad que varía entre 14 y 32 [m] y se apoyan sobre suelos granulares limpios, penetrando un mínimo de 3 [m] en estos suelos.

La superestructura consiste de un tablero de hormigón G25 de espesor 0.27 [m], que descansa sobre cuatro vigas de acero de perfil doble T de dimensión variable a lo largo del puente, separadas de centro a centro por 4,4 [m]. Cada viga es continua y están apoyadas sobre aisladores sísmicos de goma de alto amortiguamiento.

El suelo sobre el cual se erige el viaducto es principalmente una arena limosa mal graduada, seguida de estratos de arena limosa y bolsones de arcilla, los cuales están estratificados de manera alternada con capas de arena más firmes. Por otro lado, el lecho de la roca se estima a unos 120 [m] de profundidad y en el nivel de fundación, el ensayo SPT arroja un rango variable de entre 40 y 100 golpes. (Verdugo, 1996).

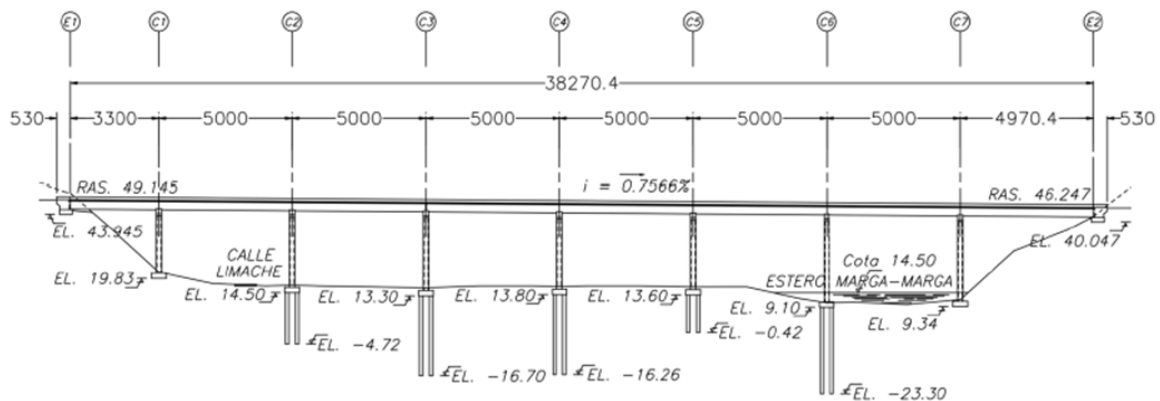


Figura 2-6: Corte longitudinal del viaducto El Salto, distancias en [cm] (Daza, 2003)

Tabla 2-3: Dimensiones de las cepas del viaducto El Salto (Daza, 2003)

Cepa	H [m]	H1 [m]	B [m]
1	21.865	1.5	10.5
2	26.317	2.0	13.5
3	27.138	2.0	13.5
4	26.260	2.0	13.5
5	26.082	2.0	13.5
6	30.154	2.0	13.5
7	30.086	1.5	10.5

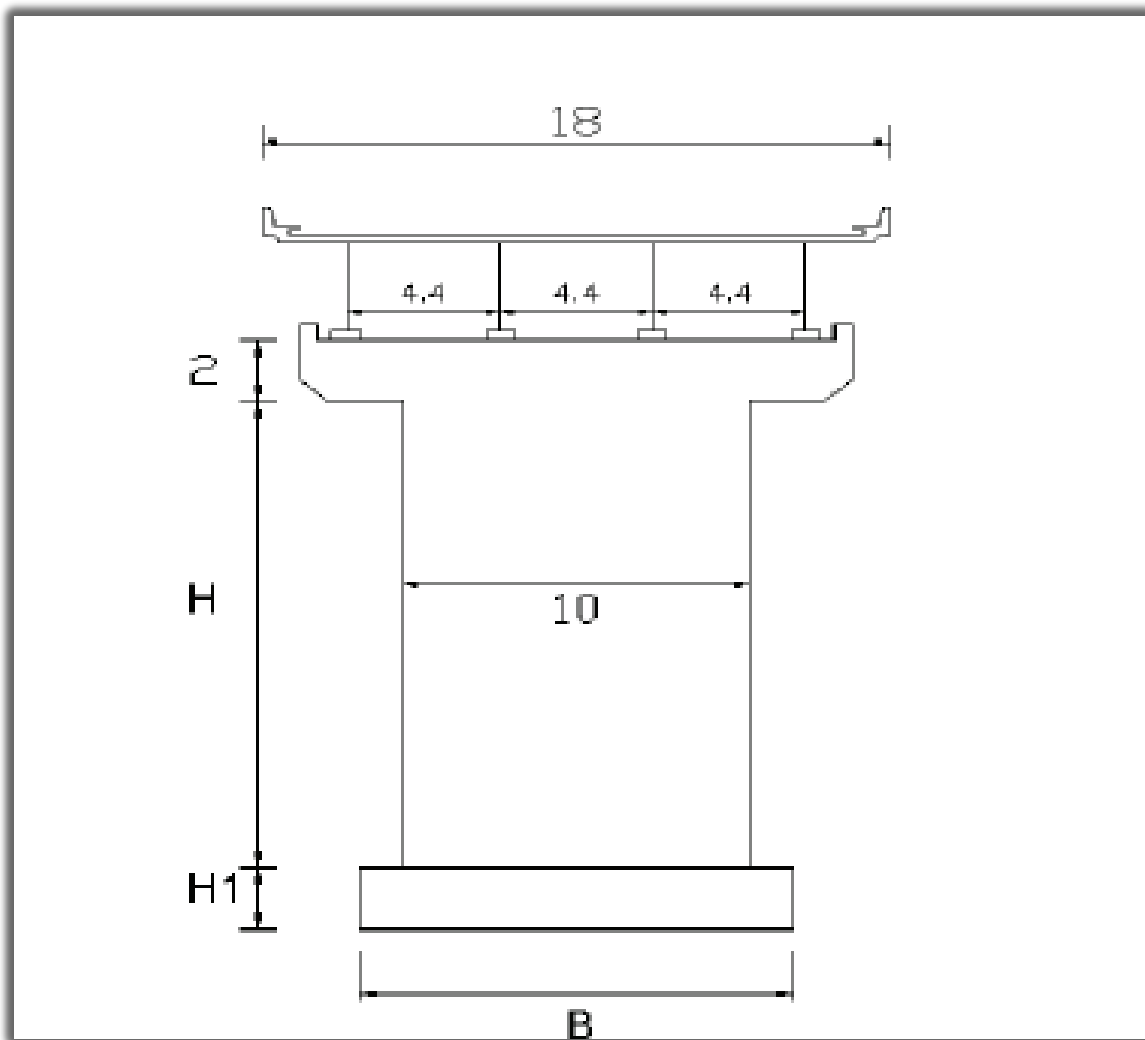


Figura 2-7: Corte transversal del viaducto El Salto, dimensiones en [mm] (Daza, 2003)

Tabla 2-4: Dimensiones de los pilotes del viaducto El Salto (Daza, 2003)

Cepa	L [m]	Φ [m]
2	19.50	1
3	30.00	1
4	15.06	1
5	14.02	1
6	31.70	1

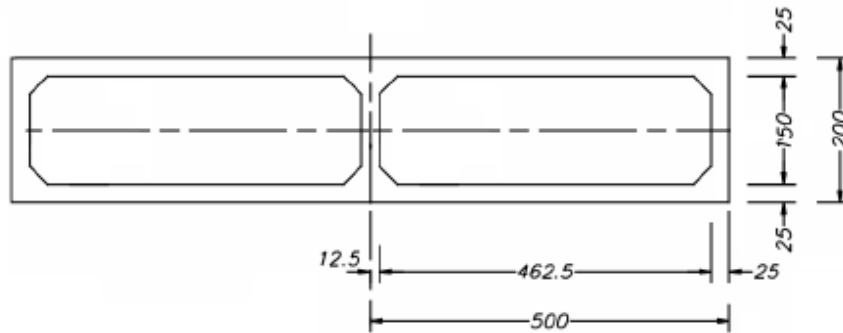


Figura 1.6: Corte cepa, dimensiones en cm.

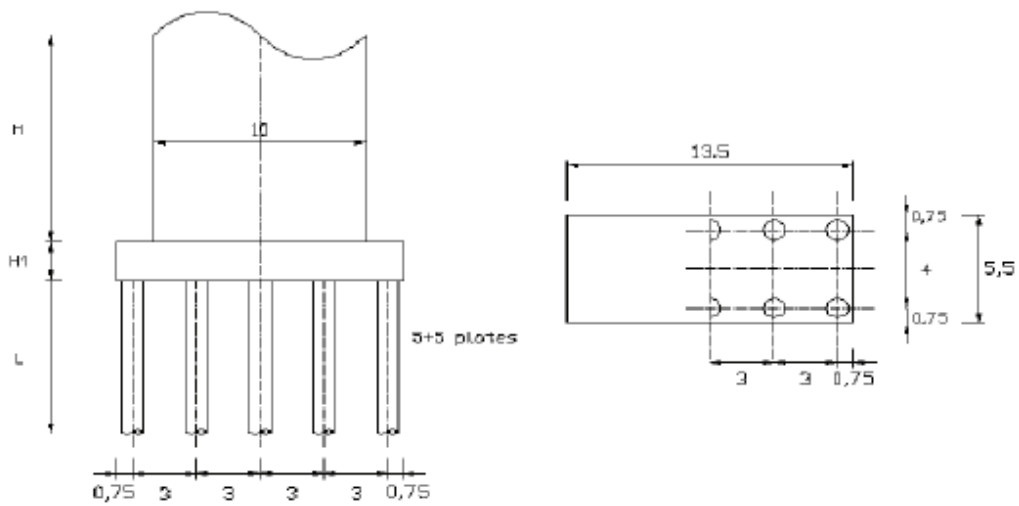


Figura 2-8: Corte transversal y vista en planta de los pilotes del viaducto El Salto, dimensiones en [m] (Daza, 2003)

Tabla 2-5: Dimensiones de las secciones de viga del viaducto El Salto (Daza, 2003)

Sección	B1[mm]	e1 [mm]	B2[mm]	e2 [mm]	B3[mm]	e3 [mm]
A	300	16	350	25	0	0
B	400	25	400	25	0	0
C	500	32	500	32	0	0
C1	500	25	500	25	0	0
D	600	38	600	38	0	0
D1	600	32	600	32	0	0
E	400	25	500	25	0	0
F	300	16	400	25	0	0
G	700	38	700	38	0	0
H	300	16	500	25	0	0
I	550	32	600	32	0	0
J	700	38	800	38	600	25
K	600	32	700	32	0	0
L	500	25	700	32	0	0
M	400	25	700	32	0	0
N	300	16	600	25	0	0
O	300	16	500	25	0	0

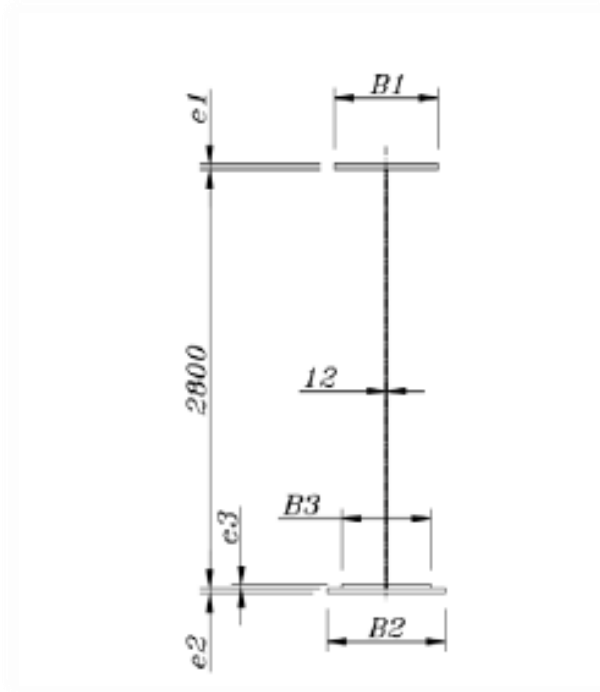


Figura 2-9: Detalle de la sección de las vigas del viaducto El Salto, dimensiones en [mm] (Daza, 2003)

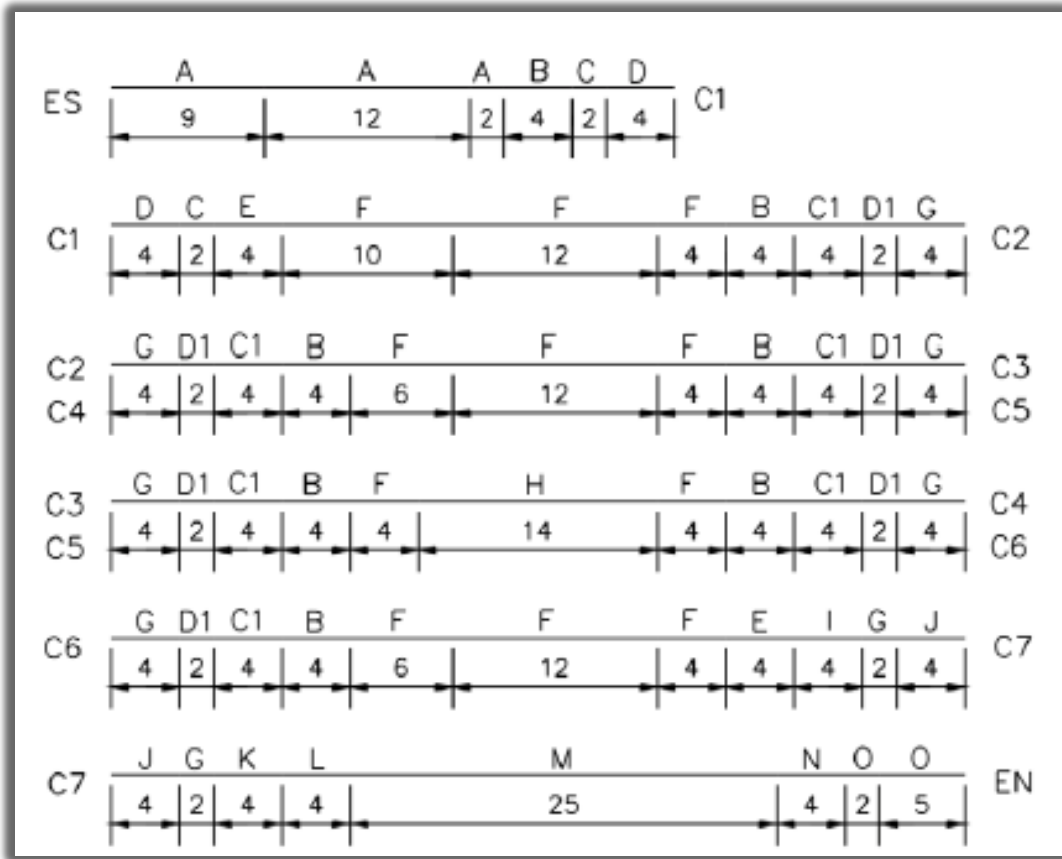


Figura 2-10: Distribución secciones de viga del viaducto El Salto, dimensiones en [m] (Daza, 2003)

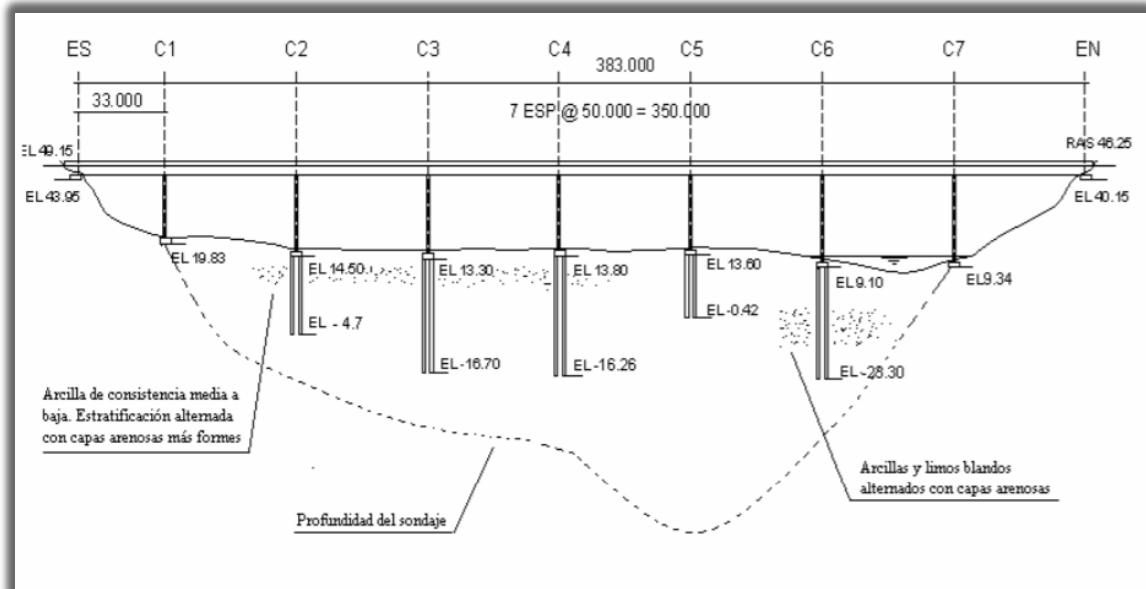


Figura 2-11: Estratigrafía del suelo bajo el viaducto El Salto (Berrios, 2003)

2.2.2 Identificación del sistema de aislación sísmica

Romo (1999) en su trabajo detalla que los aisladores sísmicos se anclan a las cepas y vigas mediante una sección de 50x50 [cm] en el estribo sur y 50x70 [cm] en el estribo norte, mientras que los aisladores sísmicos anclados a los estribos y las vigas poseen una sección de 55x85 [cm]. La altura de cada aislador es de 30 [cm] y son compuestos por 17 capas de goma de 12 [mm] de espesor, separadas por 16 placas de acero de 3 [mm]. En los extremos las placas de acero son de 25 [mm] y se hace necesario el uso de placas de montaje. La conexión de los aisladores varía dependiendo del elemento al cual se unen, siendo soldada cuando se conecta a la viga metálica, mientras que su conexión al cabezal de las cepas o estribos es apernada.

La función de los aisladores en la estructura es disminuir el daño sobre el viaducto, mediante el aumento del periodo del tablero en sentido longitudinal y transversal hacia un periodo objetivo de 2 [s], disminuyendo de esta forma las aceleraciones producidas sobre el tablero y disminuyendo las cargas generadas sobre las cepas asociadas a los efectos inerciales del tablero y los movimientos asincrónicos de los apoyos del tablero.

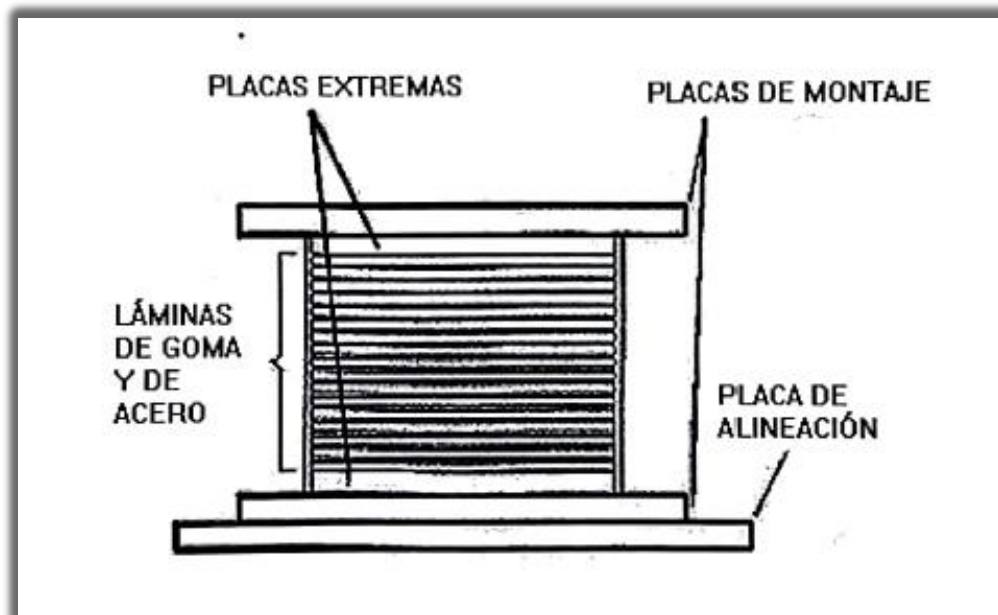


Figura 2-12: Esquema aislador sísmico típico del viaducto El Salto (Daza, 2003)

2.2.3 Red de acelerómetros instalados en Viaducto el Salto

El viaducto El Salto (Ex. Marga-Marga) se encuentra instrumentado con 23 acelerómetros del tipo fuerza balanceada marca Kinematics, modelos FBA-11, FBA-23 y QDR, los dos primeros modelos se constituyen con un rango dinámico de 135 [dB] para frecuencias entre 0.01-50 [Hz], y rango dinámico de 145 [dB] para frecuencias entre 0.01-20 [Hz]. La mayoría de los canales constan con un ancho de banda DC a 200 [Hz], a excepción de los sensores ubicados en el pozo del estribo sur, los cuales tienen un ancho de banda de 100 [Hz], configurados a un rango medible de ± 2 [g] y configurados para que el sistema registre la respuesta sísmica cuando alguno de los sensores sobrepase el umbral de 0.01 [g] (RENADIC, 2019).

En Julio del 2018 se realizó un cambio de la central de registro de datos, pasando de tener 3 estaciones, MT. WHITNEY (18 canales), ETNA (2 canales) y QDR (3 canales), a 2 estaciones de monitoreo, estación DOLOMITE+ y estación QDR 754. Esta transición se debe a un que en el año 2016 la central Mt. Whitney presenta fallas, por lo que se reemplazó por la nueva central Dolomite+. La transición anterior conllevó a cambios en la numeración habitual que se usaba de los sensores, y a la eliminación del antiguo canal 16, el cual cumplió su tiempo de vida útil. Otro cambio realizado a los acelerómetros de la red de monitoreo es el cambio en la orientación del canal 15, el cual originalmente se configura para captar registros transversales, pero en el año 2003 se modificó para registrar señales en la dirección vertical (RENADIC, 2019).

Tabla 2-6: Localización de los equipos de la estación QDR 754 (RENADIC, 2017)

Canal	Tipo de Sensor	Ubicación
1	QDR	Campo Libre Estribo Sur: Este-Oeste
2	QDR	Campo Libre Estribo Sur: Norte-Sur
3	QDR	Campo Libre Estribo Sur: Vertical

Tabla 2-7: Localización de los equipos de la estación DOLOMITE+ (RENADIC, 2017)

Canal	Tipo de Sensor	Ubicación	Serie
1	FBA-23	Pie Cepa 4: Norte-Sur	46305
2	FBA-23	Pie Cepa 4: Vertical	46306
3	FBA-23	Pie Cepa 4: Este-Oeste	46307
4	FBA-23	Cabezal Cepa 4: Norte-Sur	46174
5	FBA-23	Cabezal Cepa 4: Vertical	46175
6	FBA-23	Cabezal Cepa 4: Este-Oeste	46176
7	FBA-23	Tablero Cepa 4 Borde Poniente: Norte-Sur	46116
8	FBA-23	Tablero Cepa 4 Borde Poniente: Vertical	46117
9	FBA-23	Tablero Cepa 4 Borde Poniente: Este-Oeste	46118
10	FBA-11	Base Estribo Sur: Norte-Sur	47277
11	FBA-11	Estribo Sur: Este-Oeste	46618
12	FBA-11	Estribo Sur: Norte-Sur	46620
13	FBA-11	Tablero Cepa 2: Este-Oeste	47275
14	FBA-11	Tablero Cepa 4 Borde Oriente: Vertical	46616
15	EPI	Tablero Cepa 6: Este-Oeste/Vertical (Julio 2003)	897
16	FBA-23	Campo Libre Valle: Norte-Sur	46617
17	FBA-23	Campo Libre Valle: Vertical	46617
18	FBA-23	Campo Libre Valle: Este-Oeste	46617
19	FBA-11	Estribo Norte: Este-Oeste	46615
20	FBA-11	Estribo Norte: Norte-Sur	46619

Tabla 2-8: Características de los acelerómetros Kinematics (RENADIC, 2017)

Canal	F_n [mm]	β [-]	Sensibilidad [VDC/G]
1	51.0	0.70	1.250
2	50.5	0.70	1.250
3	52.4	0.70	1.258
4	51.0	0.70	1.252
5	50.3	0.70	1.254
6	50.5	0.70	1.255
7	54.3	0.70	1.254
8	52.6	0.70	1.250
9	51.8	0.70	1.254
10	51.3	0.70	1.256
11	52.1	0.70	1.253
12	51.0	0.70	1.254
13	50.3	0.70	1.251
14	52.1	0.70	1.253
15	208.3	0.70	1.251
16	51.5	0.70	1.249
17	52.1	0.70	1.252
18	53.5	0.70	1.254
19	50.5	0.70	1.252
20	54.3	0.70	1.254
QDR1	25.6	0.70	1.250
QDR2	25.6	0.70	1.250
QDR3	25.6	0.70	1.250

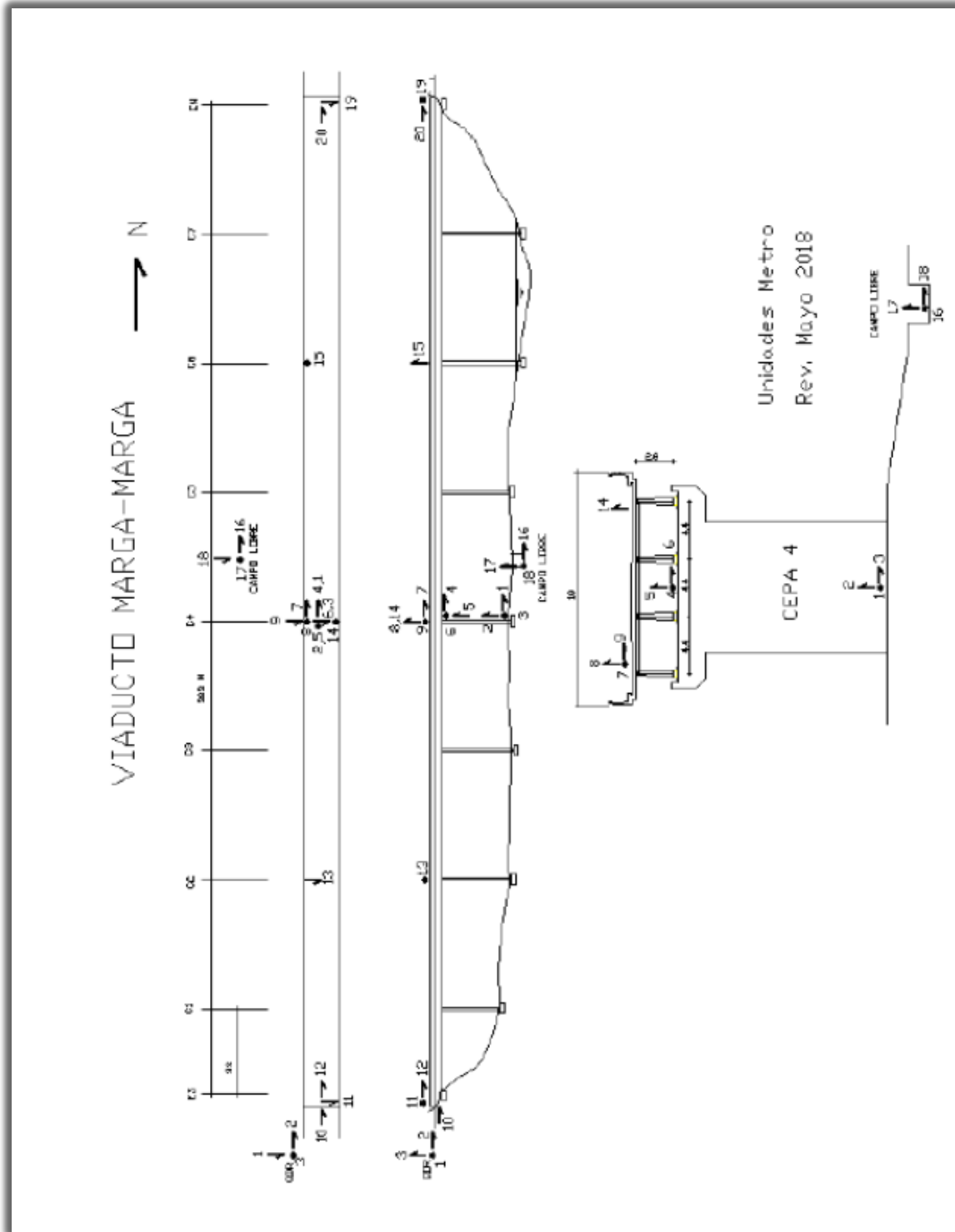


Figura 2-13: Numeración actual de los sensores del viaducto El Salto (RENADIC, 2019)

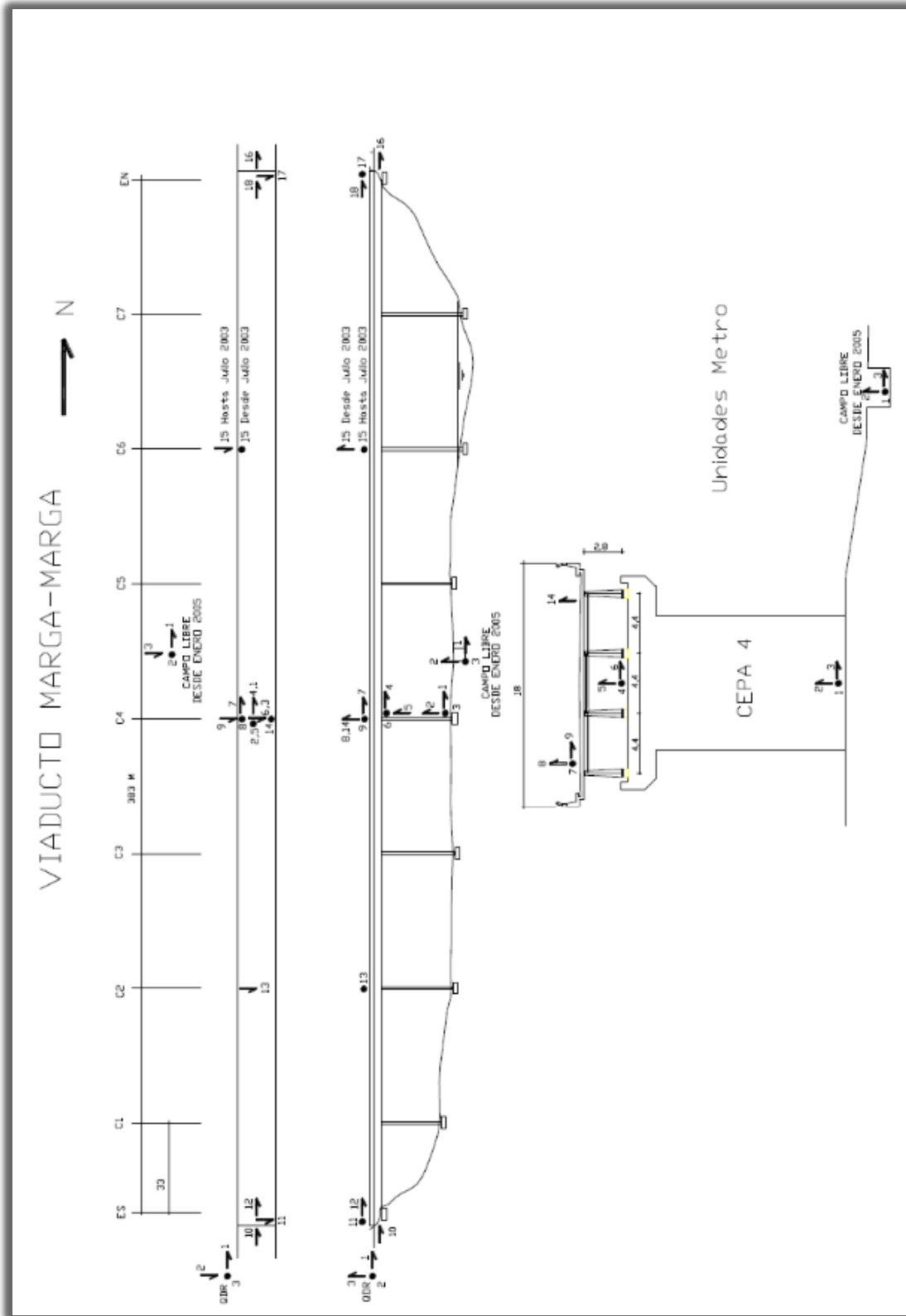


Figura 2-14: Numeración antigua de los sensores del viaducto El Salto (RENADIC, 2017)

2.2.4 Identificación de Propiedades dinámicas

Diversos estudios se han realizado con el fin de obtener las propiedades dinámicas del viaducto El Salto mediante registros de micro vibraciones ambientales. Balsebre (2019), realiza un contraste entre los resultados de dos mediciones propias realizadas en 2018, y dos registros previos, el primero obtenido por Romo (1999) y el segundo siendo datos autoguardados por la instrumentación permanente del viaducto El Salto del año 2002. Mediante esta comparación identifica que las propiedades dinámicas del viaducto El Salto no han sufrido cambios significativos (Tabla 2-9), lo que indicaría una baja degradación de los aisladores sísmicos o que la estructura no ha sufrido daños significativos durante el tiempo. Sin embargo, Balsebre (2019) pudo observar que en el estribo norte se aprecia una mayor trabazón de las formas modales longitudinales lo cual podría indicar la presencia de residuos que rigidizan este apoyo.

Asimismo, mediante el análisis del contraste realizado, identifica 6 frecuencias globales (Tabla 2-9) de la estructura y calcula sus respectivas formas modales en planta (Figura 2-15), deduciendo que los tres primeros modos se atribuyen principalmente a un movimiento transversal del puente, mientras que el cuarto modo posee una contribución entre un movimiento transversal y longitudinal, mientras que el quinto y sexto modo se asocian prioritariamente a un movimiento longitudinal.

Igualmente Balsebre (2019) realiza una segunda medición en la cual coloca acelerómetros en el cabezal de 3 cepas (Cepa 1 , 2 y 3), obteniendo el registro de micro vibraciones ambientales de estas, a los cuales realiza un análisis en frecuencias mediante el cálculo de los espectros de densidad de potencia, identificando frecuencias particulares asociadas a cada una de las cepas, delimitando estos valores entre 2.4-3.1 [Hz] para los modos longitudinales de cepa, y 2.2-3.0 [Hz] para los modos transversales de cepa.

Tabla 2-9: Frecuencias naturales identificadas del viaducto El Salto (Balsebre, 2019)

Modo	Frecuencias 1999 [Hz]	Frecuencias 2002 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1	1.033(FM1)	1.035(FM1)	1.036(FM1)
2	1.183(FM2)	1.195(FM2)	1.182(FM2)
3	1.610(FM3)	1.625(FM3)	1.633(FM3)
4	1.851(FM4)	1.817(FM4)	1.819(FM4)
5	2.092(FM5)	2.051(FM5)	2.075(FM5)
6	2.165(FM6)	2.151(FM6)	2.190(FM6)

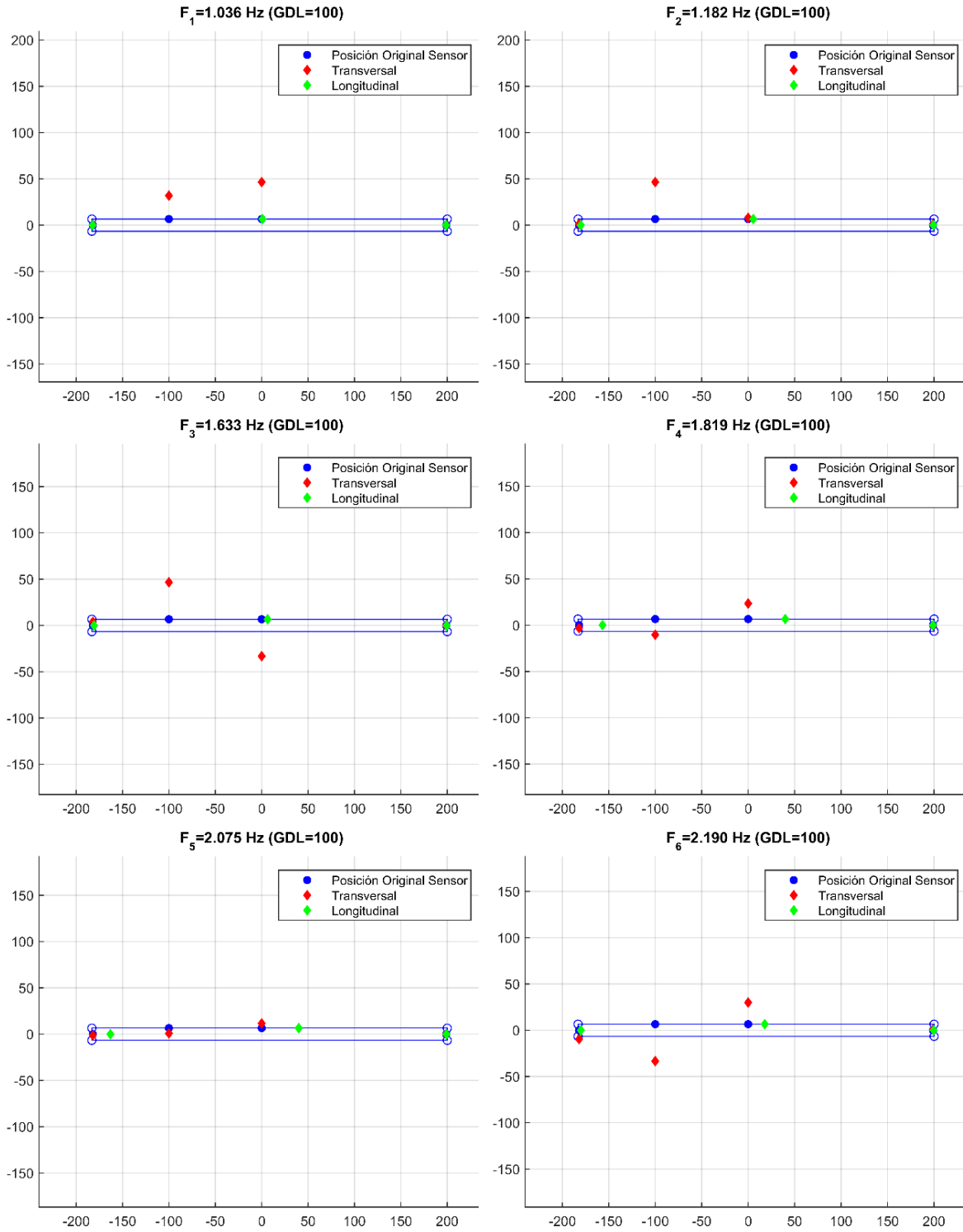


Figura 2-15: Formas modales identificadas del viaducto El Salto (Balsebre, 2019)

Otro estudio que define propiedades dinámicas del viaducto El Salto, es el trabajo de Sarrazín et al (2002), en el cual, a través del espectro de densidad de potencia, de los registros de micro vibraciones ambientales de la instrumentación permanente del puente, obtiene frecuencias fundamentales del viaducto El salto, las cuales define según lo mostrado en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10: Propiedades identificadas del viaducto El Salto (Sarrazín, Moroni, & Roesset, 2005)

Frecuencia [Hz]	Amortiguamiento [%]	Dirección predominante
1.05	2.6	Transversal
1.18	1.9	Transversal
1.5-1.7	1.2	Cepa/Tablero-General
1.85	1.4	Transversal/Longitudinal
1.8-2.1	1.5	Longitudinal

2.3 Plataforma Edificio Antígona

El edificio Antígona se encuentra ubicado en la calle 5 oriente en viña del mar (LAT -33.021° LONG -71.544°), este es un edificio con fines habitacionales, de altura 16 pisos. Esta estructura se encuentra instrumentada con 12 sensores de aceleración (Figura 2-17), ubicados a lo largo del edificio, que registran cualquier evento sísmico que supere una aceleración de 0.01 [g].

La Información obtenida a través de estos sensores es recopilada y monitoreada por la red de cobertura nacional de acelerógrafos del departamento de ingeniería de la Universidad de Chile (RENADIC), organismo que se encarga de procesar estos datos y entregar la información pertinente sobre los diversos eventos sísmicos, e información relacionada al comportamiento de la estructura (propiedades dinámicas de la estructura, estado estructural, etc.).

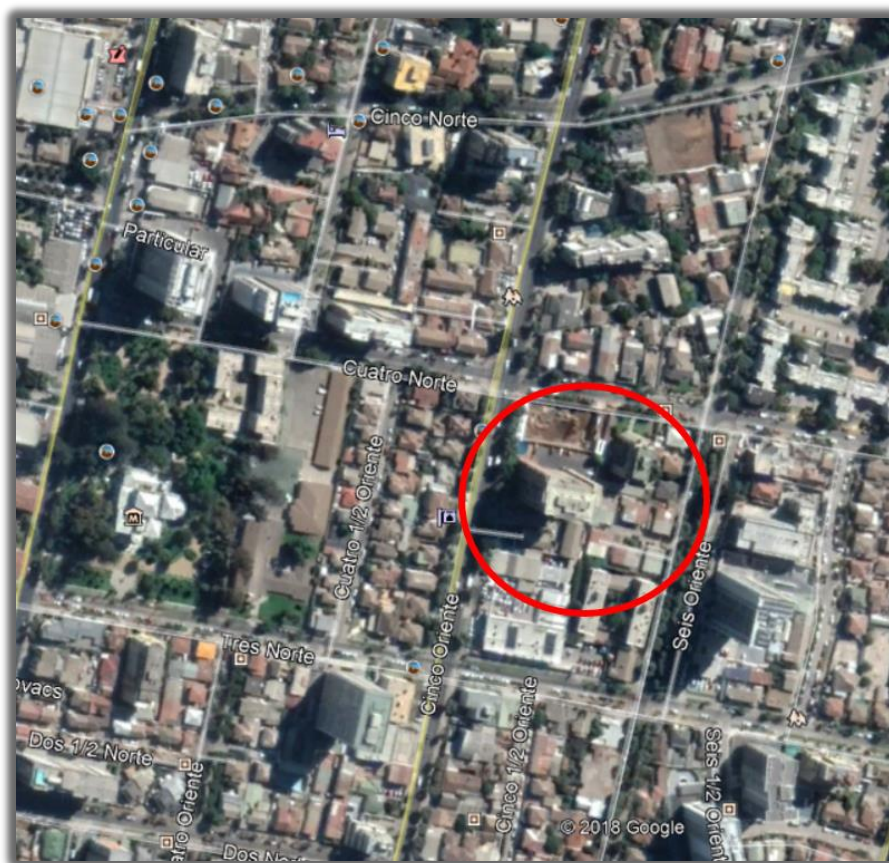


Figura 2-16: Ubicación del edificio Antígona (Google Maps, 2019)

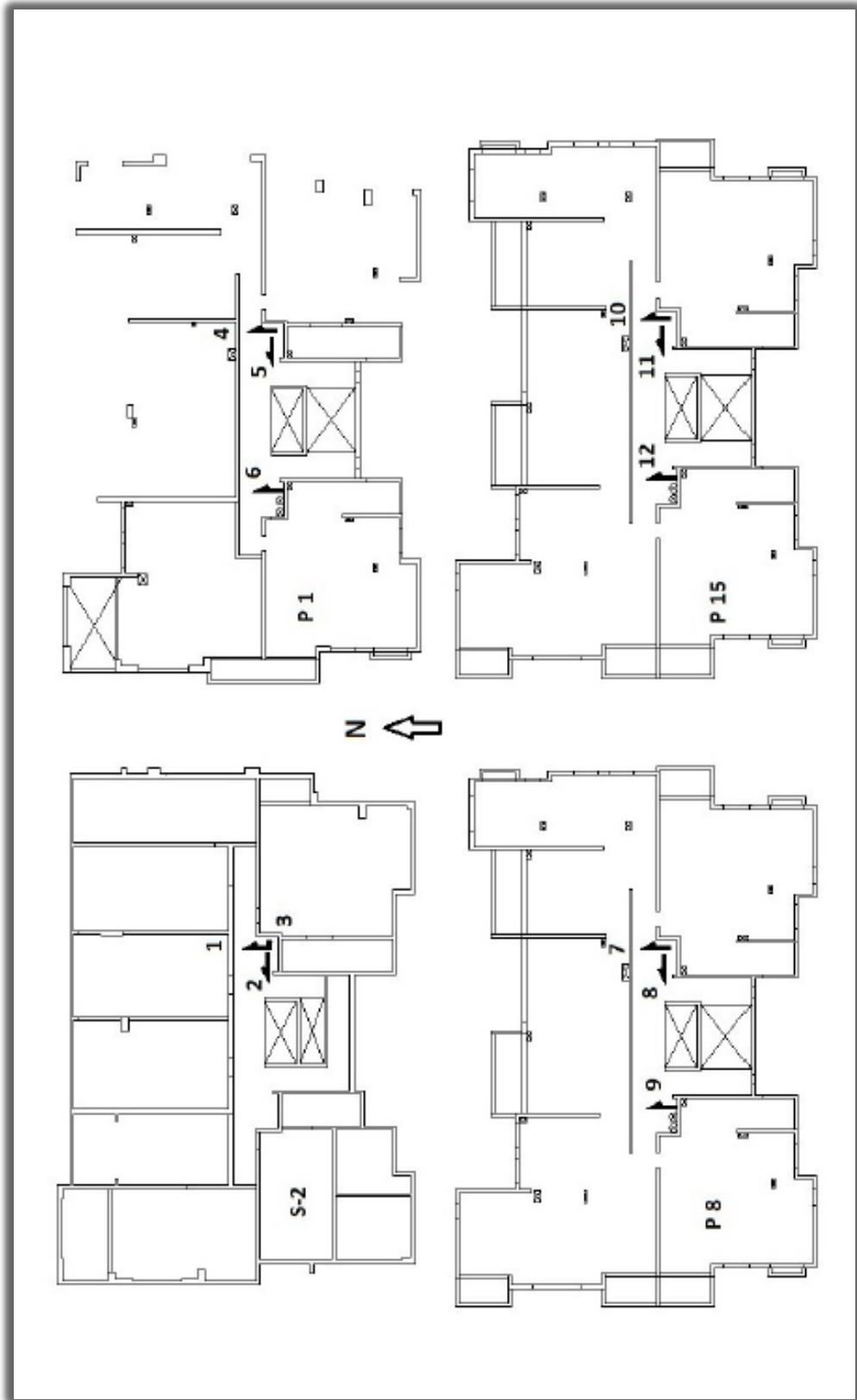


Figura 2-17: Localización de los sensores del edificio Antígona

El trabajo de Costa (2019) se centra en crear una plataforma que permita generar informes robustos de la respuesta sísmica del edificio Antígona, de manera que el procesamiento de los datos sea más eficiente y acabado, dando la posibilidad que puedan ser generados periódicamente por la RENADIC. Asimismo, la herramienta permite el procesamiento casi automático de la respuesta sísmica de la estructura, luego de acontecido un evento sísmico, lo cual será una información valiosa para entender el estado estructural de la estructura luego de acontecido un sismo de importancia.

La plataforma del edificio Antígona trabaja bajo un esquema de carpetas (Figura 2-18), las cuales contienen los diferentes archivos que conforman el programa. Estas carpetas son:

- Carpeta “ANTIGONAS”: carpeta donde se almacenan los registros sísmicos disponibles del edificio.
- Carpeta “Carpeta_de_resultados”: Carpeta en la cual se almacenan los gráficos de los resultados y datos generados por las subrutinas de MATLAB.
- Carpeta “Funciones Matlab”: Carpeta en la cual se encuentran las diversas funciones de Matlab que conforman a la plataforma.
- Carpeta “Informe_N°”: Carpeta en la cual se almacenan los gráficos, datos obtenidos y código de LATEX, generados por las subrutinas de MATLAB, con los cuales se generan los diferentes informes.
- Carpeta “Informe_Base”: Carpeta en la cual se almacena el código base de LATEX y sus archivos anexos (imágenes), sobre los cuales se monta el informe final.

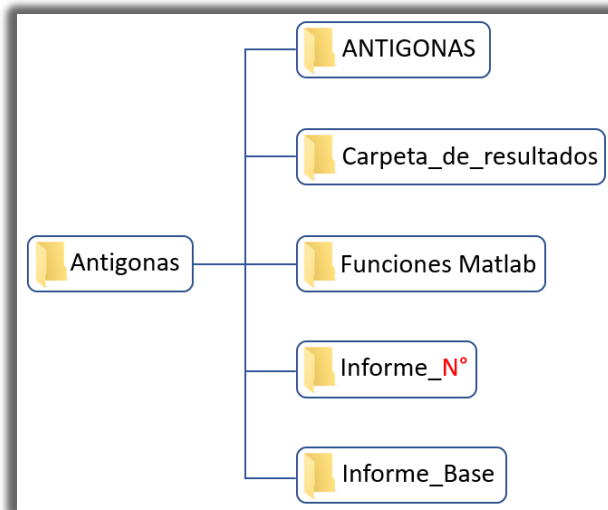


Figura 2-18: Diagrama plataforma edificio Antígona (Costa, 2019)

En la carpeta “Funciones MATLAB”, se encuentra el código de la interfaz principal, el cual se encarga de generar los informes de respuesta sísmica. La metodología utilizada por este código se basa en tomar dos elementos primarios, los registros sísmicos y el informe base programado en LATEX, de manera que al procesar estos registros y generar diversos resultados asociados al estado estructural del edificio, genere un nuevo código de LATEX, el cual se monte sobre el informe base existente formando un informe completo de la respuesta estructural.

En una primera instancia, el código de la plataforma identifica los registros sísmicos y los procesa para generar una matriz que en cada columna contenga los datos de aceleración registrados por cada uno de los sensores ubicados de la estructura, con el fin de generar los siguientes archivos:

- Gráfico del o los registros sísmicos.
- Tabla resumen de o los eventos sísmicos (entrega información como magnitud del sismo, distancia al epicentro, intensidad de Arias, potencial destructivo, entre otros).
- Tabla con la aceleración, velocidad y desplazamiento máximo registrado por los diferentes sensores por evento sísmico.
- Gráfico del espectro elástico de respuesta, computados según el método de Newmark considerando una tasa de amortiguamiento del 5%.
- Gráfico con los espectros de potencia y funciones de transferencia, calculados mediante el método de Welch.
- Gráfico del diagrama de estabilidad, tablas resumen con las propiedades dinámicas y esquemas de formas modales obtenidos del método DSI empleando matrices de peso CVA.

La plataforma también trabaja con un modelo de elementos finitos (Figura 2-19), elaborado en el programa ETABS, el cual se ocupa en conjunto con las rutinas de MATLAB, permitiendo que se agreguen al informe resultados de interés entregados por ETABS, dentro de los que se seleccionan:

- Corte por piso.
- Deformaciones relativas entre pisos.

Una vez obtenidos los resultados, el código principal de MATLAB genera un archivo *.tex en LATEX con estos resultados y realiza una búsqueda de palabras claves dentro del código de LATEX (Figura 2-20), de tal manera que estas sean identificadas y se inserte el código generado en LATEX en la ubicación de las palabras claves.

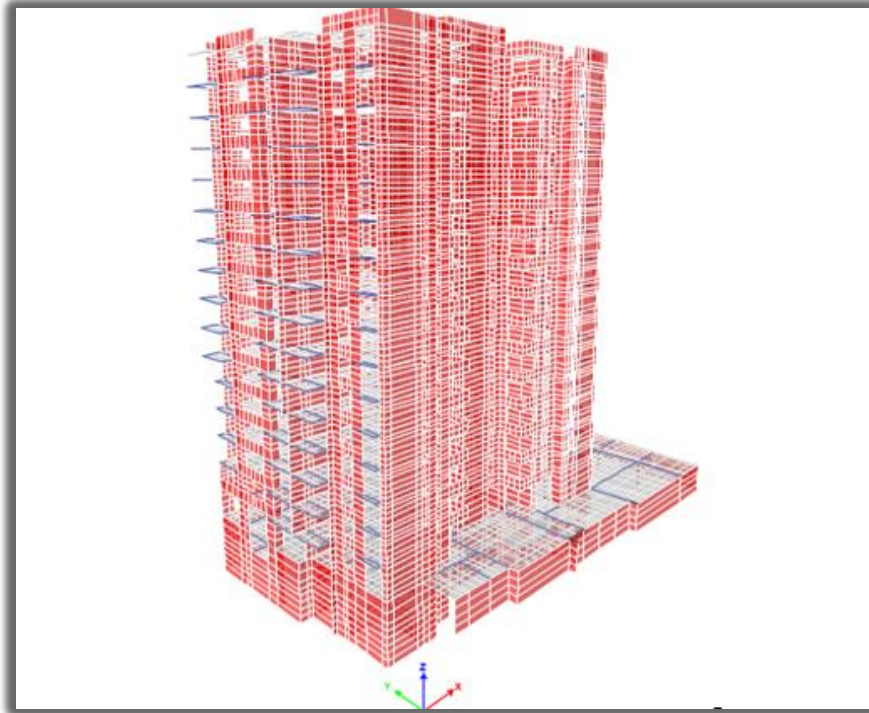


Figura 2-19: Modelo de elementos finitos del edificio Antígona (Costa, 2019)

RED DE COBERTURA NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS
 UNIVERSIDAD DE CHILE
 FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

Tabla 1: Característica de los acelerómetros Episensor de Kinemetrics

Canal	fn [Hz]	β	sensibilidad (VDC/g)
1	210.0	0.70	9.982
2	212.0	0.70	9.981
3	200.0	0.70	9.995
4	204.0	0.70	9.994
5	206.0	0.70	9.987
6	204.0	0.70	10.008
7	200.0	0.70	9.991
8	210.0	0.70	9.982
9	208.0	0.70	9.983
10	206.0	0.70	9.993
11	206.0	0.70	9.977
12	202.0	0.70	9.997

2. Resumen de Eventos Sísmicos Registrados durante rangofechas

RRTablaSismoResumen

RED DE COBERTURA NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS
 UNIVERSIDAD DE CHILE
 FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

Tabla 1: Característica de los acelerómetros Episensor de Kinemetrics

Canal	fn [Hz]	β	sensibilidad (VDC/g)
1	210.0	0.70	9.982
2	212.0	0.70	9.981
3	200.0	0.70	9.995
4	204.0	0.70	9.994
5	206.0	0.70	9.987
6	204.0	0.70	10.008
7	200.0	0.70	9.991
8	210.0	0.70	9.982
9	208.0	0.70	9.983
10	206.0	0.70	9.993
11	206.0	0.70	9.977
12	202.0	0.70	9.997

2. Resumen de Eventos Sísmicos Registrados durante 01-01-2018 al 31-12-2018

Tabla 2: Características de Eventos sísmicos registrados

Fecha	Hora	M_c	Prof [km]	Lat	Lon	D_{p-1} [km]	PGA [g]	I_{p-1} [cm/seg]	P_{p-1} [cm/seg]
04.06.2018	18:05:29	4.4	36.3	-81.718	-71.688	20.0	0.011	0.165	0.008
04.06.2018	07:19:33	6.2	12.1	-81.008	-71.502	308.6	0.015	1.091	0.108
05.05.2018	23:44:20	5.1	34.6	-81.388	-72.261	220.2	0.003	0.042	0.001
11.06.2018	13:37:12	4.5	29.3	-81.794	-71.705	44.7	0.008	0.068	0.001
19.06.2018	02:45:40	4.7	36.8	-82.207	-71.270	130.0	0.008	0.235	0.004
18.07.2018	06:44:54	4.3	29.0	-82.634	-71.635	62.0	0.006	0.045	0.001

Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile. Fono: (56-2) 2978 43 72 - renadicting.uchile.cl
www.terremotosuchile.cl
www.renadic.cl

Bianco Encalada 2002, Santiago, Chile. Fono: (56-2) 2978 43 72 - renadicting.uchile.cl 2
www.terremotosuchile.cl
www.renadic.cl

Figura 2-20: Reemplazo de palabras claves de la plataforma del edificio Antígona (Costa, 2019)

2.4 Métodos de identificación de propiedades dinámicas

A lo largo del presente trabajo de título se utilizan diversos métodos numéricos de análisis de propiedades dinámicas a partir de datos medidos de aceleraciones en el tiempo, los cuales son herramientas de gran utilidad para analizar características claves de la estructura. Dentro de estos métodos se encuentran análisis como el espectro de respuesta elástico, el cual es ampliamente utilizado por ingenieros civiles como base para conocer las sollicitaciones de diseño, además de métodos de análisis en el espacio de las frecuencias, como lo son el espectro de densidad de potencia y espectrogramas, asimismo se utilizan métodos determinísticos estocásticos como el método de identificación de propiedades DSI y método DSI por pequeñas ventanas de tiempo.

A modo de detallar el trasfondo teórico y matemático de los diversos métodos utilizados, en el presente subcapítulo se profundiza sobre los métodos utilizados para analizar las propiedades dinámicas de los puentes Águila Norte y El Salto.

2.4.1 Espectros de respuesta elásticos

Según lo especificado en el trabajo de Crisafulli (2002). Los espectros de respuesta se representan mediante un gráfico de aceleración en función del periodo de la estructura, en el cual se plasma la máxima aceleración que experimenta una serie de estructuras de un grado de libertad, u osciladores con diferentes periodos de vibración e igual factor de amortiguamiento, sometidos a al mismo registro de aceleraciones.

Hay varios métodos de cálculo de espectros de respuesta, siendo los más conocidos el método de Biot y Newmark, con los cuales se pueden obtener dos tipos de espectros de respuestas, los espectros de respuestas elásticos, en los cuales la estructura no incurre en un comportamiento no-lineal, y los espectros de respuestas inelásticos, en los cuales se toma en cuenta el comportamiento plástico en el que puede incurrir la estructura eventualmente.

A pesar de que los espectros de respuesta elásticos son ampliamente aceptados y usados, y de que entregan al ingeniero la respuesta máxima a la que deben diseñar una estructura, este método no toma en cuenta la duración del movimiento sísmico ni el número de ciclos en el que incurre la estructura, parámetros que influyen directamente en el aumento en las deformaciones inelásticas de la estructura.

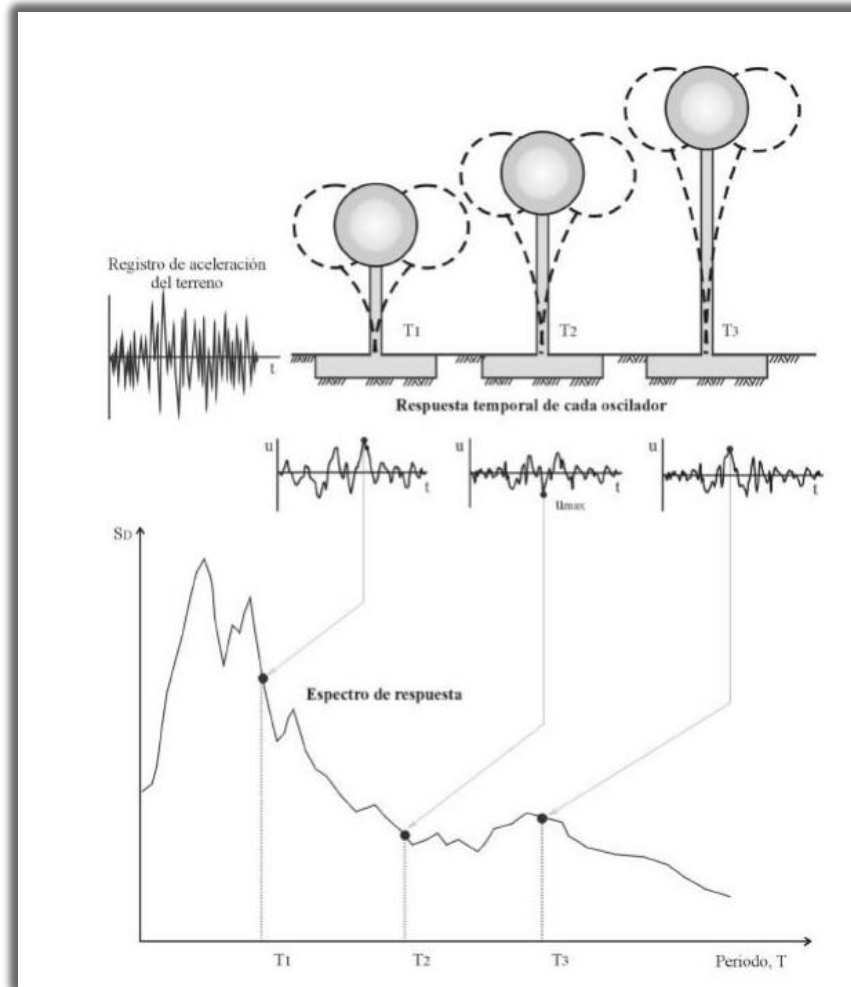


Figura 2-21: Metodología de cálculo de un espectro de respuesta (Crisafulli, 2002)

2.4.2 Métodos de análisis de frecuencias

2.4.2.1 Espectros de densidad de potencia

El método del espectro de densidad de frecuencias permite obtener las propiedades dinámicas de una estructura, mediante el uso de la transformada discreta de Fourier (ecuación(2.1)), la cual provee una representación de una señal en el tiempo en el dominio de las frecuencias, en el cual se asocia una determinada cantidad de energía a cada una de las frecuencias. Mediante este emparejamiento entre frecuencias y energía, es posible identificar las frecuencias características de la señal, las que se asocian con los puntos altos de energía, lo que se puede observar en la Figura 2-23. (Diaz A. , 2004).

Para disminuir la influencia del suelo sobre la estructura es que los espectros de densidad de potencia (y en las frecuencias naturales identificadas), se utiliza la función de transferencia (ecuación(2.4)), la cual es una normalización del espectro de densidad cruzada (ecuación(2.3)), del espectro de salida y del espectro de entrada, con respecto al espectro de potencia de entrada del sistema (la que normalmente se encuentra asociada a los registros de suelo). Al aplicar esta normalización, los puntos máximos que se observan en el grafico (Figura 2-22) son los de la estructura, y no se encuentran teóricamente influenciados con los puntos máximos que el registro de entrada pueda haber traspasado a la señal medida en la estructura.

En la Figura 2-22 se muestra un ejemplo de los resultados de la función coherencia (ecuación(2.6)), la que representa una medida de cuan correlacionadas son las señales de entrada y salida, entregando resultados entre 0 y1. En la misma figura se agrega la fase (ecuación(2.5)), la cual representa el desfase temporal (medidos en grados) en el movimiento de las frecuencias, ya que si la fase es igual a 180° , los movimientos entre el canal de entrada y salida se asocian a movimientos en sentidos contrarios.

Vale recalcar que para calcular los espectros de densidad de potencia se utiliza el método de Welch (1967), para lo cual se divide las señales en varias ventanas de datos, en este caso se ha utilizado ventanas del tipo Hanning para evitar problemas de desdoblamiento y dispersión de datos.

Transformada de Fourier de una señal asociada a una ventana de datos:

$$X(f, t_0^i) = \int_0^T x(t + t_0^i) \cdot w(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

Donde:

$x(t)$ = Señal respuesta a un ruido blanco.

$w(t)$ = Ventana de tiempo.

T = Tamaño de la ventana de tiempo.

t_0^i = El tiempo inicial de la ventana analizada i-esimá.

$j = \sqrt{-1}$

$\omega = 2\pi f$

-Espectro de densidad de potencia (PSD_{xx}):

$$PSD_{xx}(f) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N [| X(f, t_0^i) |^2] \quad (2.2)$$

-Espectro de densidad de potencia cruzado (CSD_{xy}):

$$CSD_{xy}(f) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N [X^*(f, t_0^i) \cdot Y(f, t_0^i)] \quad (2.3)$$

Donde:

N= Número de ventanas usadas en el análisis.

f = Frecuencia modal.

-Función de Transferencia (T_{xy}):

$$T_{xy}(f) = \frac{CSD_{xy}(f)}{PSD_x(f)} \quad (2.4)$$

-Ángulo de Fase (θ_{xy}):

$$\theta_{xy}(f) = \text{atan} \left(\frac{\text{Imag } T_{xy}(f)}{\text{Real } T_{xy}(f)} \right) \quad (2.5)$$

-Coherencia (C_{xy}):

$$C_{xy}(f) = \frac{|CSD_{xy}(f)|^2}{PSD_{xx}(f)PSD_{yy}(f)} \quad (2.6)$$

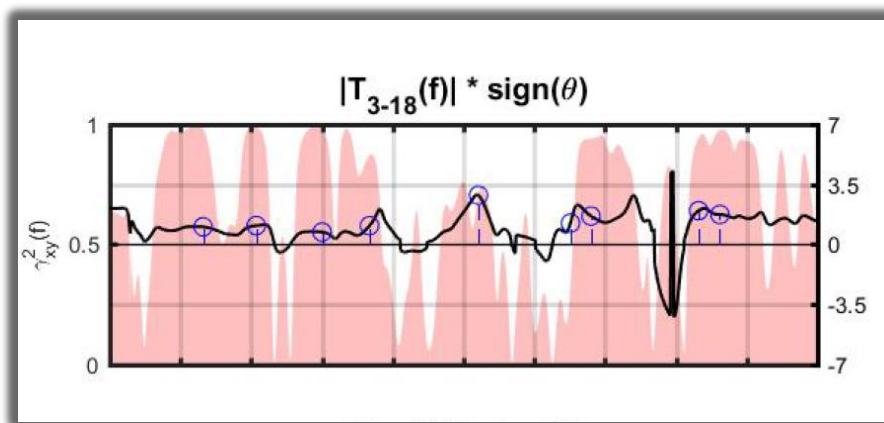


Figura 2-22: Ejemplo de Función Transferencia, Coherencia y fase, para los canales 3 y 18 del viaducto El Salto

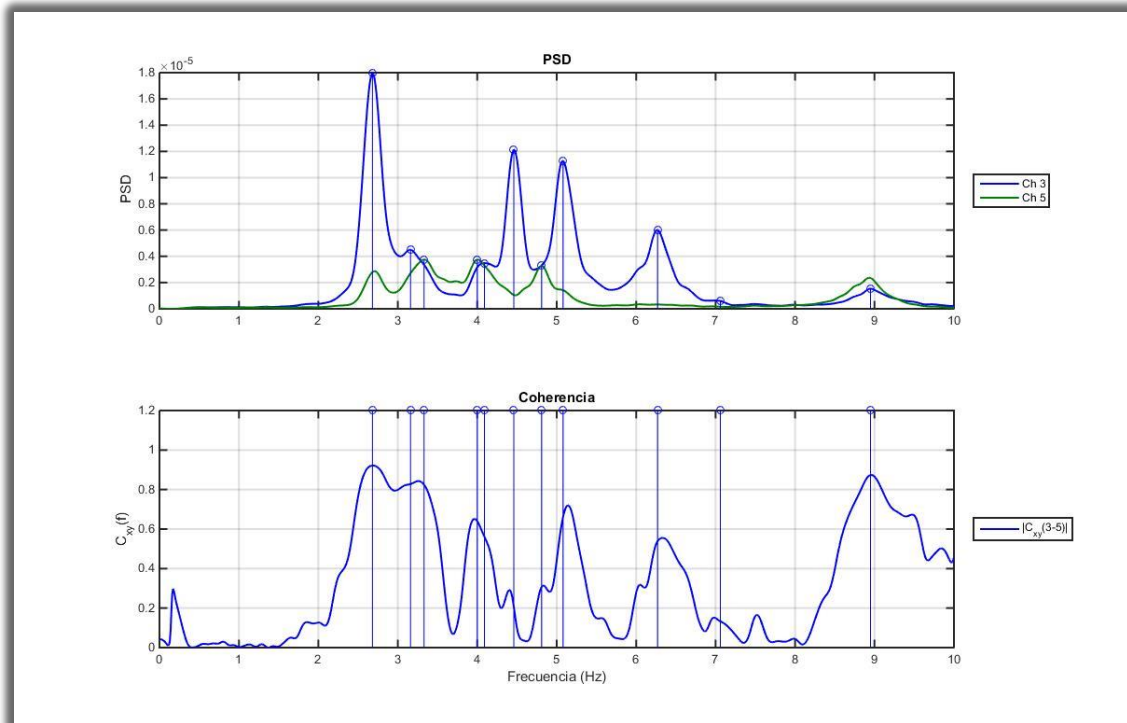


Figura 2-23: Ejemplo de espectro de densidad de potencia y función coherencia del puente Águila Norte.

2.4.2.2 Espectrogramas

A partir de lo recapitulado del trabajo de Hernández (2009), el espectrograma se define como un método de identificación de propiedades dinámicas que ocupa la metodología de los espectros de densidad de potencia por pequeñas ventanas de tiempo (ecuación (2.1)), con ello se visualiza la variación de las frecuencias predominantes durante el registro de interés, mediante el uso de ventanas de tiempo que dividen el registro analizado en varios segmentos, de los cuales se calculan sus espectros de densidad de potencia respectivos, de esta forma obteniendo la variación del espectro de densidad de potencia en el tiempo.

En el presente se trabajó, se utilizan espectrogramas como los obtenidos en la memoria de Arrochas (2019), en los cuales se representa la variación de los puntos altos de energía detectados en los espectros de potencia, mediante un mapa de colores en 2D (Figura 2-24). Adicionalmente, se acompaña a los espectrogramas mediante un espectro de densidad de potencia simple, el cual sirve de apoyo y guía para identificar la frecuencia detectada.

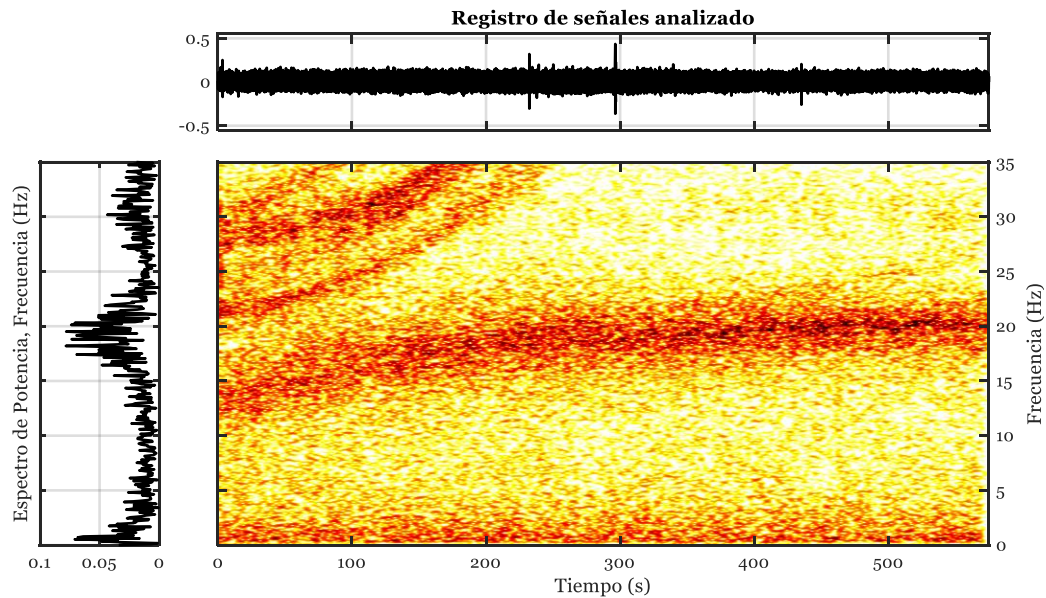


Figura 2-24. Ejemplo de Espectrograma de tonalidades en el espacio tiempo-frecuencia (Arrochas, 2019)

2.4.2.3 Función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo

La función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo se representa matemáticamente como la ecuación (2.4), en la cual se calcula el cociente entre el espectro de densidad cruzada de una señal de entrada y salida, y el espectro de densidad de potencia de la señal de entrada. La razón espectral se realiza a lo largo de ventanas de tiempo de corta duración, lo que permite analizar la variación de las propiedades relativas entre la entrada y la salida (es decir la estructura o subestructura).

Pablo Díaz (2017) detalla en su trabajo de título las ventajas de la Función de transferencia por pequeñas ventanas en comparación con el espectrograma:

- “La función de transferencia es independiente de la amplitud del input u output. Es decir, la función de transferencia es independiente de la potencia local de la señal de entrada. En otras palabras, la función de transferencia se normaliza respecto a la potencia del input.”
- “El registro de aceleraciones totales asociados a un canal dado se compone de la respuesta relativa de la estructura y de la componente quasi-estática (señal de entrada). Por lo que el espectrograma está fuertemente influenciado por la señal de entrada que está siempre presente en las aceleraciones totales (al

menos que se trabaje con aceleraciones relativas) que no guarda relación ninguna con la respuesta estructural.”

“La función de transferencia por pequeñas ventanas se puede relacionar a diversos pares de inputs-outputs. De esta forma la función de transferencia permite analizar la variación de las frecuencias predominantes de la estructura relativas ya sea al nivel basal o al nivel del sistema de aislación. Es decir, la función de transferencia por pequeñas ventanas permite analizar las frecuencias predominantes de la estructura.

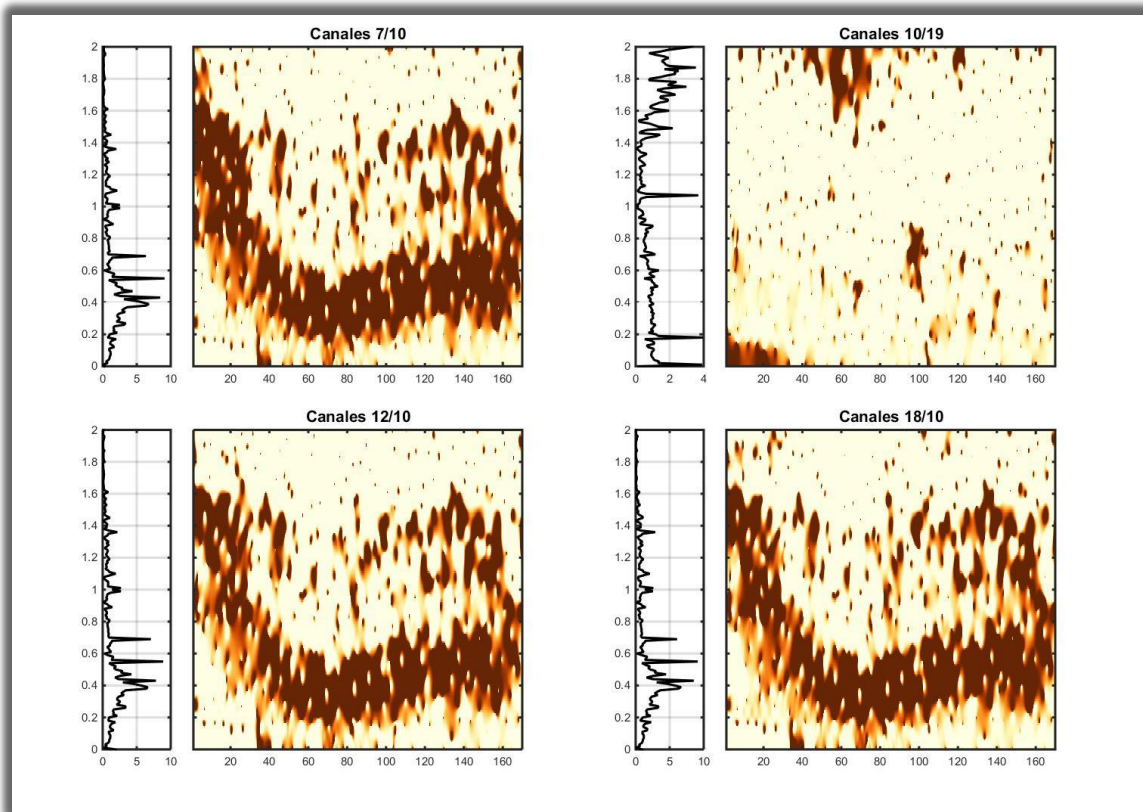


Figura 2-25: Ejemplo de función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo, utilizada para analizar la variación de las frecuencias fundamentales del tablero, durante el terremoto del Maule del 2010 en el viaducto El Salto.

2.4.3 Métodos de identificación de propiedades dinámicas DSI y SSI

Los métodos DSI y SSI, son métodos detallados extensamente por Van Overschee & De Moor (1996), que consideran que la estructura tiene un comportamiento lineal-elástico durante el tiempo que se analicen la relación de señales entradas-salidas (DSI) o la respuesta solo de salidas debido a acciones de un origen aleatorio (SSI), por lo que se supone que la estructura no sufre degradación de sus propiedades durante la sollicitación sísmica (Hernández, 2009). Este supuesto no es válido cuando las estructuras se comportan de manera inelástica, en donde se observa una degradación de la rigidez de las estructuras, pero es una buena aproximación para sismos pequeños, los cuales se asemejan a las mediciones registradas por vibraciones ambientales.

Ambos métodos comparten un trasfondo teórico similar para su cálculo (basados en modelos espacio-estado discreto), pero difieren en las entradas que usan a su metodología, ya que método DSI considera el uso de múltiples entradas para generar múltiples salidas, mientras que el método SSI solo considera salidas, es decir, que en el método SSI no se tiene una acción no-estacionaria que sea registrada, a diferencia del método DSI que, si la posee, esto provoca que los comportamientos estimados de la estructura en el método SSI, sean producto de acciones no-estacionarias futuras o presentes condicionadas por la respuesta real o estimada. Mayor información sobre estos métodos puede ser encontrada en los trabajos de (Van Overschee & De Moor, 1996), (Peeters, 2000), (Valdés, 2004) y (Hernández, 2009).

2.4.3.1 Metodología del método DSI

A continuación, se describe la metodología sobre el método DSI descrita en el trabajo de Castillo & Boroschek (2002).

A partir de la ecuación de equilibrio dinámico de un sistema de múltiples grados de libertad:

$$M \cdot \ddot{q}(t) + C \cdot \dot{q}(t) + K \cdot q(t) = f(t) \quad (2.7)$$

Con M , C , K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, $\in \mathbb{R}^n$ con n correspondiente a los grados de libertad. Donde $q(t)$ es el desplazamiento relativo y $f(t)$ es la fuerza de excitación.

La ecuación de equilibrio dinámico es una ecuación diferencial de segundo orden, que puede ser transformada a una ecuación diferencial de primer orden definiendo el

vector de estado $x(t) = \begin{pmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{pmatrix}$, llegando a la siguiente ecuación de movimiento en espacio-estado continuo:

$$\dot{x}(t) = A_c \cdot x(t) + f_c(t) \quad (2.8)$$

Donde:

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ M^{-1}K & -M^{-1}K \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$f_c(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}f(t) \end{bmatrix}$$

Debido a la imposibilidad de medir todos los grados de libertad independientes de una estructura, se tiene que los datos medidos son un subconjunto de la respuesta de los GDL de la estructura (aceleración, velocidad o desplazamiento). Con lo que los datos medidos se pueden expresar matricialmente en función de la respuesta de los GDL de la estructura como:

$$y(t) = C_a \cdot \ddot{q}(t) + C_v \cdot \dot{q}(t) + C_d \cdot q(t) \quad (2.10)$$

Donde $y(t) \in \mathbb{R}^l$ son las respuestas observadas de las mediciones y $C_a, C_v, C_d \in \mathbb{R}^{l \times n}$ son matrices booleanas que indican la ubicación de las salidas.

La fuerza de excitación se puede expresar en función de mediciones efectuadas de las entradas que excitan a la estructura ($u \ t$):

$$f_c(t) = B_c \cdot u(t) \quad (2.11)$$

Teniendo en cuenta lo anterior se puede expresar el vector de observación en función del vector de estado y de las entradas del sistema:

$$y(t) = C_c \cdot x(t) + D_c \cdot u(t) \quad (2.12)$$

Donde:

$$C_c = \begin{bmatrix} -C_a M^{-1}K & -C_a M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$D_c = C_a M^{-1}B_c$$

El sistema observado finalmente está compuesto de dos ecuaciones continuas en el tiempo:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c u(t) \\ y(t) &= C_c x(t) + D_c u(t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Reconociendo que la señal utilizada se puede expresar en el espacio temporal discreto:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= A \cdot x_k + B \cdot u_k \\y_k &= C \cdot x_k + D \cdot u_k\end{aligned}\tag{2.15}$$

Las matrices continuas se relacionan con sus contrapartes discretas de la siguiente forma (Peeters, 2000):

$$\begin{aligned}A &= e^{A_c \cdot \Delta t} \\B &= (A - I) \cdot A_c^{-1} \cdot B_c \\C &= C_c \\D &= D_c\end{aligned}\tag{2.16}$$

Los vectores propios discretos son iguales a los continuos y los valores propios discretos se relacionan como se muestra a continuación:

$$\mu_i = e^{\lambda_i \Delta t} \Rightarrow \lambda_i = \frac{\mu_i}{\Delta t}\tag{2.17}$$

Para el caso no amortiguado se tiene que:

$$\omega_i = \frac{|\ln(\mu_i)|}{\Delta t}\tag{2.18}$$

$$\text{Real}(\lambda_1) = -\beta_i \cdot \omega_i\tag{2.19}$$

Cuando se realizan mediciones experimentales están siempre presentes señales que excitan la estructura que se pueden suponer de un carácter aleatorio. De igual forma las señales registradas también presentan un cierto nivel de ruido. En consecuencia, la ecuación en espacio estado discreto correspondiente a un sistema de medición se pueden expresar como:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= A \cdot x_k + B \cdot u_k + w_k \\y_k &= C \cdot x_k + D \cdot u_k + v_k\end{aligned}\tag{2.20}$$

Donde, w_k se refiere a ruido de las señales de entrada medidas y asociado al efecto de acciones aleatorias que afectan a la estructura y que no son medidas; v_k se refiere a ruido en las señales de las mediciones.

De esta forma cuando existen acciones no estacionarias que son registradas y existen mediciones en la estructura (SSI), se identifican las matrices de estado discretas (A , B , C y D) realizando un problema de minimización de error entre el

modelo espacio-estado discreto y las mediciones. Es decir, se supone y se minimiza las funciones de error suponiendo ruidos aleatorios (con media cero) w_k y v_k . Cuando existen acciones que son no-estacionarias el método se denomina DSI (Deterministic Stochastic Identification).

Por otro lado, cuando la estructura no tiene una acción no-estacionaria que sea registrada y se supone que la estructura está excitada sólo por acciones de una característica aleatoria, se tendrá:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= A \cdot x_k + w_k \\y_k &= C \cdot x_k + v_k\end{aligned}\tag{2.21}$$

El método SSI identifica las matrices espacio-estado (A y C) basándose en avanzadas técnicas numéricas. Una vez que se identifican las matrices espacio-estado se utilizan las ecuaciones (2.17) y (2.18) para estimar las frecuencias modales, la ecuación (2.19) para las razones de amortiguamientos y se introduce la ecuación (2.22) (Peeters, 2000), que define las formas modales por medio de las matrices V y Ψ , esta última corresponde a la matriz de vectores propios de la matriz de estado A .

$$V = C \cdot \Psi\tag{2.22}$$

Cabe mencionar que el vector de estado (x_k) tendrá el doble de los GDL de libertad o modos preponderantes que se suponga tenga la estructura. En este contexto, a priori no se conoce cuantos modos son dominantes en el movimiento. Por cuanto se realiza una estimación de las matrices de estado considerando que el modelo espacio-estado se describe por un número creciente de modos. En este contexto, si se suponen un número mayor de modos que los que tiene la estructura se estimarán modos ficticios que no tendrán un gran aporte. En este sentido estos modos artificiales no son necesariamente coherentes en cuanto se consideren modelos de diversos órdenes. Es por ello, que se realizan diagramas de estabilización en cual se comparan las propiedades dinámicas obtenidas para modelos espacio-estados discretos de diversos órdenes. De esta forma, en la medida que los modos sean coherentes o similares para la gran mayoría de los modelos se podrá concluir que estos son modos fundamentales de la estructura eliminando los modos artificiales.

Para que se considere una propiedad dinámica estable, esta debe cumplir con cierto criterio de similitud, en el cual se compara la propiedad identificada para modelos definidos por N GDL (o $2N$ ordenes, asociado al hecho que existen el doble de modos en espacio-estado) con el modelo que suponga $N+1$ GDL (asociado a un

orden $(2 * (N+1))$. El algoritmo utilizado para identificar las matrices de espacio-estado y las propiedades dinámicas de estructuras se resume en el siguiente diagrama de flujo del método SSI y resumen del método DSI.

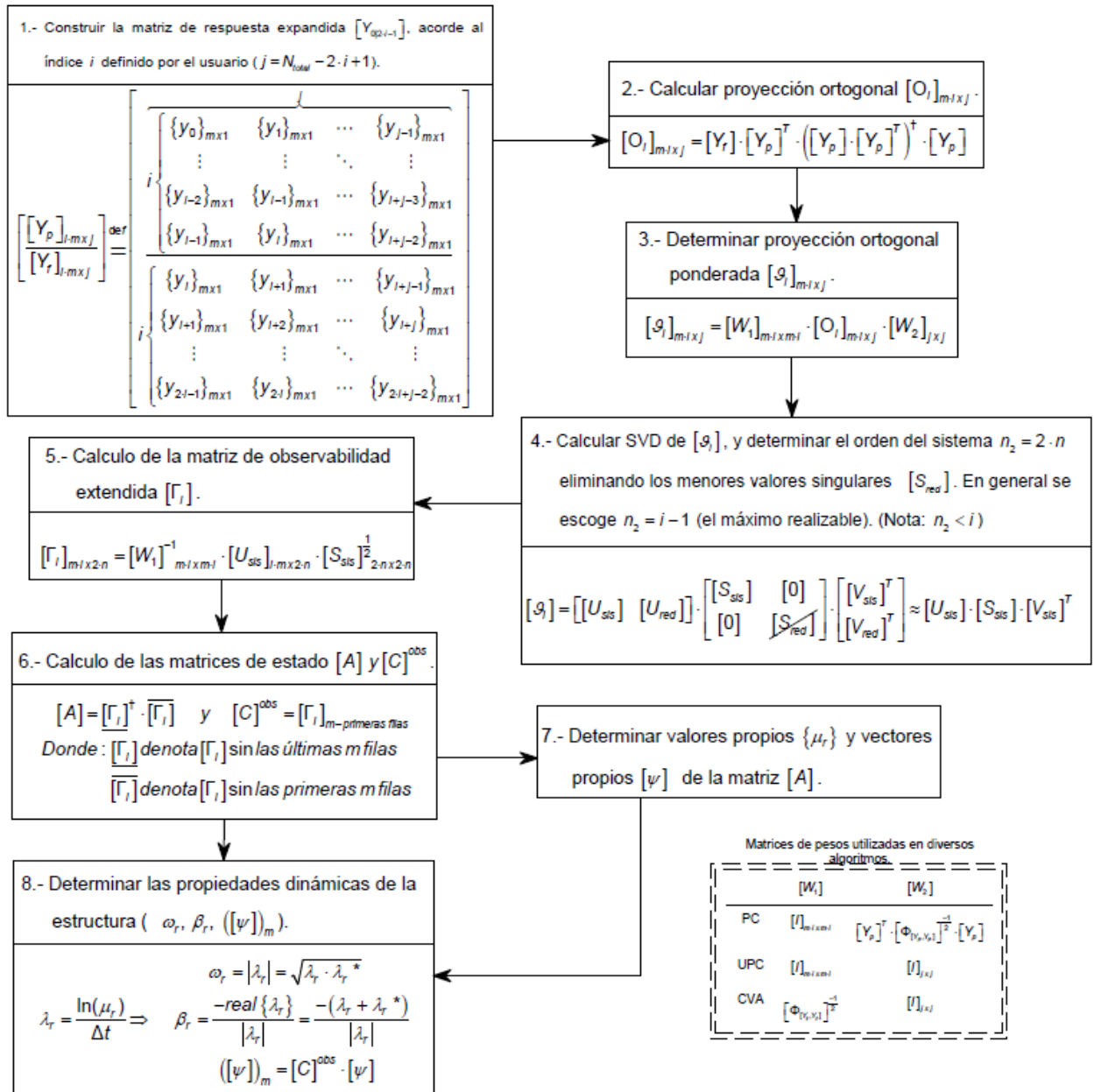


Figura 2-26: Diagrama de flujo del método de identificación SSI (Hernández, 2009)

<p>1. Definir Matrices de Hankel del Sistema:</p> $\mathbf{U}_{0:(2l-1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{0:l-1} \\ \mathbf{U}_{l:(2l-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{U}_f \end{pmatrix} \quad ; \quad \mathbf{Y}_{0:(2l-1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{0:l-1} \\ \mathbf{Y}_{l:(2l-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_p \\ \mathbf{Y}_f \end{pmatrix}$
<p>2. Calcular las proyecciones:</p> $\mathbf{O}_l = \mathbf{Y}_f /_{\mathbf{U}_f} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{Y}_p \end{pmatrix} \quad ; \quad \mathbf{O}_{l+1} = \mathbf{Y}_f^- /_{\mathbf{U}_f^-} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_p^+ \\ \mathbf{Y}_p^+ \end{pmatrix}$
<p>3. Calcular el orden del sistema mediante la descomposición de valores singulares:</p> $\mathbf{W}_1 \mathbf{O}_l \mathbf{W}_2 = (\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2) \begin{pmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{pmatrix} = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1^T$ <p>$\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$: Matrices de peso</p>
<p>4. Calcular las matrices de observabilidad extendida Γ_l y Γ_{l-1} :</p> $\Gamma_l = \mathbf{W}_1^{-1} \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2}$ <p>Γ_{l-1} es definido por Γ_l sin las últimas l filas</p>
<p>5. Determinar los valores de $\tilde{\mathbf{X}}_l$ y $\tilde{\mathbf{X}}_{l+1}$:</p> $\tilde{\mathbf{X}}_l = \Gamma_l^\dagger \mathbf{O}_l \quad ; \quad \tilde{\mathbf{X}}_{l+1} = \Gamma_{l-1}^\dagger \mathbf{O}_{l+1}$
<p>6. Resolver el sistema de ecuaciones lineales para $\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{C}_d$ and \mathbf{D}_d:</p> $\begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_{l+1} \\ \mathbf{Y}_{l:l} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{C}_d & \mathbf{D}_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_l \\ \mathbf{U}_{l:l} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \rho_w \\ \rho_v \end{pmatrix}$
<p>7. Calcular los valores propios μ y vectores propios (Ψ) de la matriz \mathbf{A}_d.</p>
<p>8. Determinar las propiedades dinámicas:</p> $f_r = \frac{\sqrt{\lambda_r \lambda_r^*}}{2\pi}$ $\xi_r = \frac{-\text{Re}(\lambda_r)}{ \lambda_r }$ $\Phi = \mathbf{C}_d \Psi$ <p>Con</p> $\lambda_r = \frac{\ln(\mu_r)}{\Delta t}$

Figura 2-27: Resumen del método DSI (Astroza, Erahimian, Conte, Restrepo, & Hutchinson, 2015)

De esta forma se definen los siguientes criterios de similitud:

$$\frac{f^{(p)} - f^{(p-1)}}{f^{(p)}} \leq tol \quad (2.23)$$

$$\frac{\beta^{(p)} - \beta^{(p-1)}}{\beta^{(p)}} \leq tol \quad (2.24)$$

$$100\% \cdot (1 - MAC(\phi_p, \phi_{p-1})) \leq tol \quad (2.25)$$

$$MAC(\phi_p, \phi_{p-1}) = \frac{|\phi_p^T \cdot \phi_{p-1}|^2}{(\phi_p^T \cdot \phi_p) \cdot (\phi_{p-1}^T \cdot \phi_{p-1})} \quad (2.26)$$

Para cada uno de los criterios de similitud, varía la tolerancia de parentesco dependiendo si los registros son asociados a micro vibraciones ambientales o eventos sísmicos. Según los criterios de similitud, se generan diagramas de estabilidad (Figura 2-28) los cuales evalúan la estabilidad de las frecuencias naturales del sistema, amortiguamiento del sistema y formas modales del sistema al variar el orden del modelo espacio-estado (i.e., el número de GDL que se consideran modelan al sistema). Estos diagramas presentan dos tipos de coincidencias en su gráfica, las cuales son:

- Criterio 1 o de triple semejanza (\oplus): se cumple cuando la frecuencia, forma modal y amortiguamiento entre el orden n y el orden subsiguiente, cumplen los criterios de similitud.
- Criterio 2 (Δ): se cumple cuando la frecuencia y las formas modales entre el orden n y el subsiguiente, cumplen los criterios de similitud.

Además, se entrega una tabla de interpretación del diagrama de estabilidad (Figura 2-28), la cual contiene la frecuencia identificada (f), la razón de amortiguamiento (β) y la desviación estándar de la frecuencia o razón de amortiguamiento (σ), según un número de apariciones en el diagrama que es especificado previamente (N en la tabla).

Para este trabajo se utilizan las rutinas de MATLAB dispuesta por Van Overschee & De Moor (1996), las cuales tienen la ventaja de procesar los resultados en forma más expedita que la función N4SID disponible en MATLAB, obteniendo resultados comparables.

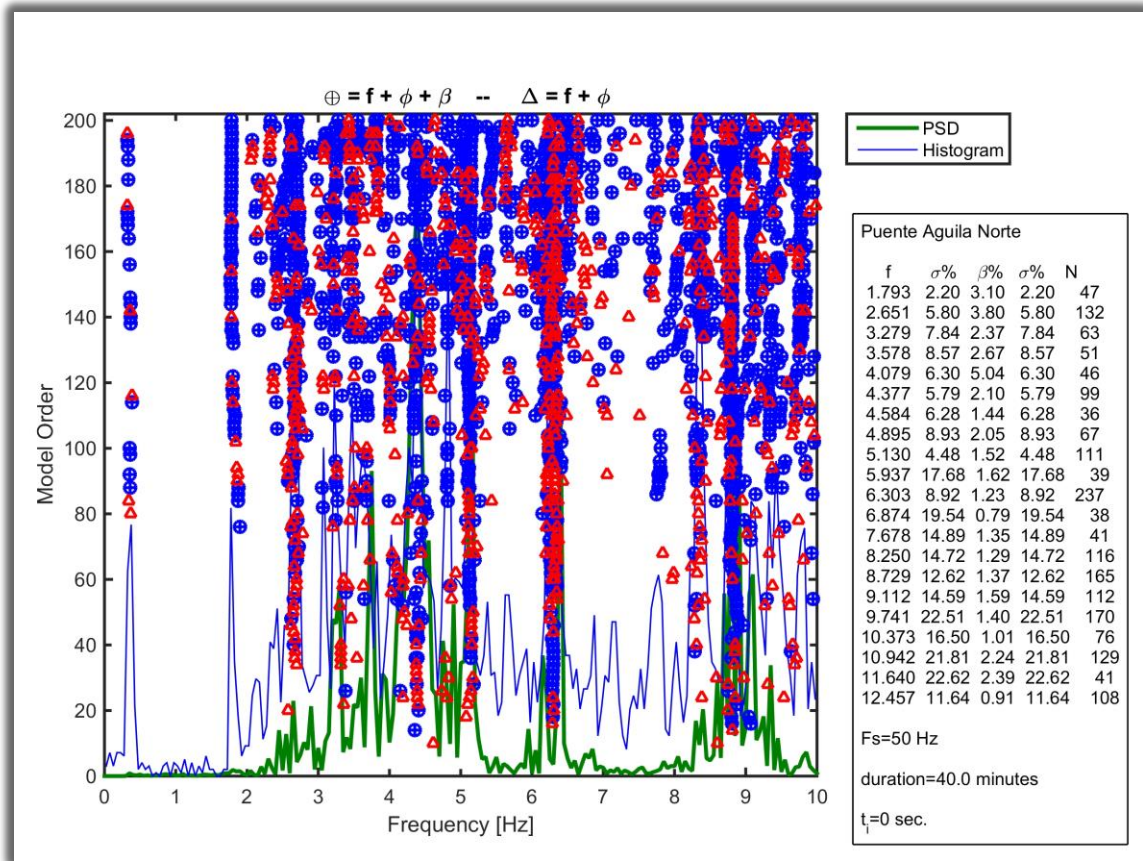


Figura 2-28: Ejemplo diagrama de estabilidad y tabla resumen asociada.

2.4.4 Método de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo.

El método de identificación de propiedades dinámicas DSI, no considera la degradación de la estructura durante el periodo en que analiza la relación entre señales de entrada y salida, esta condición representa una desventaja al analizar estructuras que incurren en un comportamiento no lineal, como lo son las estructuras que poseen un sistema de aislación sísmica.

“El viaducto El Salto es una estructura aislada sísmicamente en la cual se ha observado un fuerte comportamiento no lineal en su dirección longitudinal que puede ser debido a la restricción parcial en los estribos, además cuando no hay vehículos transitando en la superestructura, la frecuencia natural longitudinal se identifica en 2.1 [Hz], y cuando hay vehículos circulando la frecuencia se identifica en 1.8 [Hz]. La masa de los vehículos no parece ser la causa del cambio de frecuencia, ya que este

efecto se ha observado en registros sísmicos cuando no hay movimiento de vehículos” (Boroschek, Ofelia, & Sarrazín, 2003).

En el trabajo de Boroschek et al (2003) se deja ver el comportamiento no lineal del viaducto El Salto, lo cual indicaría que el método de identificación DSI, al no considerar la degradación de la estructura, entregaría un resultado no tan cercano a la realidad debido a que el método intenta incorporar la variación de propiedades sin estar programado para ello, lo que haría necesario implementar un método que considere el cambio de las propiedades dinámicas.

El método DSI por pequeñas ventanas de tiempo es un método que permite analizar la variación de la frecuencia en el tiempo (Figura 2-29). Es decir, el método DSI por pequeñas ventanas supone una estructura elástica lineal por pequeñas ventanas donde se identifican sus propiedades dinámicas. Como el análisis se realiza para diversas ventanas de tiempo, se puede evaluar la evolución temporal de las propiedades dinámicas. Para lo cual se define un número de ventanas de tiempo en que se divide el registro, de tal forma que se realice el método de identificación DSI en cada una de las ventanas, para luego contrastar las ventanas mediante los criterios de similitud de frecuencias (ecuación (2.23)), MAC (ecuación (2.26)) y súper MAC (ecuación (2.26)).

Para definir el largo de la ventana a considerar, se utiliza la siguiente formula (Astroza, Gutiérrez, Repennin, & Hernandez, 2018):

$$j = s - 2 \cdot i + 1 > 2 \cdot l + m \cdot i \quad (2.27)$$

$$2 \cdot l \cdot i > n \quad (2.28)$$

$$s_{\min} > 2 \cdot (l + m) \cdot i + 2 \cdot i - 1 \quad (2.29)$$

$$T_v = s_{\min} \cdot F_s \quad (2.30)$$

Donde:

s : Número de datos asociados a la identificación o largo de la ventana de tiempo.

j : Número de columnas escogido para construir una matriz expandida.

i : Números de bloques fila o números de retardo.

l : Número de outputs para cada instante de tiempo.

m : Número de inputs para cada instante de tiempo.

n : Orden del sistema.

F_s : Frecuencia de Muestreo.

T_v : Tamaño de la ventana.

Según lo establecido por Arrochas (2018), es posible que la ventana sea de una gran amplitud si se tienen numerosos outputs e inputs, lo cual provocaría que se dificulte la detección de la variación de energía si el cambio de propiedades es abrupto dentro de la ventana. Esto podría ser solucionado realizando un re-muestreo de las señales a una frecuencia de muestreo mayor, permitiendo controlar el tamaño de la ventana según lo desee el usuario.

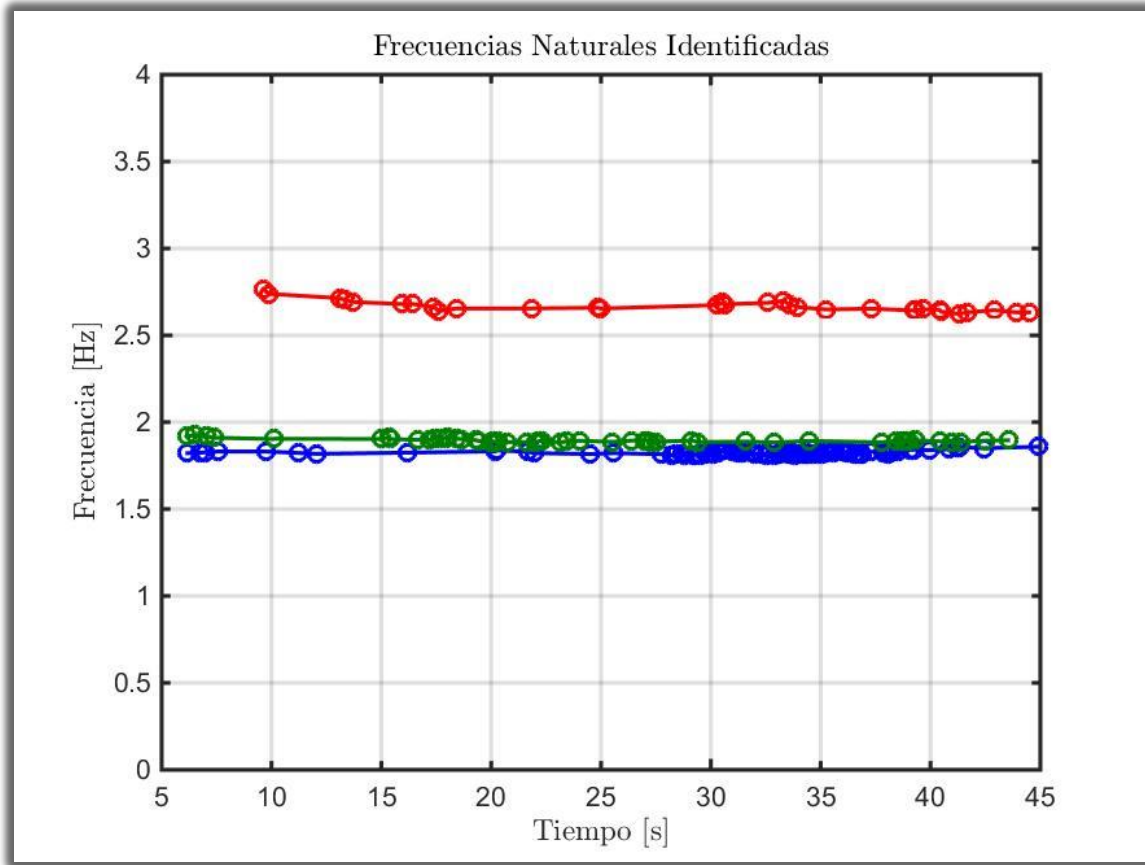


Figura 2-29: Ejemplo de la identificación de la variación de frecuencia por el método DSI por pequeñas ventanas. Resultado obtenido para el viaducto El Salto en el terremoto del Maule de 2010.

Capítulo 3

Campañas de medición del puente Águila Norte

Dentro de los hitos del proyecto FONDEF ID18I10103 “Bases y recomendaciones para complementar el análisis sísmico de puentes viales del Manual de Carreteras”, se encuentra la identificación de las propiedades dinámicas del caso de estudio seleccionado, el puente Águila Norte. Con el fin de realizar la identificación de propiedades de la estructura, se requiere realizar mediciones de micro vibraciones ambientales sobre el puente Águila Norte. Estas mediciones se realizan a través de tres campañas llevadas a cabo por académicos, funcionarios y estudiantes de la Universidad de Chile, en conjunto con la autorización y ayuda del Ministerio de obras públicas (MOP).

La primera campaña se realiza en enero de 2019, con el fin identificar propiedades generales de la estructura, como las frecuencias y modos fundamentales en la dirección transversal, longitudinal y vertical de la estructura, además de obtener los primeros indicios del comportamiento de un puente compuesto por vigas independientes entre vano.

La segunda campaña fue realizada en junio del 2019, la cual se enfocó en analizar la respuesta vertical de la estructura, buscando confirmar comportamientos observados en el análisis de los resultados de la primera campaña de mediciones. Dentro de estos comportamientos, se encuentra el movimiento individual de cada uno de los vanos, focalizando el estudio en identificar las frecuencias características asociados a este movimiento independiente. Además, se busca confirmar posibles efectos de torsión a través del eje longitudinal (warping) observados en el comportamiento vertical de la estructura.

La tercera campaña se lleva a cabo en julio del 2019, buscado identificar las frecuencias características de las cepas del puente, para lo cual el departamento de ingeniería civil de la Universidad de Chile, junto a la colaboración del MOP, realiza las gestiones para el uso de un camión de inspección de puentes, con el cual se hace posible posicionar sensores en la viga de coronamiento de las cepas, pudiendo obtener registros del movimiento de estas sujetas a vibraciones debido a tráfico vehicular y otros efectos ambientales.

En el presente capítulo se detalla la metodología llevada a cabo en las mediciones realizadas en el puente Águila Norte, detallando las características de los equipos utilizados para medir en terreno y la ubicación de los acelerómetros durante las diferentes campañas de medición.

3.1 Equipos utilizados

Los instrumentos utilizados para estas mediciones fueron acelerómetros de fuerza balanceada uniaxiales EpiSensor ES-U2 de Kinemetrics (Figura 3-2), un sistema de adquisición de datos y filtrador de señales DAQBOOK/2005 multicanal de conversión analógica digital, y un computador portátil. Todo lo anterior perteneciente al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Los acelerómetros Episensor ES-U2 son de características “unlock” configurados para medir aceleraciones horizontales o verticales $\pm 0.5g$ con salida “single” $\pm 2.5V$ y de sensibilidad variable (Tabla 3-1), compatibles con el sistema de adquisición de datos que se emplee.

El sistema de adquisición de datos DAQBOOK/2005 (Figura 3-1) es un sistema con interfaz Ethernet, convertidor A/D de 16 bits a 200KHz, con 16 entradas de terminal común u 8 diferenciales (expandibles hasta 256 con los módulos DBK), 40 entradas/salidas digitales, 4 salidas analógicas de 100KHz de frecuencia a 16 bits (LOGICBUS, s.f.). El sistema fue configurado para contar con un amplificador de Ganancia $\times 10$ durante las mediciones. Adicionalmente, el sistema de adquisición posee un filtro pasa bajos analógico (a través de una tarjeta de expansión) a 100 Hz. El sistema de adquisición fue conectado a un computador con un software apropiado y compatible con el sistema de adquisición (Daqview), que le permite muestrear los acelerómetros a una tasa de muestreo de 500 Hz de manera que los datos adquiridos estén sincronizados y en un formato ASCII o *.mat (archivo de texto o para ser leído en MATLAB) con al menos 8 decimales. El sistema tiene una autonomía eléctrica

que le permite realizar las mediciones sin alimentación externa a través de dos baterías de autos y un convertor de voltaje.

Además de los equipos intrínsecos utilizados para captar el registro de micro vibraciones del puente, el ministerio de obras públicas puso a disposición el uso del camión de inspección de puentes (Figura 3-3), el cual, mediante un sistema de grúa permite acercarse a las cepas del puente por debajo del tablero.

Tabla 3-1: Sensibilidad de sensores

Sensor	Número de serie	Sensibilidad (V/g)
1	4636	4.9978
2	4645	5.0007
3	4646	5.0021
4	4635	4.9939
5	4639	4.9999
6	4641	5.0038
7	4648	4.9897
8	4638	5.0035
9	4643	4.9905
10	4642	5.0071
11	4644	5.0053
12	4637	4.9932



Figura 3-1: Equipo DAQBOOK/2005 utilizado en las mediciones



Figura 3-2: Acelerómetros utilizados durante la campaña de enero de 2019



Figura 3-3 Camión de inspección utilizado para la instalación de sensores en las cepas

3.2 Primera campaña de mediciones

En una primera instancia, se realiza una campaña de mediciones en enero del 2019, en esta campaña se concretan 4 mediciones de micro vibraciones ambientales, en adición a una calibración inicial de los equipos.

Cada una de las mediciones se configuró con una diferente ubicación de los equipos en la estructura, denominándose a las mediciones como Águila 0 (medición de calibración), Águila 1, Águila2, Águila 3 y Águila 4. A continuación, se profundiza en las diferentes disposiciones y características de las mediciones.

Medición Águila 0

A medida de calibración de los equipos, se realiza la medición de denominación Águila 0, ubicando diez sensores en el centro del vano central, de los cuales cinco sensores se posicionan para medir en la dirección vertical, y otros 5 sensores para registrar datos en la dirección longitudinal (Figura 3-4).

Tabla 3-2: Datos medición Águila 0

Tiempo de medición	5 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

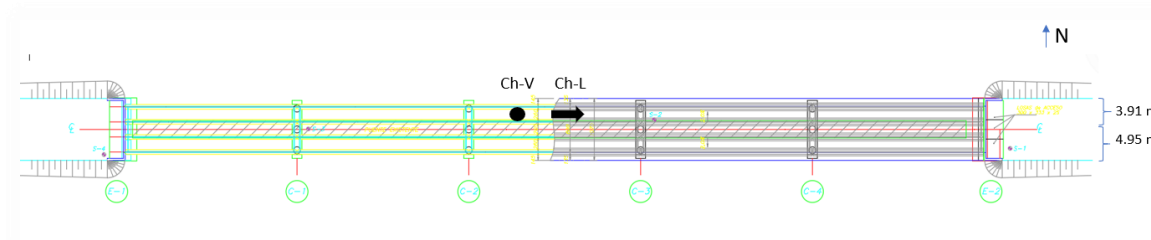


Figura 3-4: Medición de calibración Águila 0

Medición Águila 1

La medición de denominación águila 1, se configura posicionando un sensor ubicado en el centro de cada vano registrando vibraciones en la dirección vertical (Figura 3-5), y un sensor por vano registrando en la dirección transversal (Figura 3-6).

Tabla 3-3: Datos medición Águila 1

Tiempo de medición	40 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

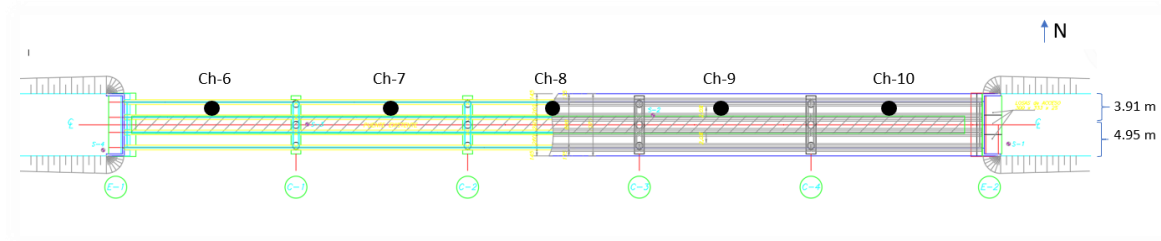


Figura 3-5: Disposición en dirección vertical y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 1

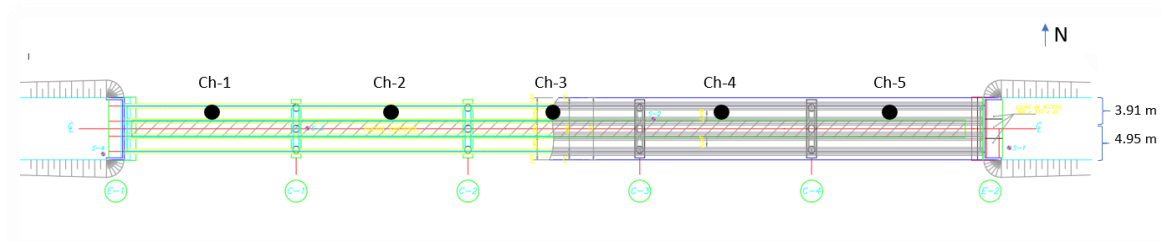


Figura 3-6: Disposición en dirección transversal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 1

Medición Águila 2

La medición de denominación águila 2, se configura con el fin de identificar las propiedades dinámicas del vano 1 del puente, por lo que se ubican 8 sensores en el primer vano y 3 sensores en el vano central, lo que se puede apreciar en la Figura 3-7, Figura 3-8 y Figura 3-9. Se debe señalar para posicionar los canales 4, 5 y 10 se debió pasar los cables de los acelerómetros manualmente por debajo del puente (por ello se midió exclusivamente el primer vano).

Tabla 3-4: Datos medición Águila 2

Tiempo de medición	40 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

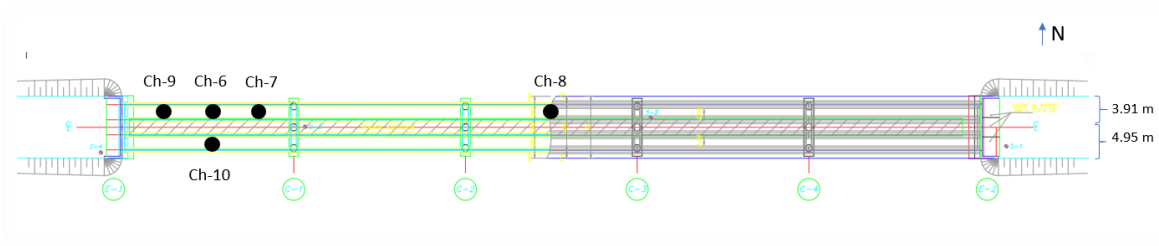


Figura 3-7: Disposición en dirección vertical y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 2

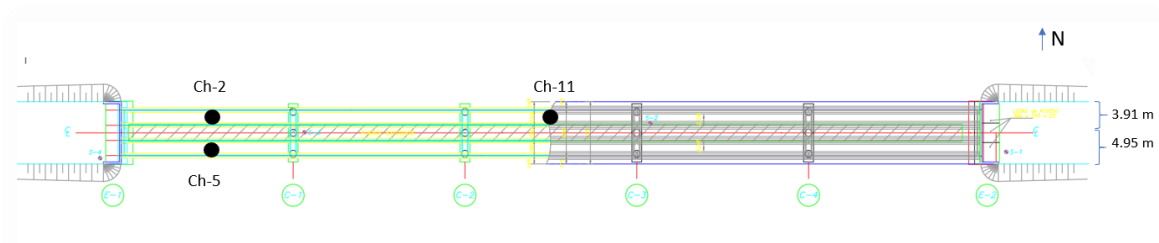


Figura 3-8: Disposición en dirección longitudinal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 2

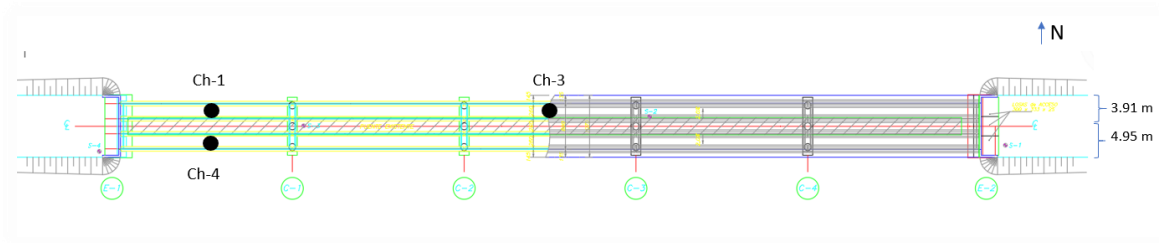


Figura 3-9: Disposición en dirección transversal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 2

Medición Águila 3

La medición de denominación águila 3, se configura con el fin de identificar las propiedades dinámicas del vano 1 del puente y su estribo, por lo que se colocan 6 sensores en el primer vano, 4 sensores en el estribo y un sensor en el vano central. Disposiciones que se muestran en la Figura 3-10, Figura 3-11 y Figura 3-12.

Tabla 3-5: Datos medición Águila 3

Tiempo de medición	20 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

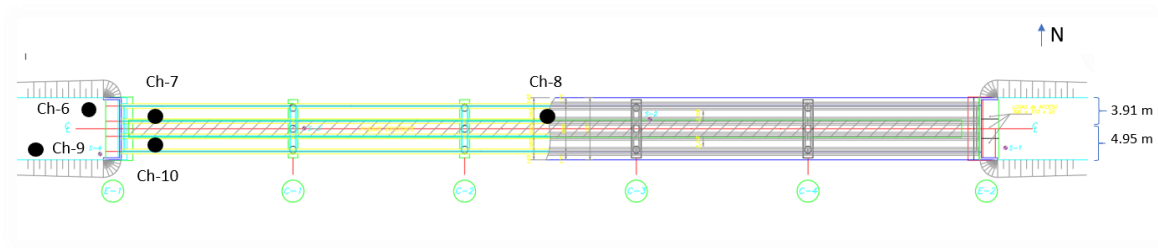


Figura 3-10: Disposición en dirección vertical y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 3

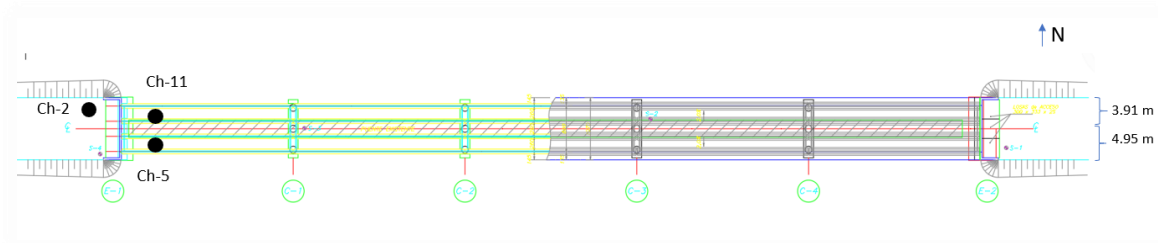


Figura 3-11: Disposición en dirección longitudinal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 3

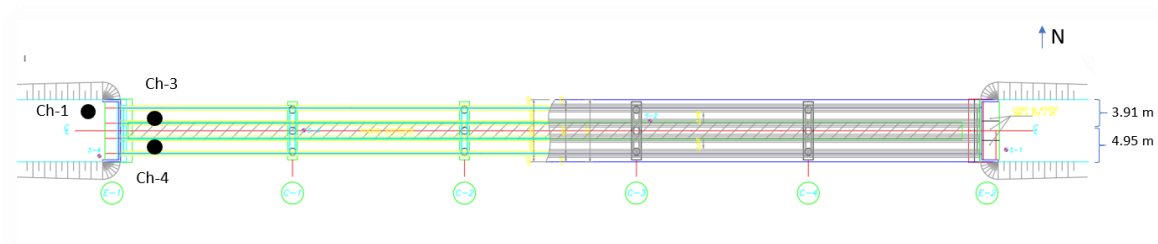


Figura 3-12: Disposición en dirección transversal y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 3

Medición Águila 4

La medición de denominación águila 4, se configura con el objetivo de medir la respuesta vertical de la estructura, por lo que se colocan los 11 sensores a lo largo del puente orientados para catastrar en la dirección vertical (Figura 3-13). Se observa que en esta oportunidad el departamento de Obras de la Universidad Federico Santa María también posiciono un sistema de geófonos para medir la respuesta vertical del puente. En este contexto esta medición pretendía ser una medición comparativa. Sin embargo los datos de los geófonos resultaron infructuosos.

Tabla 3-6: Datos medición Águila 4

Tiempo de medición	20 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

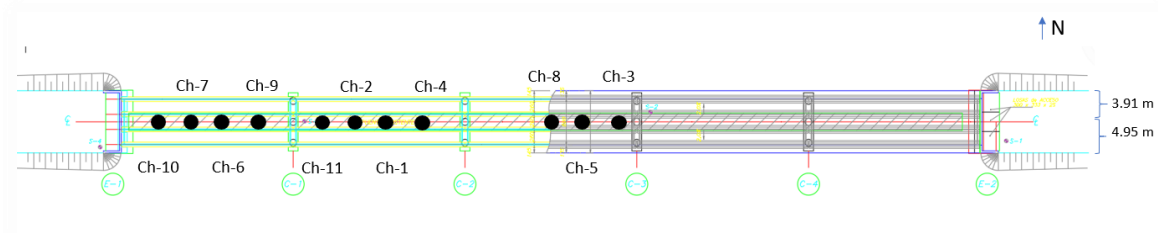


Figura 3-13: Disposición en dirección vertical y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 4

3.3 Segunda campaña de mediciones

A modo de complemento de los registros de micro vibraciones obtenidos en enero del 2019, se realiza una segunda campaña en mayo de 2019, en la cual se realizan 5 registros de micro vibraciones ambientales, en adición a una calibración inicial de los equipos.

Cada una de las mediciones se configura con una diferente disposición de los equipos en la estructura, denominándose a las mediciones como Águila 5 (medición de calibración), Águila 6, Águila7, Águila 8, Águila 10 y Águila 11. A continuación, se profundiza en las diferentes disposiciones y características de las mediciones.

Medición Águila 5

La medida de calibración de los equipos, se realiza la medición de denominación Águila 5, ubicando once sensores en el centro del vano central (Figura 3-14), orientándolos para registrar datos en la dirección vertical.

Tabla 3-7: Datos medición Águila 5

Tiempo de medición	5 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

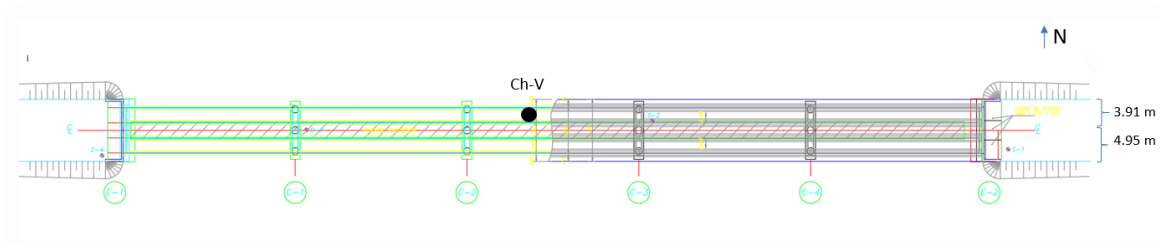


Figura 3-14: Medición de calibración Águila 5

Medición Águila 6

La medición de denominación águila 6, se configura con el afán de obtener datos sobre la respuesta vertical de la estructura, en particular del vano 1, por lo que se orientan la totalidad de los equipos para medir en la dirección vertical. En esta medición se disponen seis sensores en el vano 1, un sensor en el vano 2, un sensor en el vano 4, un sensor en el vano 5 y dos sensores en el vano central (Figura 3-15).

Tabla 3-8: Datos medición Águila 6

Tiempo de medición	30 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

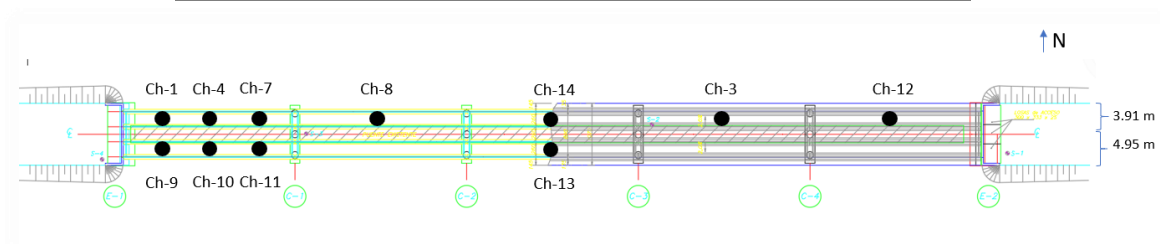


Figura 3-15: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 6

Medición Águila 7

La medición se realiza con el objetivo de obtener datos sobre la respuesta vertical de la estructura, en particular del vano 2, por lo que se orientan la totalidad de los equipos para medir en la dirección vertical. Esta medición se configura con seis sensores en el vano 2, un sensor en el vano 1, un sensor en el vano 4, un sensor en el vano 5 y dos sensores en el vano central (Figura 3-16).

Tabla 3-9: Datos medición Águila 7

Tiempo de medición	30 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

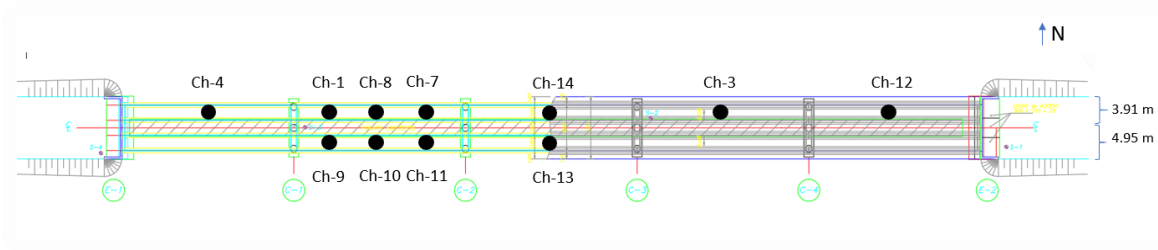


Figura 3-16: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 7

Medición Águila 8

La medición se dispone con el fin de obtener datos sobre la respuesta vertical de la estructura, en particular del vano 3, por lo que se orientan la totalidad de los equipos para medir en la dirección vertical. En esta medición se disponen seis sensores en el vano 3, un sensor en el vano 1, un sensor en el vano 4, un sensor en el vano 5 y dos sensores en el 2 (Figura 3-17).

Tabla 3-10: Datos medición Águila 8

Tiempo de medición	30 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

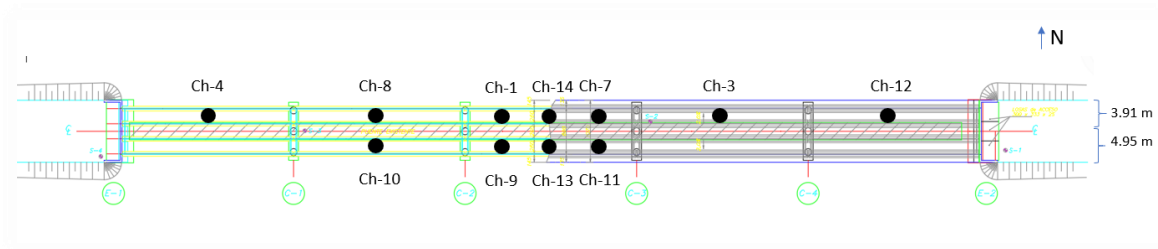


Figura 3-17: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 8

Medición Águila 10

La medición de denominación águila10, se configura con el objetivo de obtener datos sobre la respuesta vertical de la estructura, en particular del vano 4, por lo que se orientan la totalidad de los equipos para medir en la dirección vertical. En esta medición se ubican seis sensores en el vano 4, un sensor en el vano 1, un sensor en el vano 2, un sensor en el vano 5 y dos sensores en el vano central (Figura 3-18).

Tabla 3-11: Datos medición Águila 10

Tiempo de medición	30 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

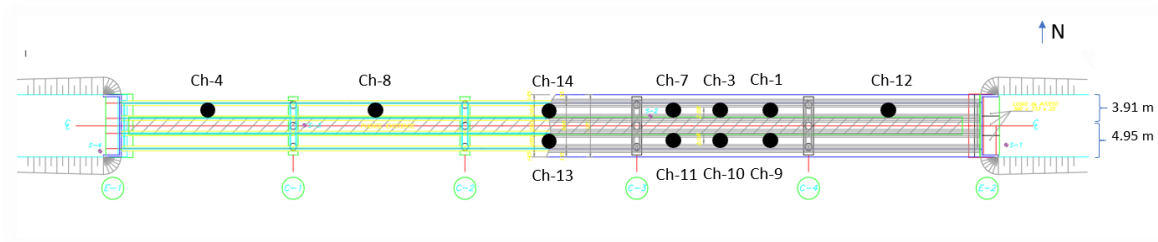


Figura 3-18: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 10

Medición Águila 11

La medición se configura con la intención de obtener datos sobre la respuesta vertical de la estructura, en particular del vano 5, por lo que se orientan la totalidad de los equipos para medir en la dirección vertical. Esta medición se configura ubicando seis sensores en el vano 5, un sensor en el vano 1, un sensor en el vano 2, un sensor en el vano 4 y dos sensores en el vano central (Figura 3-19).

Tabla 3-12: Datos medición Águila 11

Tiempo de medición	30 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

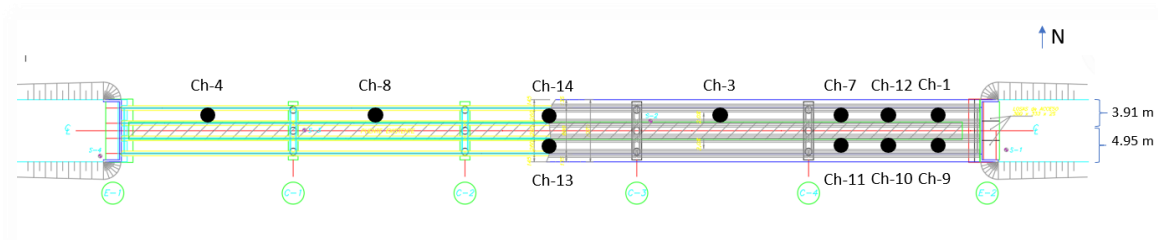


Figura 3-19: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 11

3.4 Tercera campaña de mediciones

Finalmente, se realiza una última campaña de medición de registros de micro vibraciones ambientales durante julio del 2019, a lo largo de esta medición se realizan 3 registros de micro vibraciones ambientales, en adición a una calibración inicial de los equipos.

Cada una de las mediciones se configura con una diferente disposición de los equipos a lo largo de la estructura, denominándose a las mediciones como Águila 12 (medición de calibración), Águila 13, Águila 14 y Águila 15. A continuación, se profundiza en las diferentes disposiciones y características de las mediciones.

Medición Águila 12

La medición de denominación Águila 12, se realiza a modo de calibración y prueba de los equipos a utilizar durante las mediciones Águila 13, 14 y 15. Para esto se posicionan en el centro del puente sobre el tablero, 9 acelerógrafos configurados para registrar vibraciones en la dirección longitudinal y 2 acelerógrafos configurados para catastrar desplazamiento en la dirección vertical. La disposición detallada anteriormente se puede apreciar en la Figura 3-20.

Tabla 3-13: Datos medición Águila 12

Tiempo de medición	5 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

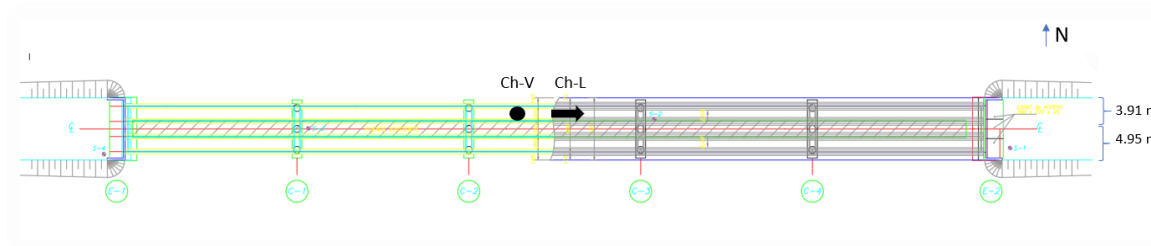


Figura 3-20: Medición de calibración Águila 12

Medición Águila 13

La medición de denominación Águila 13 se centra en analizar los movimientos de la cepa 1, por lo que, con ayuda del camión de inspección, se ubican 3 sensores en la viga de coronamiento de la cepa 1, posicionando en los extremos de la viga los acelerógrafos configurados para registrar desplazamientos en la dirección longitudinal, y colocando en el centro de la viga el sensor configurado para catastrar en la dirección transversal. La disposición detallada anteriormente se puede apreciar en la Figura 3-21 y Figura 3-22.

Tabla 3-14: Datos medición Águila 13

Tiempo de medición	15 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

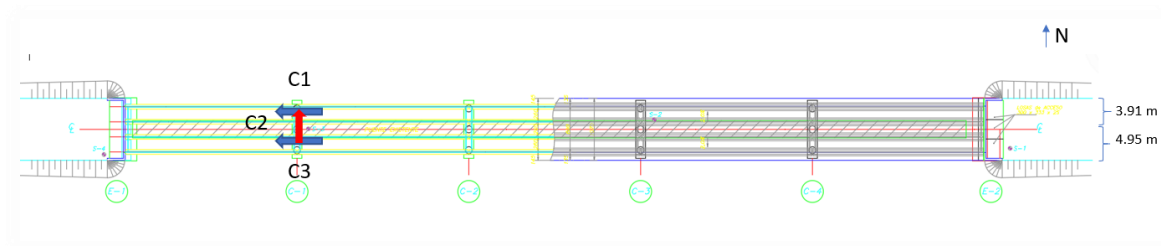


Figura 3-21: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 13

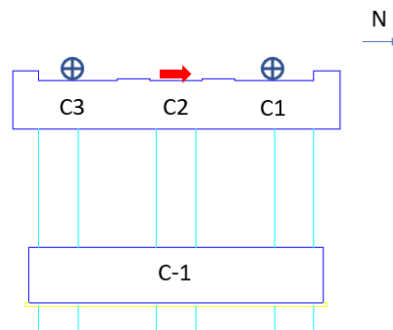


Figura 3-22: Ubicación de los sensores sobre la viga de coronamiento, en la medición Águila 13

Medición Águila 14

La medición de denominación Águila 14, se centra en analizar los movimientos de la cepa 1 en conjunción con la cepa 2, para cumplir el objetivo anterior, se registran vibraciones con las disposición de equipos utilizada en la medición Águila 13, agregando a esta 3 equipos, los que se posicionan en la viga de coronamiento de la cepa 2, posicionando en los extremos de la viga los acelerógrafos configurados para registrar desplazamientos en la dirección longitudinal, y colocando en el centro de la viga el sensor configurado para catastrar en la dirección transversal. La disposición detallada anteriormente se puede apreciar en la Figura 3-23 y Figura 3-24.

Tabla 3-15: Datos medición Águila 14

Tiempo de medición	15 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

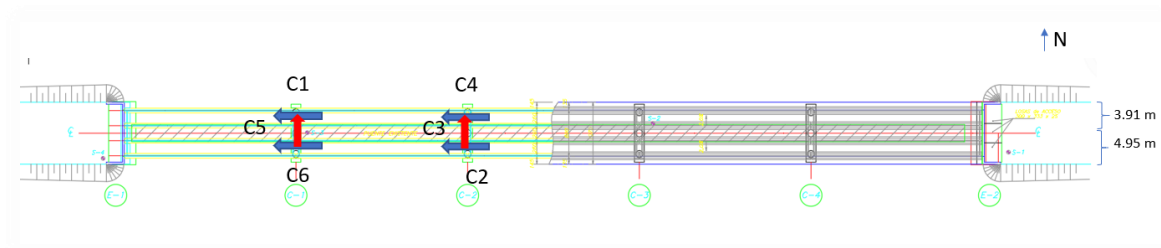


Figura 3-23: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 14

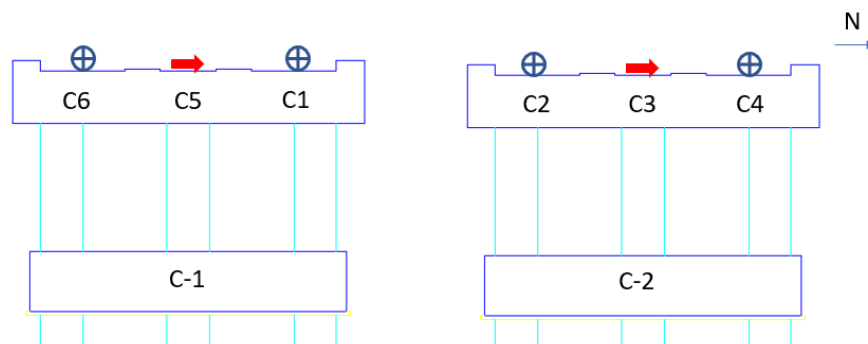


Figura 3-24: Ubicación de los sensores sobre las vigas de coronamiento, en la medición Águila 14

Medición Águila 15

La medición de denominación Águila 15, se centra en analizar los movimientos de la cepa 1, 2 y 3 como conjunto, para poder realizar el análisis anterior, se catastran micro vibraciones ambientales con las disposición de equipos utilizada en la medición Águila 14, agregando a esta 3 sensores, los que se posicionan en la viga de coronamiento de la cepa 3, ubicando en los extremos de la viga los acelerógrafos configurados para registrar desplazamientos en la dirección longitudinal, y colocando en el centro de la viga el sensor configurado para catastrar en la dirección transversal. La disposición detallada anteriormente se puede apreciar en la Figura 3-25 y Figura 3-26.

Tabla 3-16: Datos medición Águila 15

Tiempo de medición	40 min
Frecuencia de muestreo	500 Hz

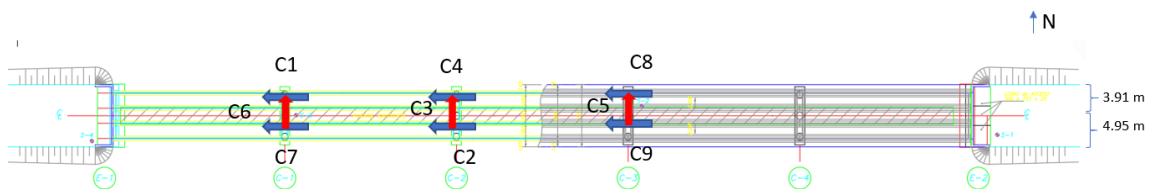


Figura 3-25: Disposición y respectiva numeración de los equipos de la medición Águila 15

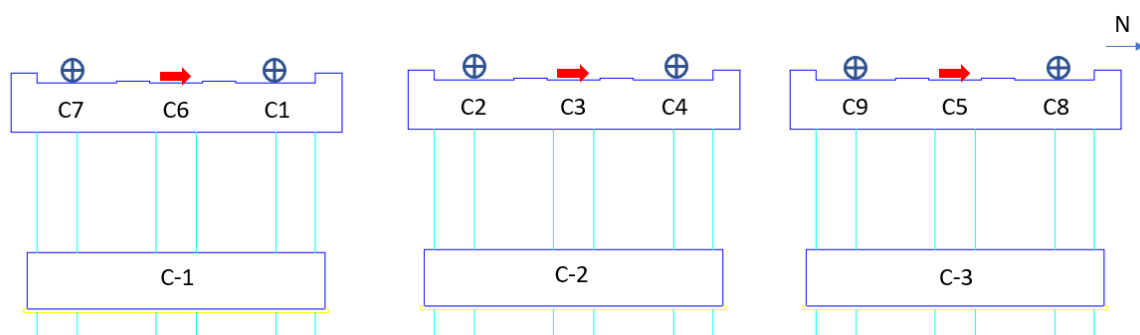


Figura 3-26: Ubicación de los sensores sobre las vigas de coronamiento, en la medición Águila 15

Capítulo 4

Resultados campañas de mediciones puente Águila Norte

4.1 Calibración de las mediciones

Se analizan los registros de las mediciones de calibración, filtrando la señal entre 0.3 y 10 [Hz], mediante un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto del tipo “Butterworth” de orden 8, para luego mediante el método de análisis de frecuencias, obtener el espectro de densidad de potencia y función de coherencia entre canales, utilizando ventanas del tipo “Hanning” de 10 [s] de duración, de las mediciones Águila 0 (Figura 4-1 y Figura 4-3), Águila 5 (Figura 4-4) y Águila 12 (Figura 4-2 y Figura 4-5).

Mediante el contraste de las mediciones de calibración llevadas a cabo a lo largo de las 3 campañas de medición, se observa que existe una repetitividad entre las frecuencias fundamentales verticales identificadas en las mediciones Águila 0, Águila 5 y Águila 12 (Tabla 4-1), y las frecuencias fundamentales longitudinales identificadas en las mediciones Águila 0 y Águila 12 (Tabla 4-2).

Vale recalcar que los resultados de la medición de calibración correspondiente a la tercera campaña de mediciones (Águila 12), entrega frecuencias fundamentales un poco mayores a las registradas por sus contrapartes en las primeras dos mediciones, lo que puede atribuirse a las bajas temperaturas al momento de realizar la calibración, a pesar de esto, las diferencias mostradas se consideran leves y dentro del rango de variación aceptable.

Tabla 4-1: Frecuencias verticales identificadas durante las calibraciones (vano central)

Frecuencias identificadas Águila 0 [Hz]	Frecuencias identificadas Águila 5 [Hz]	Frecuencias identificadas Águila 12 [Hz]
3.82	3.87	4.02
4.30	4.23	4.52
4.92	4.97	5.04

Tabla 4-2: Frecuencias longitudinales identificadas durante las calibraciones

Frecuencias identificadas Águila 0 [Hz]	Frecuencias identificadas Águila 12 [Hz]
1.95	2.43
3.85	4.05
4.3	4.52
4.92	5.07

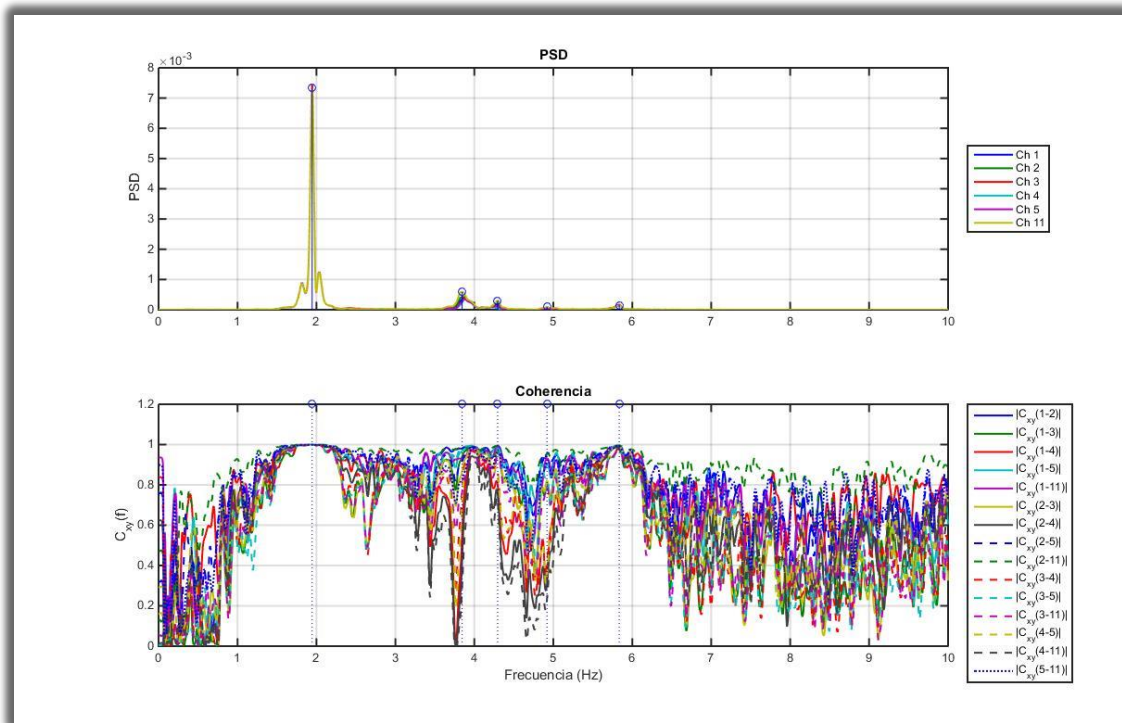


Figura 4-1: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 0, en la dirección longitudinal

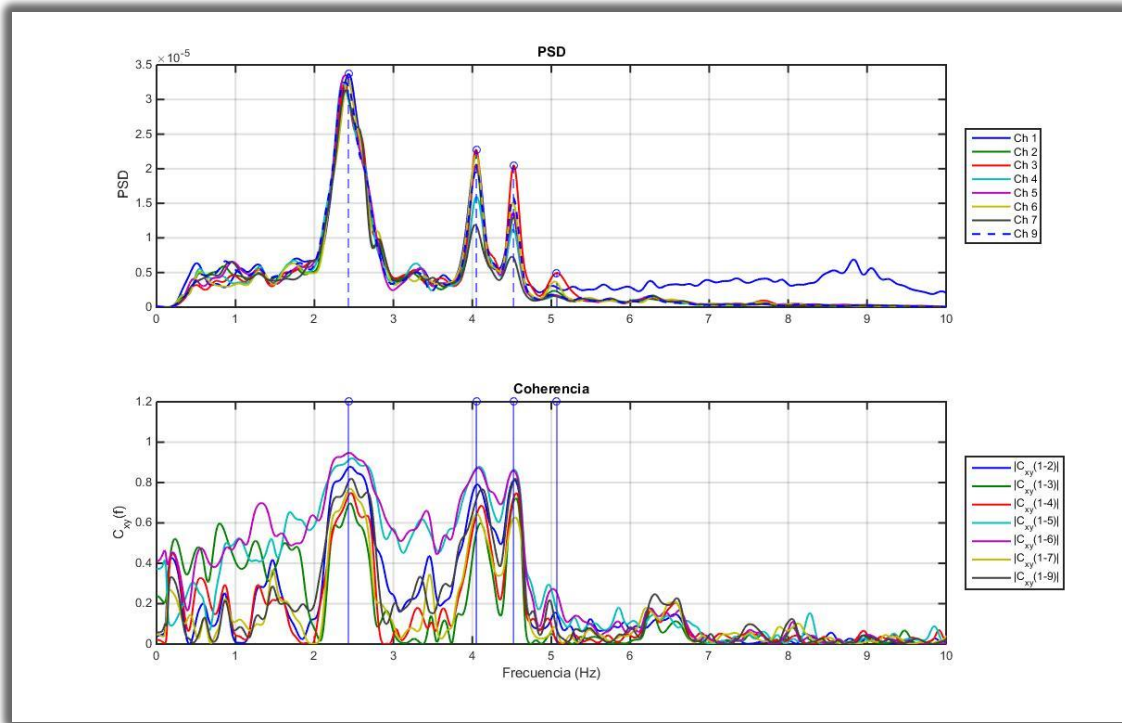


Figura 4-2: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 12, en la dirección longitudinal

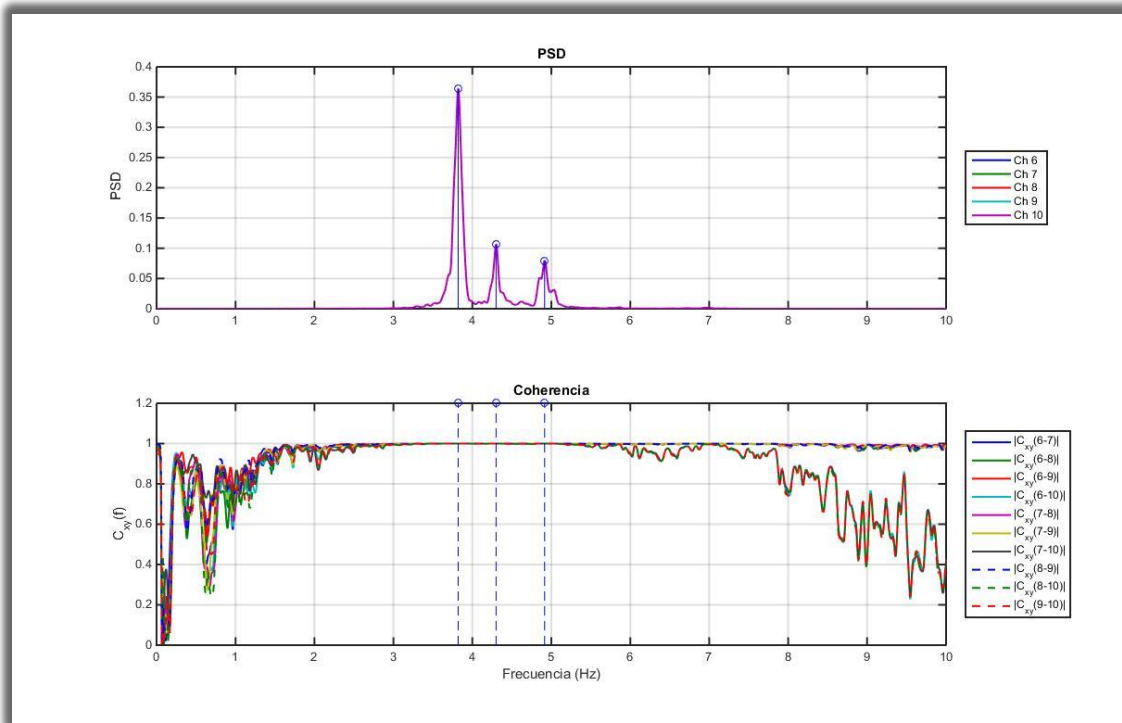


Figura 4-3: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 0, en la dirección vertical

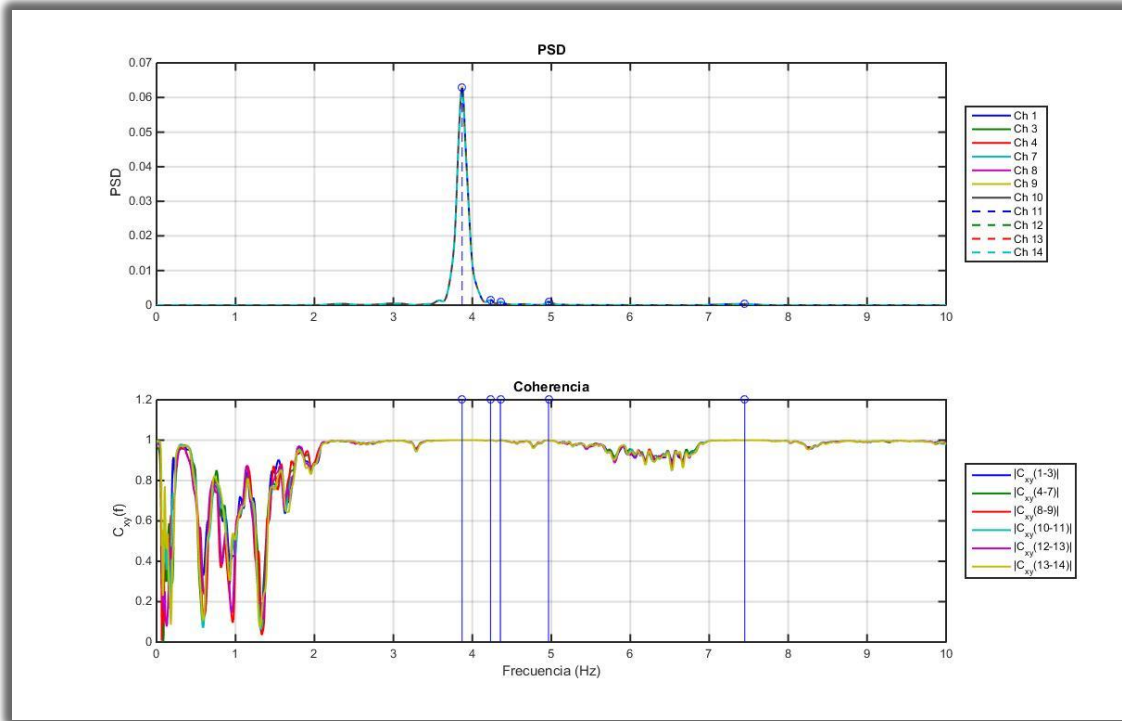


Figura 4-4: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 5

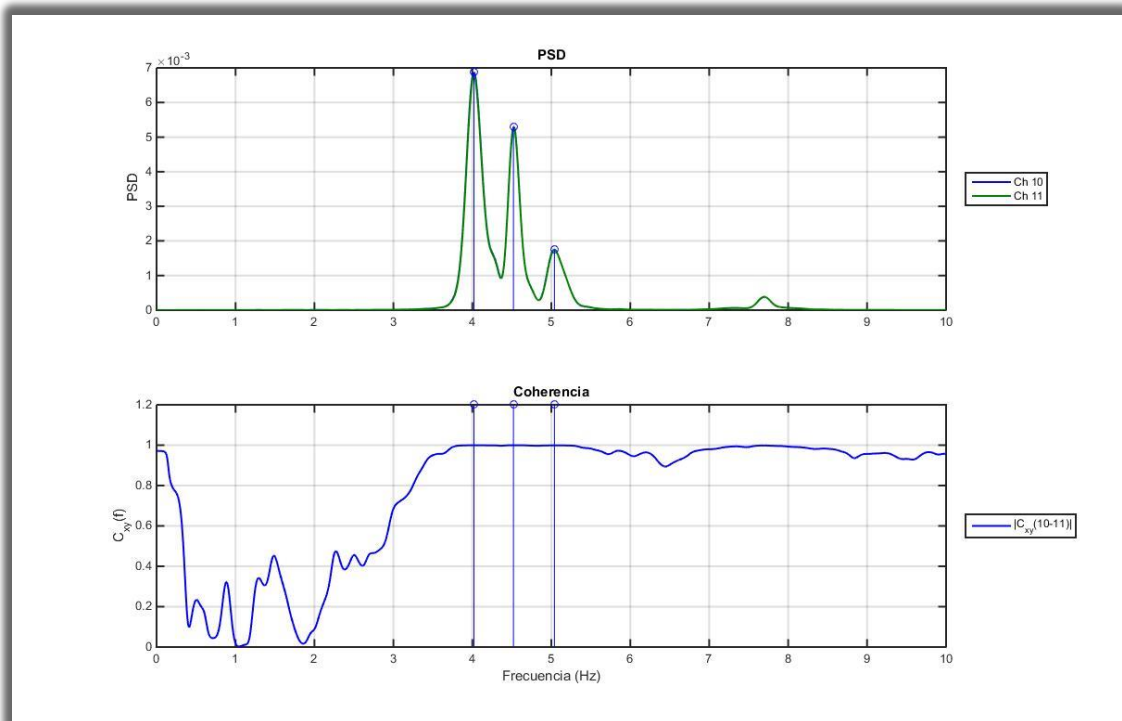


Figura 4-5: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 12, en la dirección vertical

4.2 Resultados primera campaña de mediciones

En la campaña de medición realizada en enero del 2019, se obtienen registros del comportamiento transversal, longitudinal y vertical del puente, los cuales se analizan filtrando los registros entre 0.3 y 10 [Hz], mediante un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto del tipo “Butterworth” de orden 8. Asimismo, para calcular los espectros de densidad de potencia y función coherencia, se utilizan ventanas del tipo “Hanning” de 10 [s] de duración. A continuación, se entregan los resultados desagregados según dirección de comportamiento estructural.

4.2.1 Resultados comportamiento longitudinal

Durante la primera campaña de mediciones, se realizan dos mediciones de micro vibraciones ambientales (Águila 2 y Águila 3), con acelerógrafos orientados y dispuestos para registrar movimientos en la dirección longitudinal. Ambas mediciones muestran resultados similares, por lo que a continuación, se entregan los espectros de potencia, función de coherencia, método del subespacio estocástico (SSI) y formas modales calculadas a partir de los datos recopilados de la medición Águila 2, agregando en el Anexo A los resultados de la medición Águila 3, en la subsección Respuesta longitudinal de la primera campaña de mediciones

Se correlacionan las frecuencias identificadas por el método de análisis de frecuencias (Figura 4-8) y en el método del subespacio estocástico (Figura 4-7), distinguiendo 5 puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia (Tabla 4-3), que corresponden a frecuencias identificadas en la estructura, de las cuales se verifica la globalidad de la frecuencia mediante la función coherencia.

Tres frecuencias identificadas mediante el método de análisis de frecuencias se replican en el método SSI. Vale recalcar que se aprecian un mayor número de frecuencias en el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, las cuales pueden deberse a modos secundarios o elementos que estén vibrando en la estructura, es por esto por lo que se contrastan ambos métodos. Se observa un modo fundamental de 1.98 Hz relacionado al movimiento del tablero, el cual aparentemente es no-lineal, efecto que se puede atribuir al tráfico vehicular y la respuesta no-lineal de los elastómeros. También se identifican varios modos de alta energía cercanos a los 3.9 Hz, que se corresponden con las respuestas locales de las cepas.

Tabla 4-3: Frecuencias identificadas en la medición Águila 2, dirección longitudinal

Frecuencia identificada PSD [Hz]	Frecuencia identificada SSI [Hz]	Coherencia
1.98	1.972	Alta
3.92	3.895	Baja
4.46	-	Baja
4.78	-	Baja
5.69	5.722	Alta

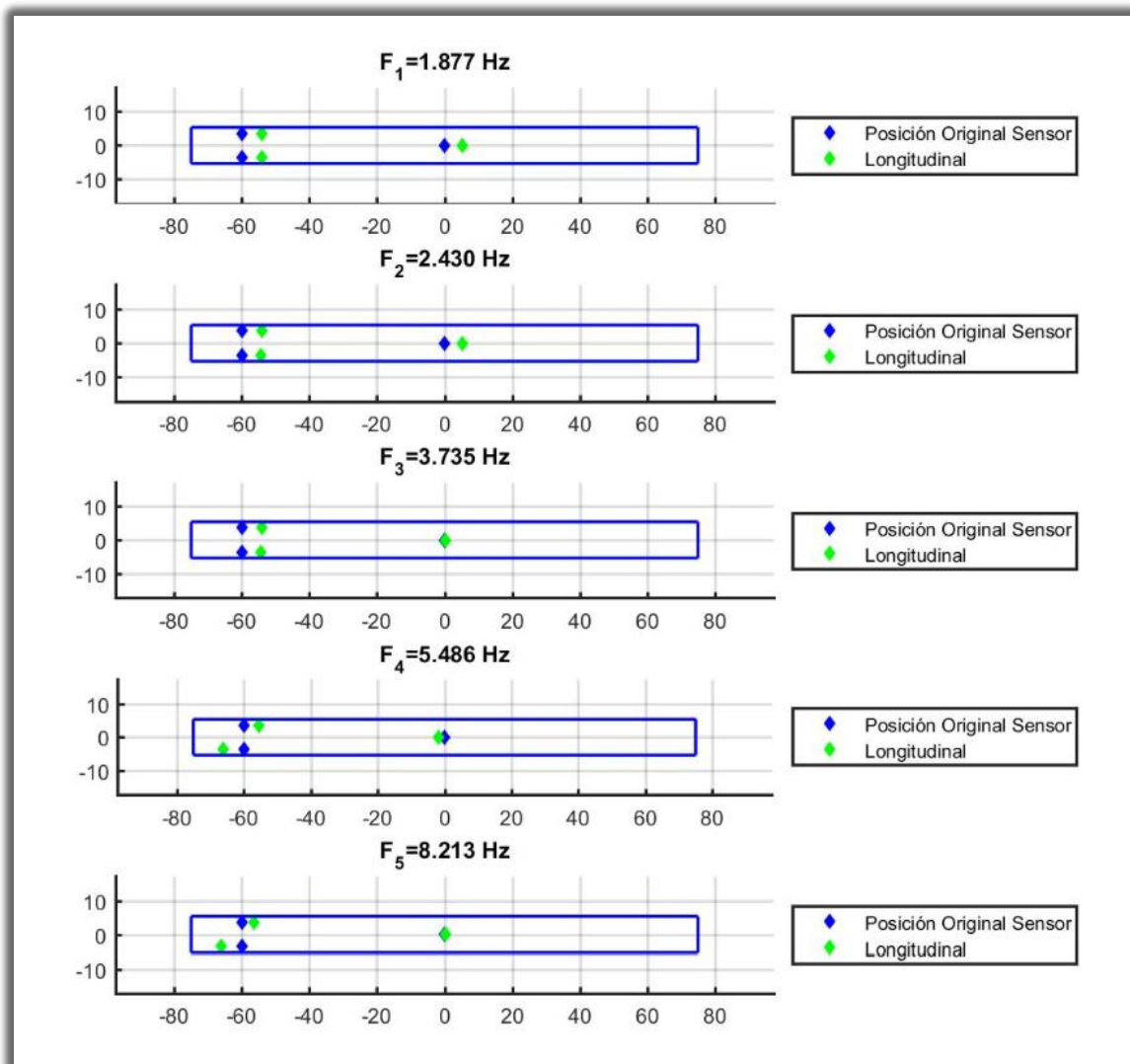


Figura 4-6: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 2, dirección longitudinal

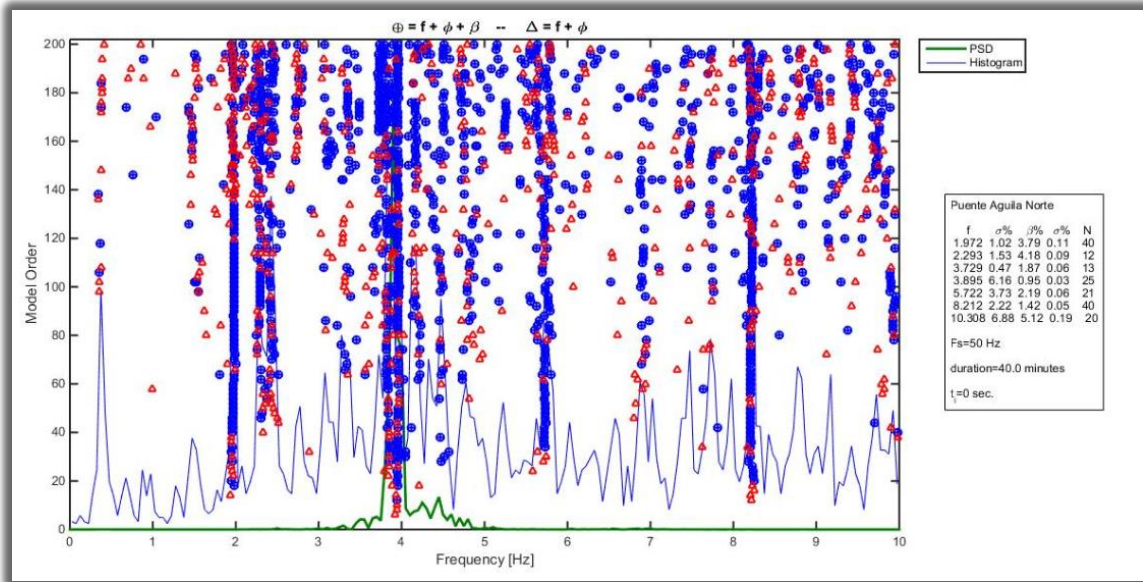


Figura 4-7: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 2, dirección longitudinal

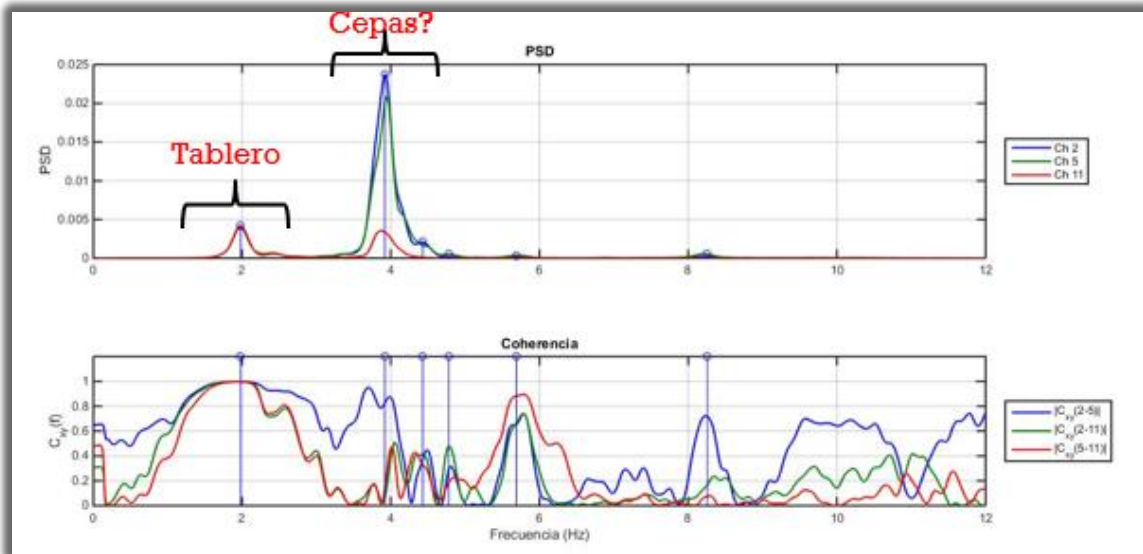


Figura 4-8: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 2, dirección longitudinal

4.2.2 Resultados comportamiento transversal

En conjunto con las mediciones de micro vibraciones ambientales longitudinales, se realizan tres registros (Águila 1, Águila 2 y Águila 3), con equipos configurados para registrar desplazamientos en la dirección transversal del tablero, las tres mediciones muestran resultados similares, por lo que a continuación, se entregan los espectros de potencia, función coherencia, método del subespacio estocástico y formas modales calculadas a partir de los datos recopilados en las mediciones Águila 1, agregando en el Anexo A los resultados de la mediciones Águila 2 y 3, , en la subsección Respuesta transversal de la primera campaña de mediciones.

Se correlacionan las frecuencias identificadas por el método de análisis de frecuencias (Figura 4-9) y en el método del subespacio estocástico (Figura 4-10), distinguiendo 9 puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia, que corresponden a frecuencias identificadas en la estructura, de las cuales se verifica la globalidad de la frecuencia mediante la función coherencia.

Ocho frecuencias identificadas mediante el método de análisis de frecuencias se replican en el método SSI (Tabla 4-4). Vale recalcar que se aprecian un mayor número de frecuencias en el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, las cuales pueden deberse a modos secundarios o elementos que estén vibrando en la estructura, es por esto por lo que se contrastan ambos métodos.

Tabla 4-4: Frecuencias identificadas en la medición Águila 1, dirección transversal

Frecuencia identificada PSD [Hz]	Frecuencia identificada SSI [Hz]	Coherencia
2.4	2.381	Alta
2.75	2.778	Alta
3.35	3.34.	Baja
4.1	4.152	Baja
4.4	4.429	Baja
4.54	-	Baja
4.85	4.885	Alta
5.7	5.768	Alta
8.25	8.277	Baja

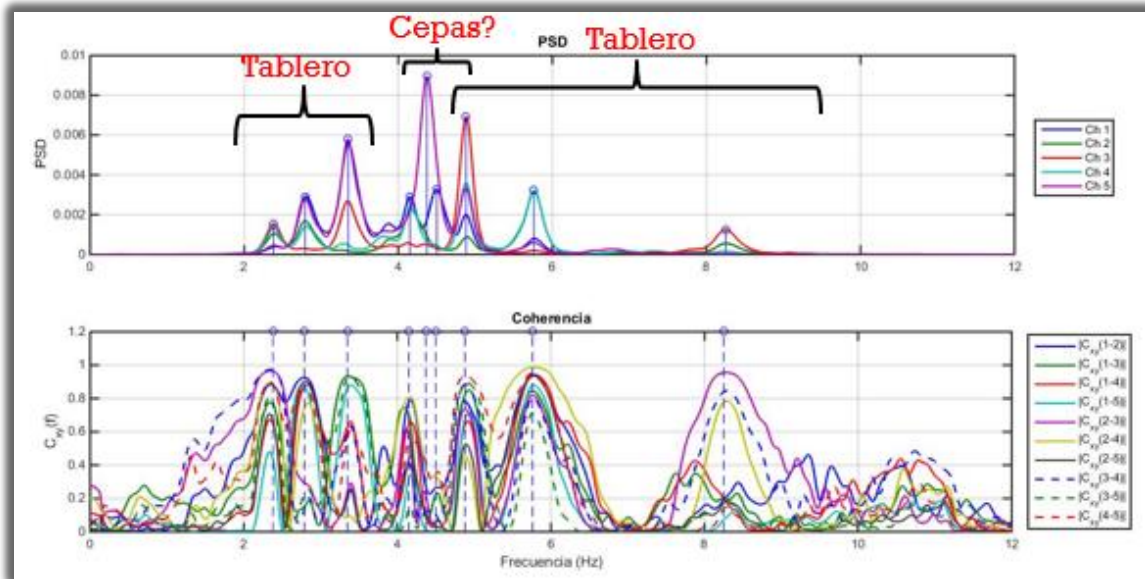


Figura 4-9: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 1, dirección transversal

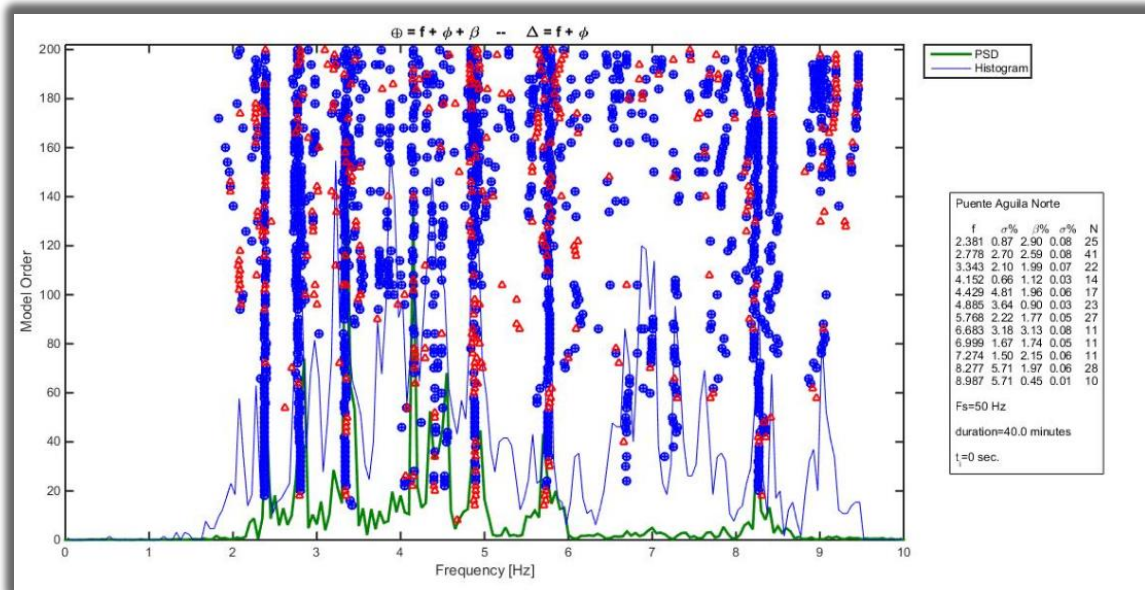


Figura 4-10: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 1, dirección transversal

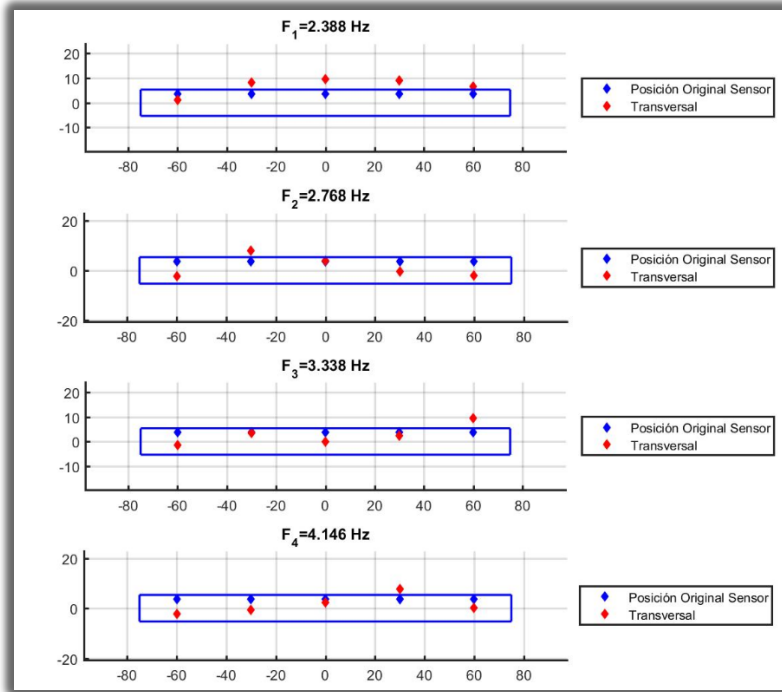


Figura 4-11: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 1, dirección transversal

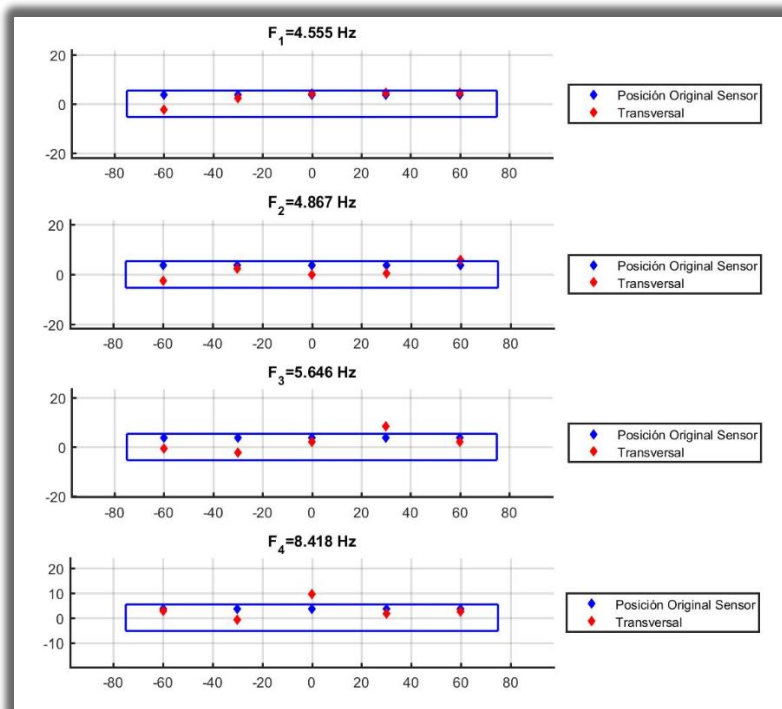


Figura 4-12: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 1, dirección transversal

4.2.3 Resultados comportamiento vertical

Con el afán de observar el comportamiento vertical del puente Águila Norte, se realizan 4 mediciones de micro vibraciones ambientales (Águila 1, Águila 2, Águila 3, y Águila 4), configurando los acelerómetros para medir vibraciones en la dirección vertical. De estos 4 registros, se considera el correspondiente a la medición Águila 1 como el más representativo, agregando el resto de las mediciones en el Anexo A, en la subsección Respuesta vertical de la primera campaña de mediciones.

Se correlacionan las frecuencias identificadas por el método de análisis de frecuencias (Figura 4-13) y en el método del subespacio estocástico (Figura 4-14), distinguiendo 7 puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia, que corresponden a frecuencias identificadas en la estructura, de las cuales se verifica la globalidad de la frecuencia mediante la función coherencia.

5 de las frecuencias identificadas mediante el método de análisis de frecuencias, se replican en el método SSI (Tabla 4-5). Vale recalcar que se aprecian un mayor número de frecuencias en el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, las cuales pueden deberse a modos secundarios o elementos que estén vibrando en la estructura, es por esto por lo que se contrastan ambos métodos.

Los resultados dan indicios que los primeros 3 modos corresponden a modos locales, asociados a frecuencias características de cada vano, por lo que cada vano tendría un movimiento independiente. Además, se observa que la respuesta vertical no tiene una componente asociable a la respuesta vertical de los apoyos elastoméricos.

Tabla 4-5: Frecuencias identificadas en la medición Águila 1, dirección vertical

Frecuencia identificada PSD [Hz]	Frecuencia identificada SSI [Hz]	Coherencia
3.705	-	Baja
3.878	3.839	Baja
3.954	-	Baja
4.294	4.386	Alta
4.928	4.888	Alta
5.934	5.767	Alta
8.176	8.267	Alta

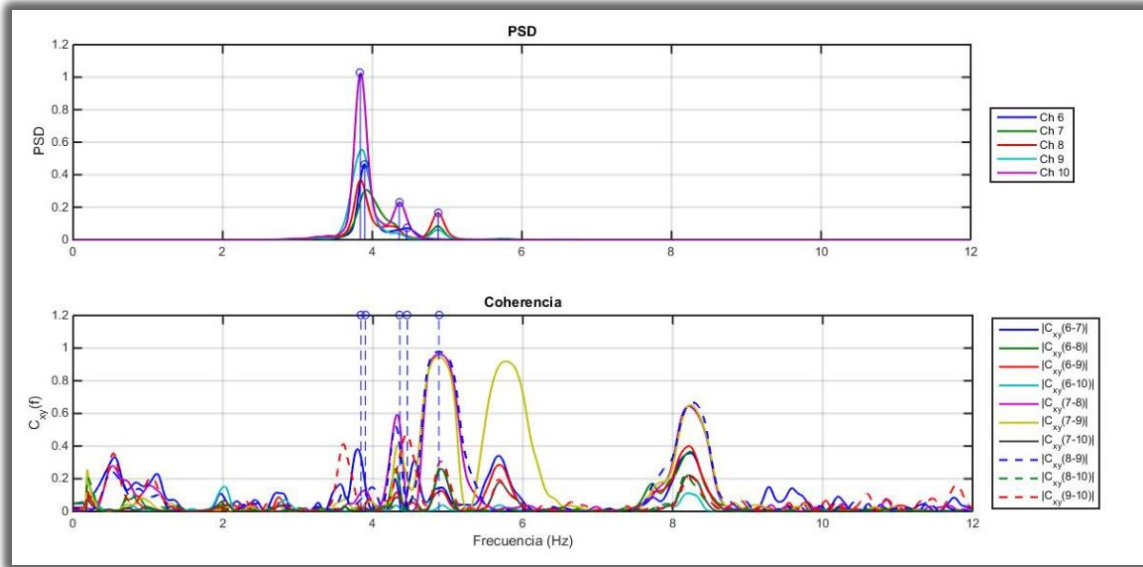


Figura 4-13: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 1, dirección vertical

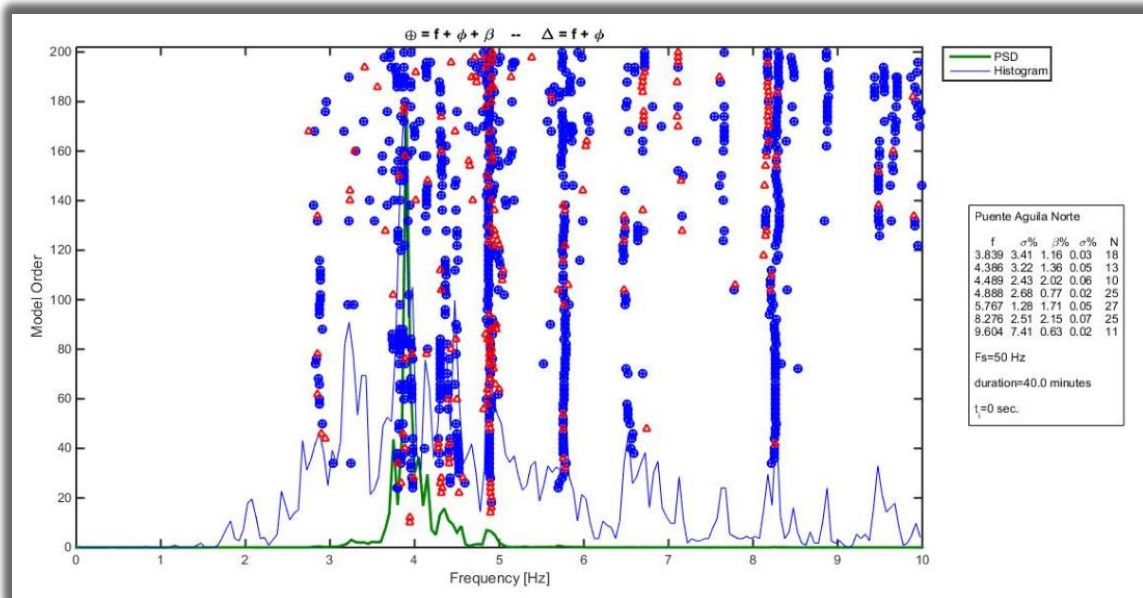


Figura 4-14: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 1, dirección vertical

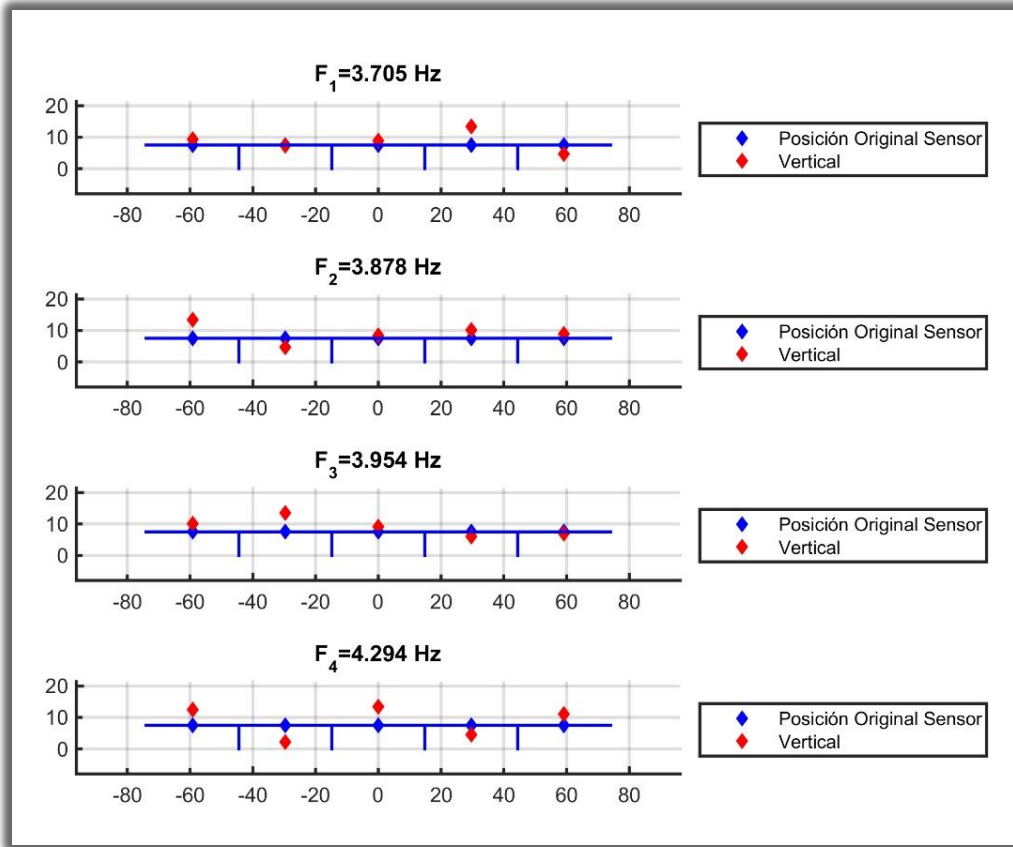


Figura 4-15: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 1, dirección vertical

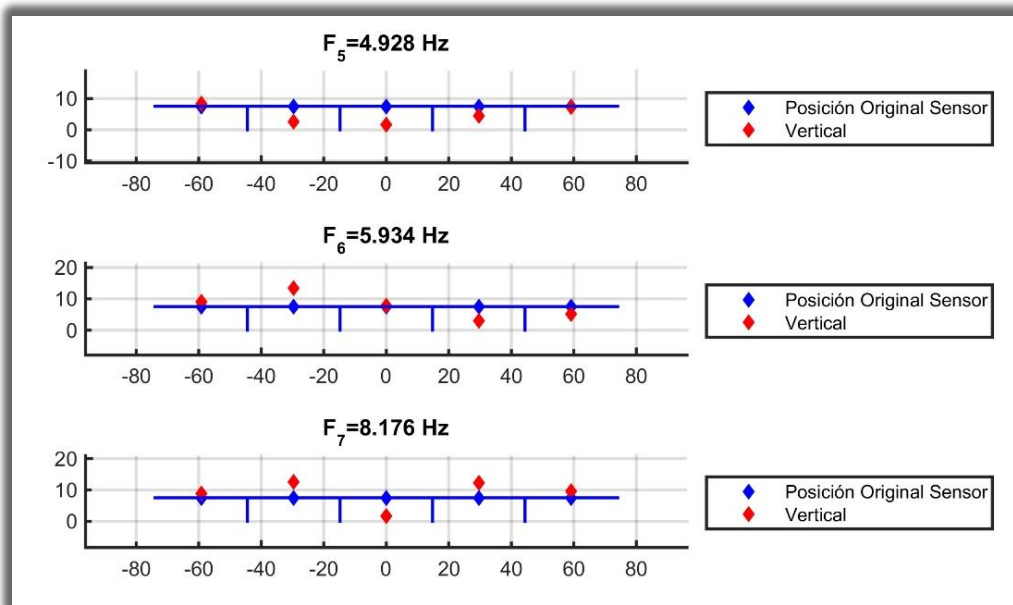


Figura 4-16: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 1, dirección vertical

4.2.4 Propiedades identificadas primera campaña de mediciones

Al analizar los resultados obtenidos en las primeras 4 mediciones, correspondientes a la campaña realizada en enero de 2019, se identifican las siguientes propiedades de la estructura, clasificando la respuesta del puente dependiendo de la dirección de medición.

4.2.4.1 Respuesta Transversal

Al correlacionar los espectros de densidad de potencia y los diagramas de estabilidad, se identifican 9 frecuencias transversalmente (Tabla 4-6), de las cuales se evidencia, en las mediciones águila 2 y águila 3, un movimiento global del tablero, a excepción de la forma modal cercana a 4.555 [Hz], la que se aprecia como un movimiento local asociado a la cepa 1 en los resultados de la medición Águila 1.

Por otra parte, se identifican varios modos de alta energía, cercanos a los 4.1-4.5 Hz, que se corresponderían con las respuestas locales de las cepas. Finalmente, se observa una muy baja (casi nula) energía registrada por los canales ubicados en el estribo, lo que denota el bajo movimiento de estos sensores en relación con los sensores ubicados en el tablero.

Tabla 4-6: Frecuencias transversales identificadas, primera campaña de mediciones

Águila 1[Hz]	Águila 2 [Hz]	Águila 3[Hz]
2.39	2.35	2.44
2.77	2.77	2.83
3.34	3.35	3.42
4.15	4.15	4.18
4.56	4.45	4.49
4.87	-	4.97
5.8	5.8	5.7
6.4	-	-
8.2	8.2	-

4.2.4.2 Respuesta Longitudinal

Al correlacionar los espectros de densidad de potencia y los diagramas de estabilidad, se identifican 5 frecuencias longitudinalmente (Tabla 4-7), de las cuales se observa un modo fundamental en una frecuencia cercana a 1.98 [Hz], la cual se relaciona al movimiento del tablero y, aparentemente es no-lineal, lo que se puede deber al tráfico vehicular que circula habitualmente por el puente y por la respuesta no-lineal de los elastómeros. Por otra parte, se identifican varios modos de alta energía, cercanos a los 3.8-4.2 Hz, que se corresponderían con las respuestas locales de las cepas.

Finalmente, se observa una muy baja (casi nula) energía registrada por los canales ubicados en el estribo, lo que denota el bajo movimiento de estos sensores en relación con los sensores ubicados en el tablero.

Tabla 4-7: Frecuencias longitudinales identificadas, primera campaña de mediciones

Águila 0[Hz]	Águila 2 [Hz]	Águila 3[Hz]
1.95	1.98	2.01
3.85	3.92	3.93
4.3	4.46	4.46
4.92	4.78	-
5.84	5.69	5.76

4.2.4.3 Respuesta Vertical

Verticalmente se identifican tres posibles frecuencias globales, que se ubican cercanas a 3.87, 4.5 y 4.97 [Hz], y un conjunto de frecuencias locales que se pueden atribuir a diferentes elementos del puente. Además, se observa una muy baja (casi nula) energía registrada por los canales ubicados en el estribo, lo que denota el bajo movimiento de estos sensores en relación con los sensores ubicados en el tablero.

Además, en las propiedades verticales identificadas se aprecia un posible efecto de torsión, respecto al eje longitudinal, en las formas modales asociadas a las frecuencias de 4.5 y 4.97 [Hz], efecto que no se logra apreciar totalmente. Los resultados también entregan indicios sobre un movimiento independiente de cada uno de los vanos. Debido a estos indicios, se realiza la segunda campaña de mediciones con el objetivo de identificar el efecto de torsión en la estructura y el comportamiento independiente de cada vano.

Tabla 4-8: Frecuencias verticales identificadas, primera campaña de mediciones

Águila 1[Hz]	Águila 2 [Hz]	Águila 3[Hz]	Águila 4[Hz]
3.7-3.9	3.87	3.88	3.93-3.98
4.3-4.4	-	4.36	4.33-4.36
-	4.5	4.51	4.49
4.9	-	4.97	4.99
5.8	-	-	-
-	6.87	6.97	5.77
8.2	-	-	-

4.3 Resultados segunda campaña de mediciones

En la primera campaña de mediciones del puente Águila Norte, se realizan 4 registros de micro vibraciones ambientales, que incluyen acelerómetros configurados para registrar desplazamientos en la dirección vertical, del análisis de los registros medidos se logra identificar 3 frecuencias verticales (3.87, 4.5 y 4.97 [Hz]), como modos globales de forma clara, por el contrario, se observa un posible efecto de torsión en las frecuencias cercanas a 4.5 y 4.97 [Hz], este efecto de “warping” no se logra identificar totalmente debido a la falta de una distribución de sensores que los disponga en los bordes transversales opuestos del tablero y que permita analizar el contraste en el movimiento de estos sensores, asimismo se distinguen indicios de un comportamiento independiente de cada uno de los vanos, que debe ser investigado en mayor profundidad para ser reconocido claramente.

Con el afán de esclarecer los indicios identificados previamente, es que se realiza la segunda campaña de mediciones, en la cual cada uno de los 5 registros consta de al menos un sensor ubicado en el centro de cada uno de los vanos, por otra parte, en la totalidad de las mediciones se distribuye 6 sensores exclusivamente en un vano, de tal manera de identificar por completo el movimiento vertical del vano respectivo. Además de estos 6 sensores, 3 se ubican en el sector sur del tablero, mientras que los 3 restantes se ubican en el sector norte, distribución que permite identificar posibles efectos de torsión en el tablero.

El análisis de los datos registrados durante las mediciones se realiza, en una primera instancia, utilizando los datos registrado de los 11 acelerómetros dispuestos durante la medición, estos datos son analizados bajo el método de análisis en frecuencia y el método del subespacio estocástico, obteniendo las frecuencias del

comportamiento general de la estructura, mediante el contraste de los resultados entregados por ambos métodos. Además, se calculan las formas modales generales con los resultados asociados al diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, determinando la deformación de la estructura para cada una de las frecuencias identificadas.

Luego, se obtiene el espectro de densidad de potencia de los canales centrales de la respectiva medición, de tal manera que se pueda observar la coherencia de las frecuencias obtenidas, permitiendo identificar una frecuencia global cuando las frecuencias presentan alta coherencia entre canales ubicados en diferentes vanos, e identificando una frecuencia local cuando la coherencia de la frecuencia es alta dentro de los canales dispuestos en el mismo vano y baja con los canales ubicados en los demás vanos.

Finalmente, se calcula el espectro de densidad de potencia y el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, de los canales ubicados en el mismo vano de la medición, de tal manera de poder distinguir las frecuencias características de cada uno de los vanos y un posible efecto de torsión.

Los análisis realizados se obtienen filtrando la señal entre 0.3 y 10 [Hz], mediante un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto del tipo “Butterworth” de orden 8. Asimismo, para calcular los espectros de densidad de potencia y función coherencia, se utilizan ventanas del tipo “Hanning” de 10 [s] de duración.

Debido a la extensión de los resultados obtenidos para la presente campaña de mediciones, a continuación, se entregan los resultados de la medición Águila 6 a modo de ejemplo de la metodología ocupada para el análisis de los registros de la segunda campaña de mediciones, mientras que el resto de las mediciones (Águila 7, Águila 8, Águila 10 y Águila 11.), se añaden en detalle en el Anexo A, en la sub sección Resultados segunda campaña de mediciones.

4.3.1.1 Resultados medición Águila 6

Al obtener el espectro de densidad de potencia, con todos los canales utilizados en la medición (Figura 4-17), se observan varios puntos altos de energía, asociados a frecuencias entre 3.89 y 4.02 [Hz], a la vez se observan “peaks” secundarios en frecuencias cercanas a 2.83, 4.31, 4.36, 4.49, 4.64 y 4.99 [Hz]. Estos resultados se conllevan con lo mostrado por el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico (Figura 4-18), el cual muestra frecuencias similares, las que son resaltadas en la tabla resumen del diagrama de estabilidad.

Las formas modales obtenidas, para el caso con todos los canales dispuestos en la medición (Figura 4-19 y Figura 4-20), indican la presencia de dos formas globales, identificadas en 4.401 y 5.001 [Hz], resaltadas en las figuras. Vale recalcar que, en el diagrama se aprecian un número mayor de modos que corresponderían a modos secundarios y a posibles artificios asociados a objetos que vibrarían en la estructura. Además, las formas modales obtenidas, resultan consistentes con las formas modales obtenidas en las mediciones águila 2 y águila 4.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 4-25), bajo el caso de análisis de sensores ubicados en los diversos centros de vano (canales 4, 10, 8, 13, 14, 3 y 12), se aprecia una baja coherencia entre los canales ubicados en el centro de distintos vanos, y una alta coherencia entre sensores ubicados en el mismo vano, lo que indica un grado de independencia de la respuesta vertical de cada vano. A excepción de los indicado anteriormente, las frecuencias 4.33 y 4.97 [Hz], no presentan la tendencia resaltada, ya que se mantienen con una alta coherencia a pesar de ser obtenidas a través de registros de sensores posicionados en diferentes vanos.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 4-21), bajo el caso de análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 1 (canales 1, 4, 7, 9, 10 y 11), se distingue una alta coherencia para los canales ubicados en el vano, observando la presencia de modos en las frecuencias 3.95, 4.36 y 4.64 [Hz]. Igualmente, las frecuencias anteriores, son identificadas por el diagrama de estabilidad (Figura 4-22) correspondiente al análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 1, resaltándose estas frecuencias en la tabla resumen asociada al diagrama de estabilidad.

Al contrastar las formas modales asociadas al espectro de potencia (Figura 4-23) y al diagrama de estabilidad (Figura 4-24), de los canales ubicados exclusivamente en el vano 1, se nota que se obtienen las mismas formas modales, corroborando el análisis realizado. También, se advierte que los canales ubicados en el vano sur tienen un mayor brazo de palanca y se observa que las frecuencias de 3.931 y 4.637 [Hz] (resaltadas en la figura), corresponden a frecuencias características del vano 1, siendo la primera asociada a un movimiento vertical y la segunda a un movimiento de torsión.

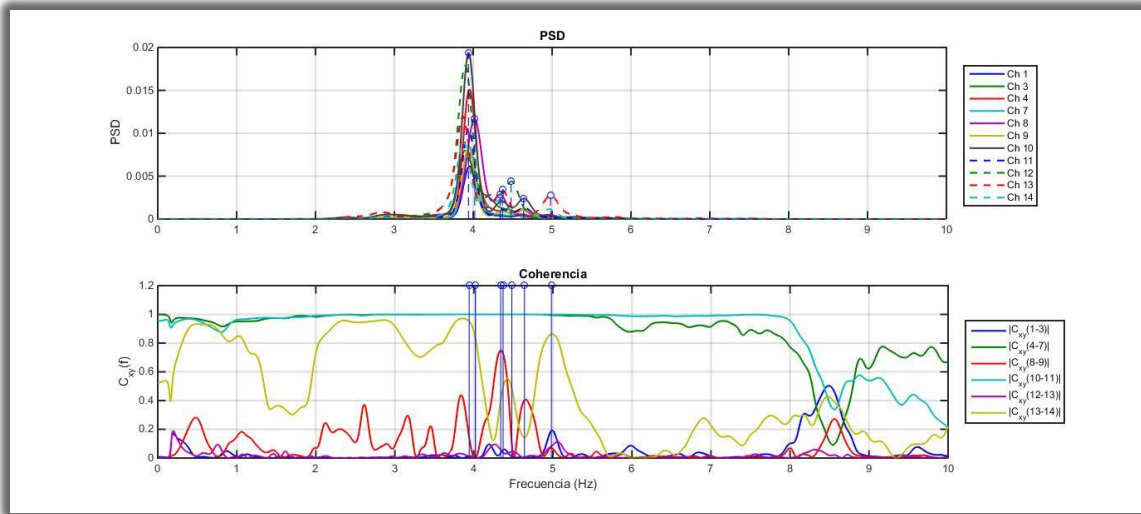


Figura 4-17: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 6

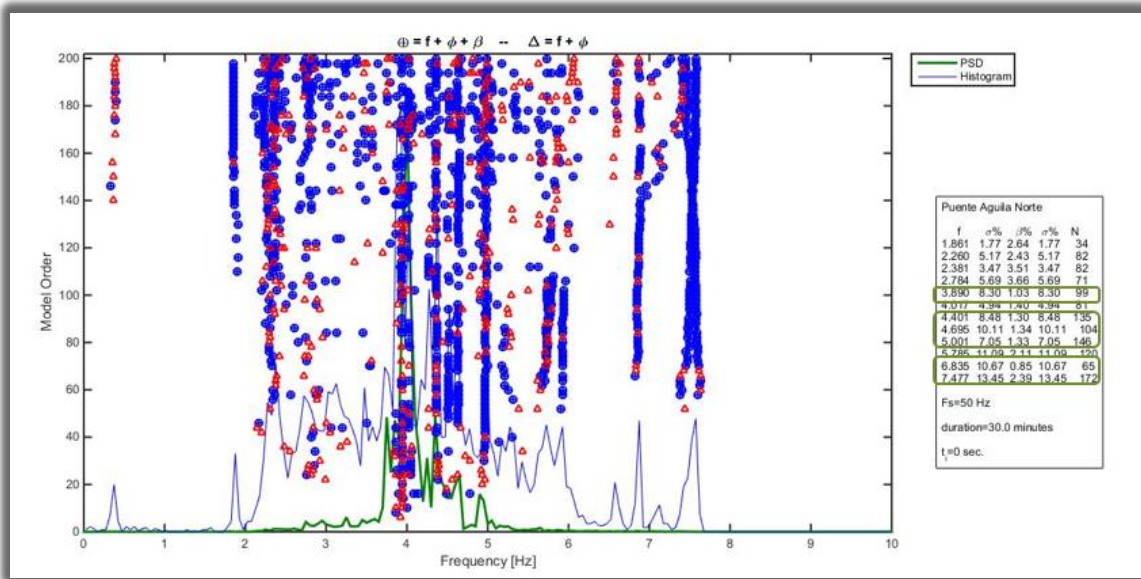


Figura 4-18: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila 6.

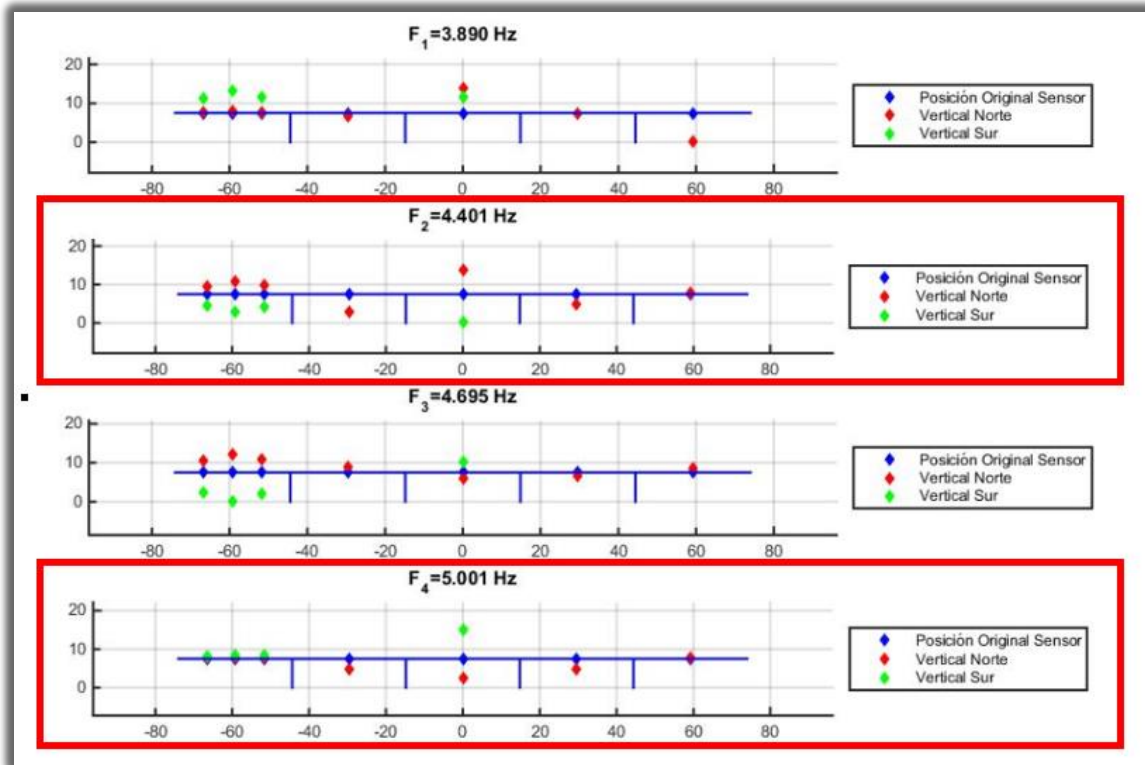


Figura 4-19: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 6

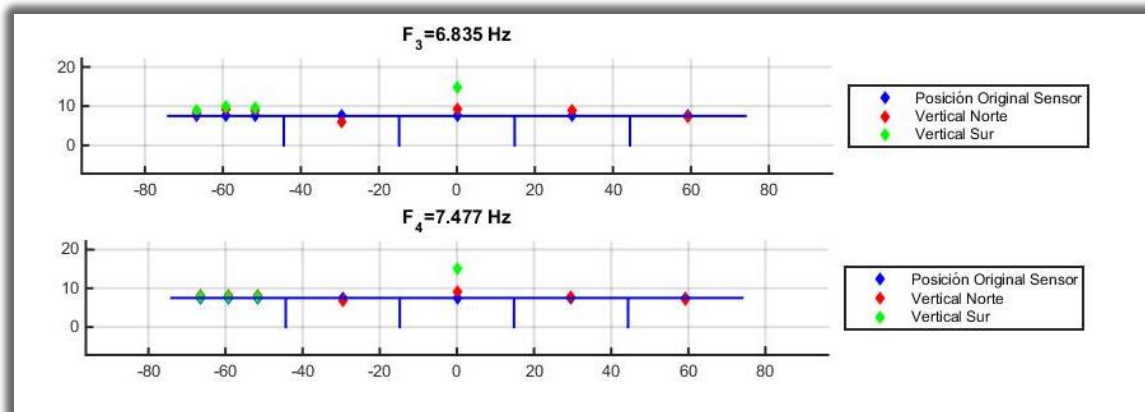


Figura 4-20: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 6

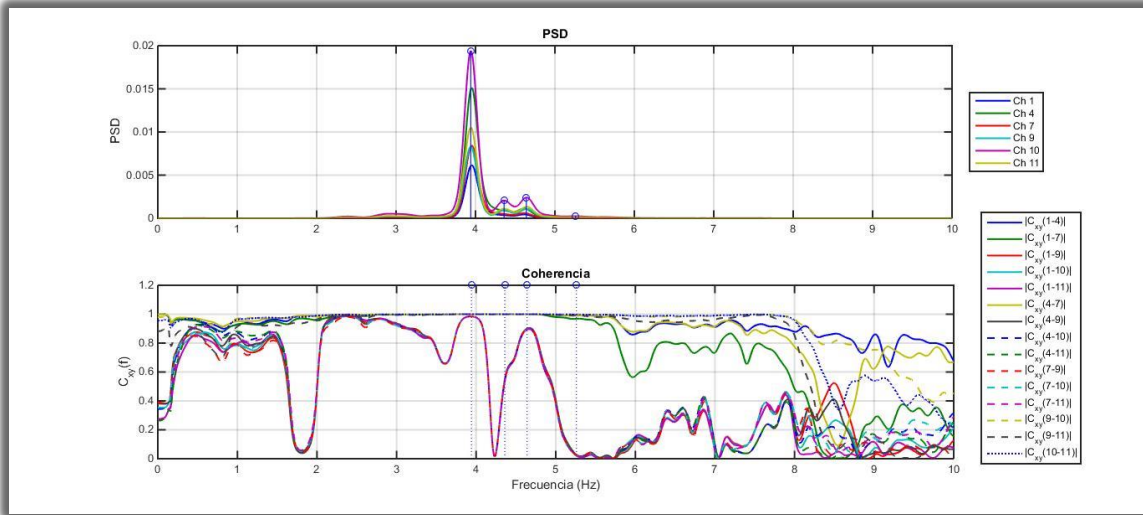


Figura 4-21: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 1, correspondiente a la medición Águila 6

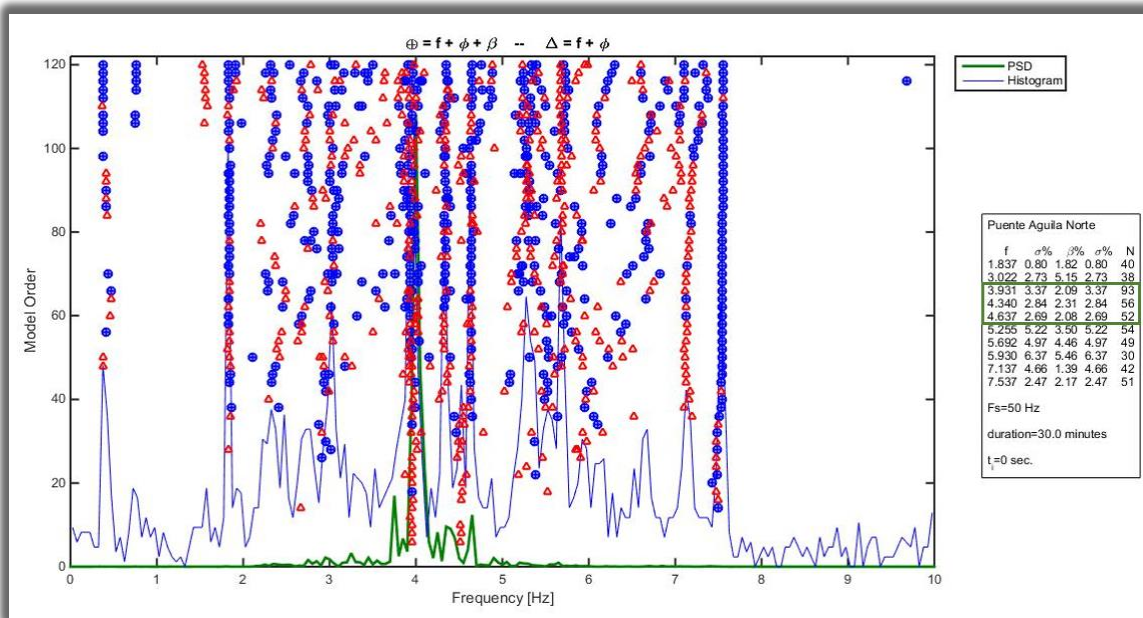


Figura 4-22: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 1, correspondiente a la medición Águila 6

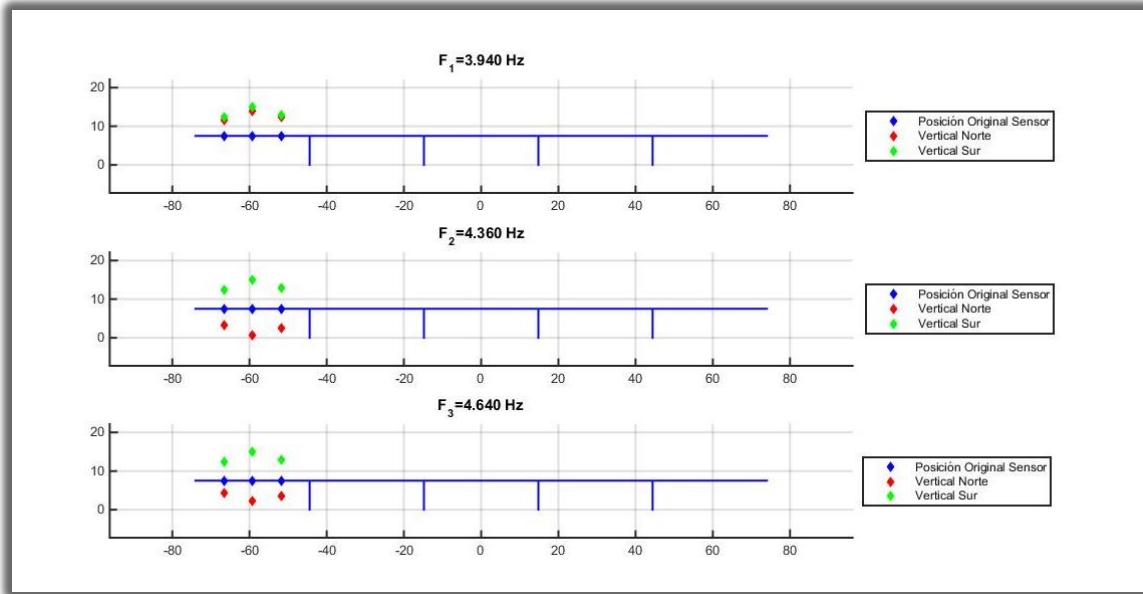


Figura 4-23: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 1, correspondientes a la medición Águila 6

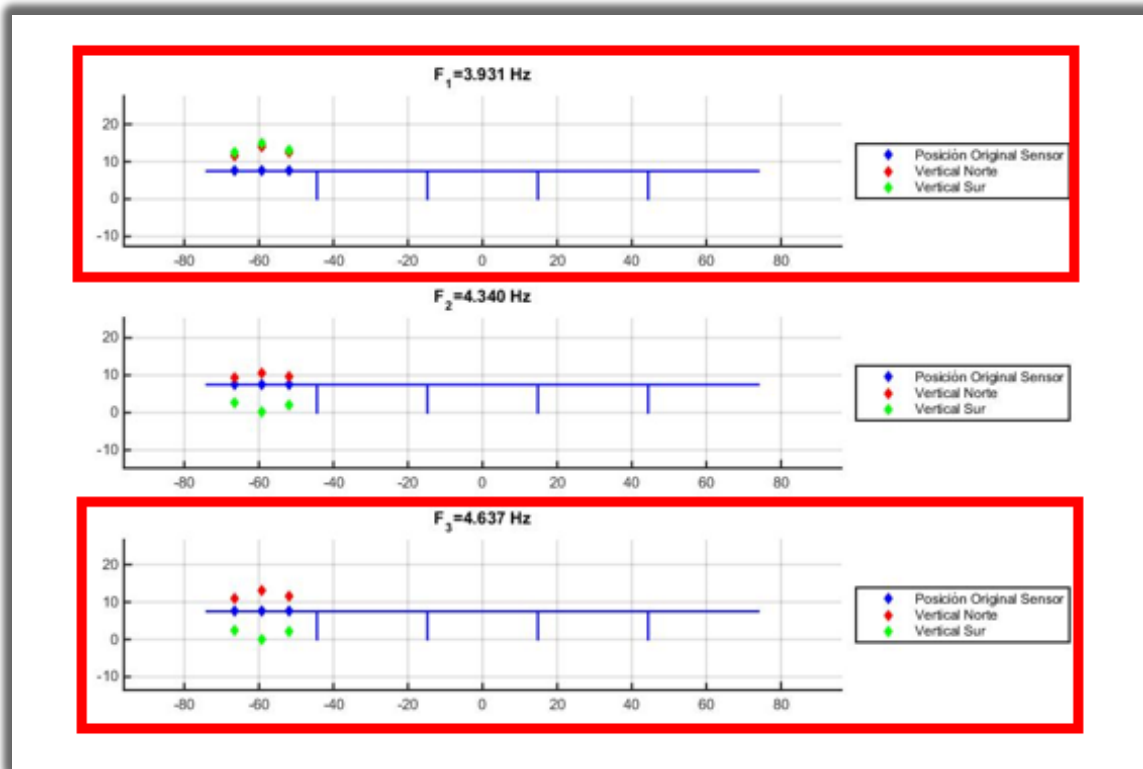


Figura 4-24: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 1, correspondientes a la medición Águila 6

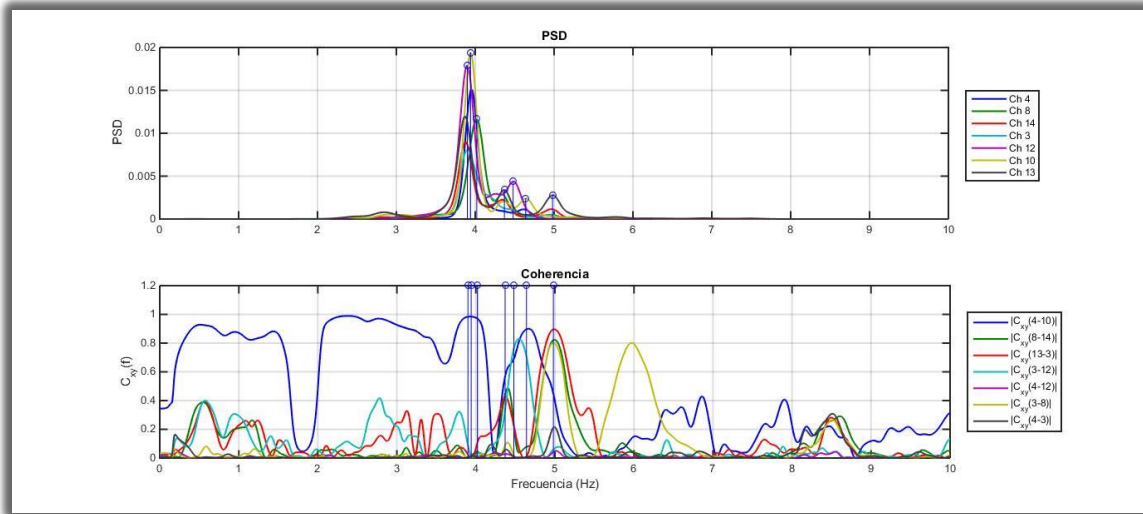


Figura 4-25: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 6

4.3.2 Propiedades identificadas segunda campaña de mediciones

Analizadas las propiedades dinámicas calculadas a partir de los datos registrados en la segunda campaña de medición de micro vibraciones ambientales del puente águila norte, se obtienen las frecuencias globales verticales de la estructura (Tabla 4-9) y las frecuencias asociadas a cada uno de los vanos (Tabla 4-10).

Tabla 4-9: Frecuencias globales identificadas en cada medición, segunda campaña de mediciones

Medición	F [Hz]
Águila 6	3.89, 4.40 y 5.001
Águila 7	3.97, 4.37 y 4.956
Águila 8	3.937, 4.339 y 5.029
Águila 10	3.939, 4.348 y 4.957
Águila 11	4.018, 4.356 y 4.894

De las frecuencias globales identificadas, se grafican las dos últimas ocupando los resultados en conjunto de todas las mediciones realizadas (Figura 4-26 y Figura 4-27), previo a una normalización de cada resultado según la energía en conjunto de los canales centrales de su respectiva medición. Esta normalización y consecuente uso en conjunto de los datos, permite identificar en su totalidad a las formas modales asociada a estas frecuencias y verificar la componente de torsión asociada a estos modos.

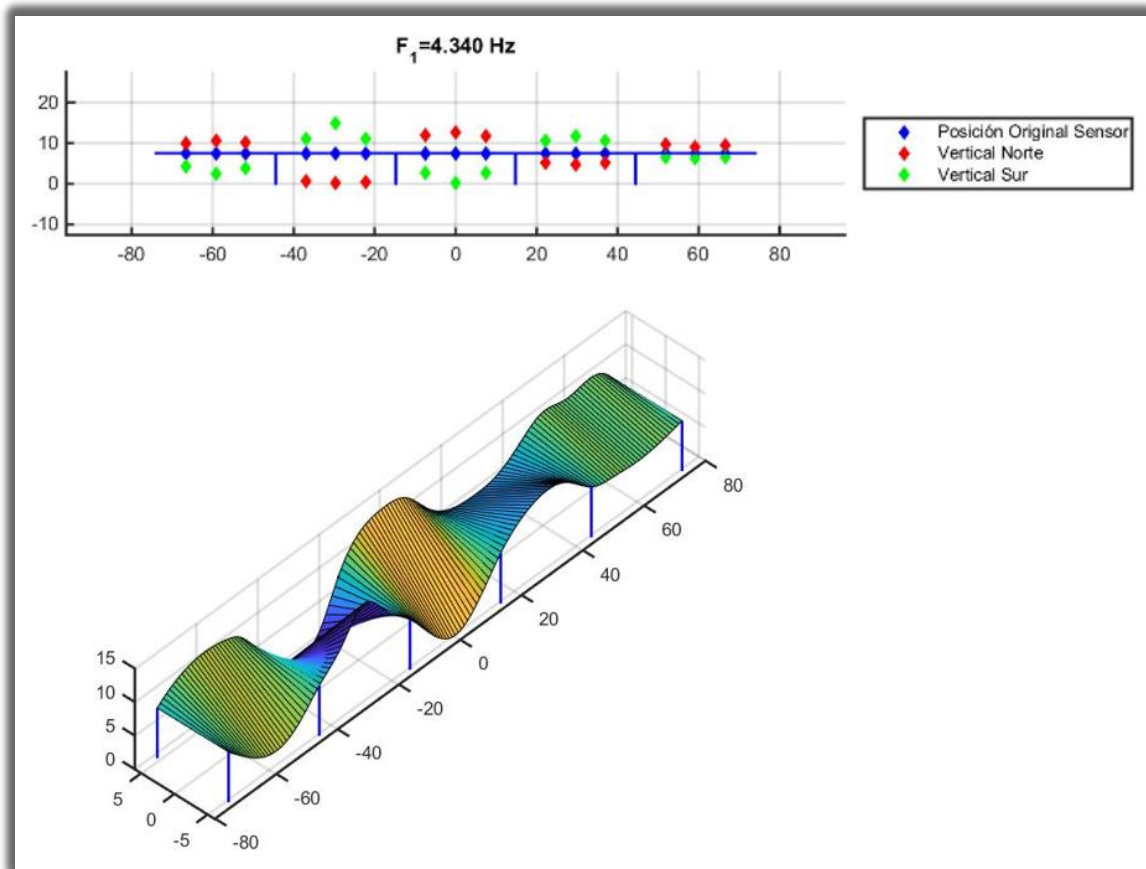


Figura 4-26: Forma modal normalizada para la frecuencia global 4.34 [Hz]

Tabla 4-10: Frecuencias identificadas para cada vano, segunda campaña de mediciones

Tipo de frecuencia	Vano 1 [Hz]	Vano 2 [Hz]	Vano 3 [Hz]	Vano 4 [Hz]	Vano 5 [Hz]
Vertical	3.93	3.99	3.86	3.9	3.85
“Warping”	4.64	4.60	4.50	4.55	4.51

Se observa que el comportamiento independiente que se indicaba en las primeras mediciones es observable en las segundas mediciones, asociándose 2 frecuencias características a cada uno de los vanos (Tabla 4-10), identificando que la primera corresponde a una frecuencia vertical, mientras que la segunda se relaciona a un movimiento de “warping”. Estas frecuencias son similares entre si debido a la homogeneidad en la característica de los vanos, lo que representa una dificultad adicional al momento de identificarlas. En un principio, se asocia una frecuencia de 4.362 Hz al vano 2 y una frecuencia de 4.39 Hz al vano 3, esto al observar sus respectivas formas modales, pero al analizar la totalidad de los resultados, se deduce que estos valores no corresponden a la tendencia obtenida en los demás vanos, por lo que se cambian estos valores por los valores entregados en la tabla.

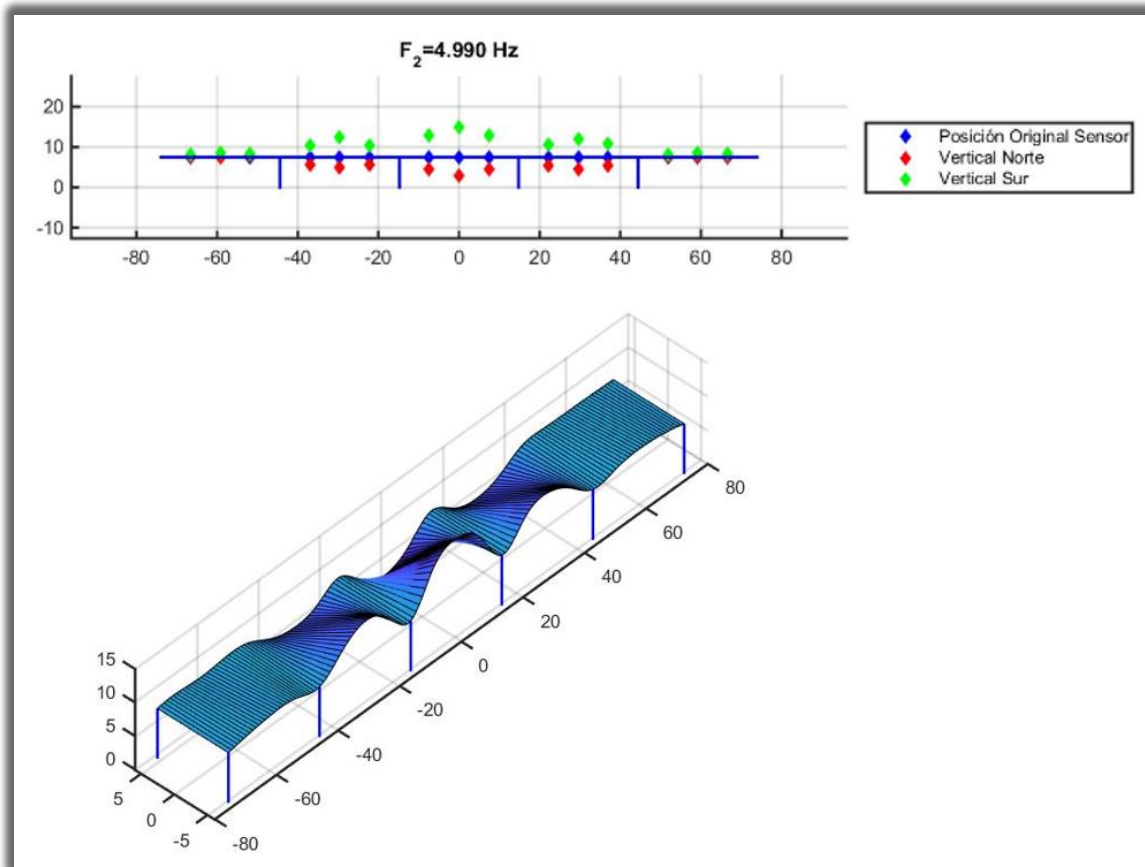


Figura 4-27: Forma modal normalizada para la frecuencia global 4.99 [Hz]

4.4 Resultados tercera campaña de mediciones

Durante la primera campaña de micro vibraciones ambientales del puente Águila Norte, se identificaron puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia, y formas modales, que se interpretan como posibles modos asociados al movimiento de las cepas. Con el objetivo de esclarecer lo observado en campañas anteriores, en las siguientes páginas se entregan los resultados asociados al comportamiento de las cepas 1, 2 y 3, mediante los análisis realizados para la medición Águila 15, la cual engloba dentro de sus resultados los comportamientos observados en las mediciones Águila 13 y 14, las cuales se utilizan para corroborar los resultados obtenidos y son agregadas en el Anexo A, sub sección Resultados tercera campaña de mediciones.

4.4.1 Medición Águila 15

Los datos registrados en la medición Águila 15 miden el comportamiento longitudinal y transversal de la cepa 1, 2 y 3. Los datos obtenidos son filtrados entre 0.3 y 10 [Hz] mediante un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto del tipo “Butterworth” de orden 8. Estos datos son procesados mediante métodos de análisis de frecuencias y el método del subespacio estocástico, mientras que, para analizar la torsión, se utiliza únicamente el método de análisis de frecuencias.

Utilizando ventanas del tipo “Hanning” de 10 [s] de duración, se obtienen los espectros de densidad de potencia y función coherencia del comportamiento transversal (Figura 4-30) y longitudinal (Figura 4-29) del puente, observando que estos poseen un comportamiento no-lineal, el que puede ser atribuido a la masa de los camiones que transitan por el puente durante la medición, este efecto no-lineal produce que las frecuencias “peaks” de las cepas disminuyan, generándose dos “peaks” para la misma frecuencia de cepa, un “peaks” asociado a la respuesta lineal y otro asociado a la respuesta no-lineal. Para eliminar este efecto, se calculan nuevos espectros de densidad de potencia para el caso longitudinal (Figura 4-28) y transversal (Figura 4-31), utilizando ventanas del tipo “Hanning” de 40 [s] de duración y eliminando del registro las zonas con excesivos “peaks” de aceleraciones asociadas al paso de los camiones por el puente.

Al analizar la respuesta longitudinal y transversal de la estructura, a través de los espectros de densidad de potencia, se observan frecuencias atribuibles a cada una de las cepas, las que se pueden observar en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11: Frecuencias de cepa identificadas, medición Águila 15

Cepa	Frecuencia longitudinal [Hz]	Frecuencia transversal [Hz]
1	4.14	4.84
2	3.95	4.45
3	3.99	4.53

Se analizan las frecuencias de torsión mediante ventanas del tipo “Hanning” de 10 [s] de duración (Figura 4-32), observándose la presencia de tres “peaks” en 4.53, 5.18 y 9.01 [Hz] que se encuentran en las 3 cepas y poseen una alta coherencia. Estos “peaks” corroboran los “peaks” identificados en las mediciones Águila 13 y Águila 14, comprobando la presencia de frecuencias atribuibles a “rocking” en las cepas.

Se analiza la estructura mediante el método del subespacio estocástico, en la respuesta longitudinal (Figura 4-33) y transversal (Figura 4-34), observándose la repetitividad con los modos identificados en los espectros de densidad de potencia, graficando las frecuencias en común en las Figura 4-35 y Figura 4-38.

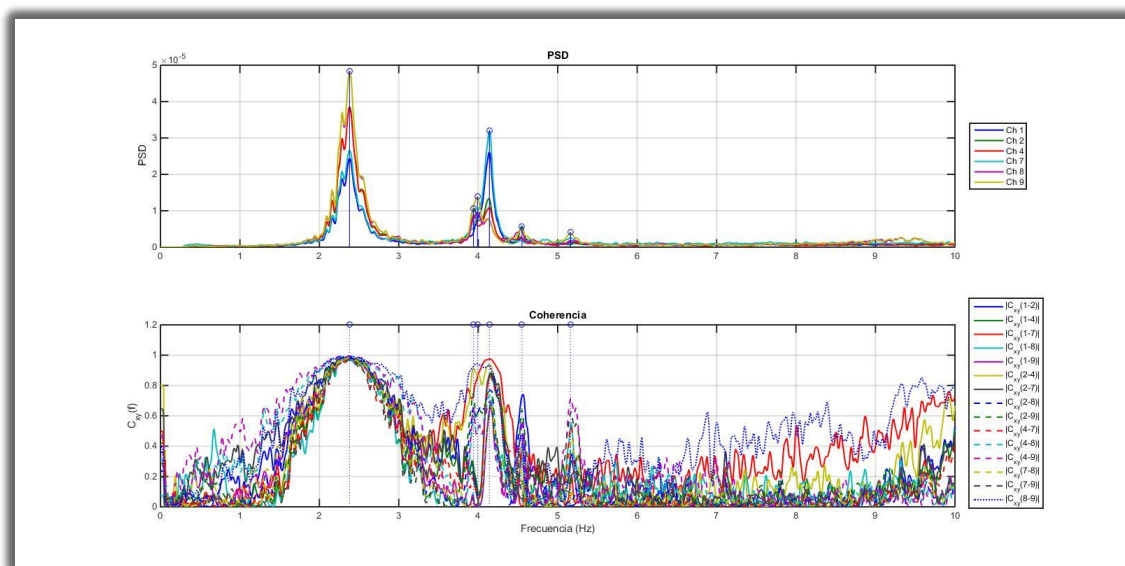


Figura 4-28: Espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición Águila 15, excluyendo el comportamiento no-lineal de la estructura.

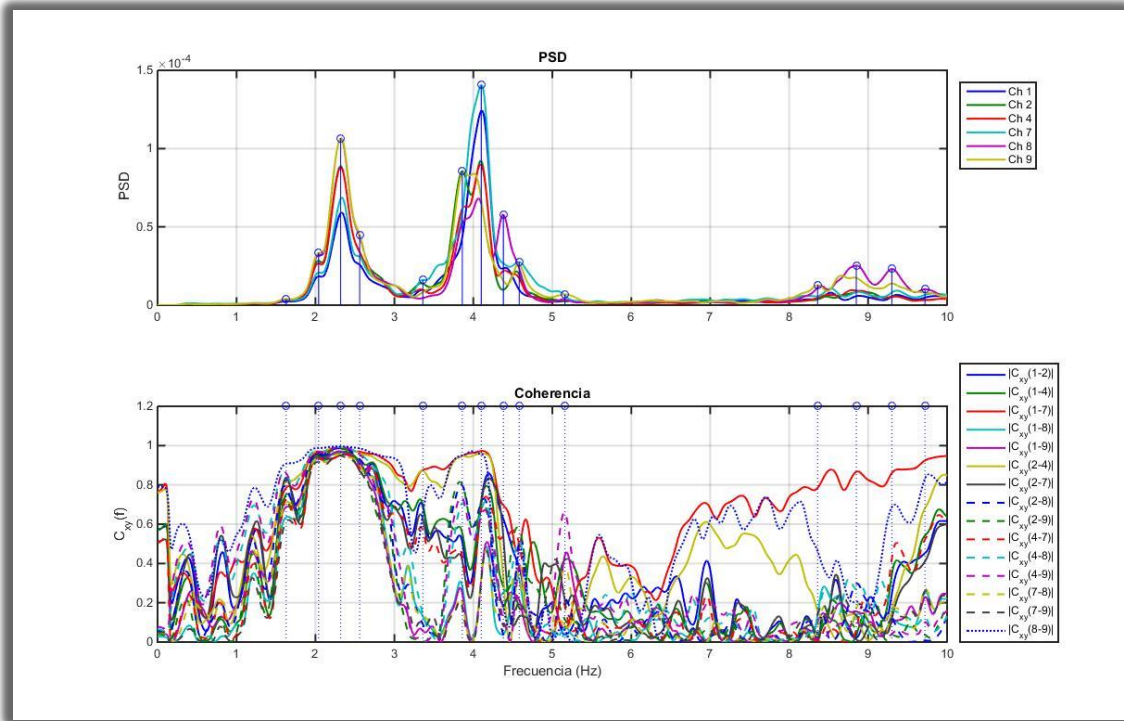


Figura 4-29: Espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición Águila 15, incluyendo el comportamiento no-lineal de la estructura.

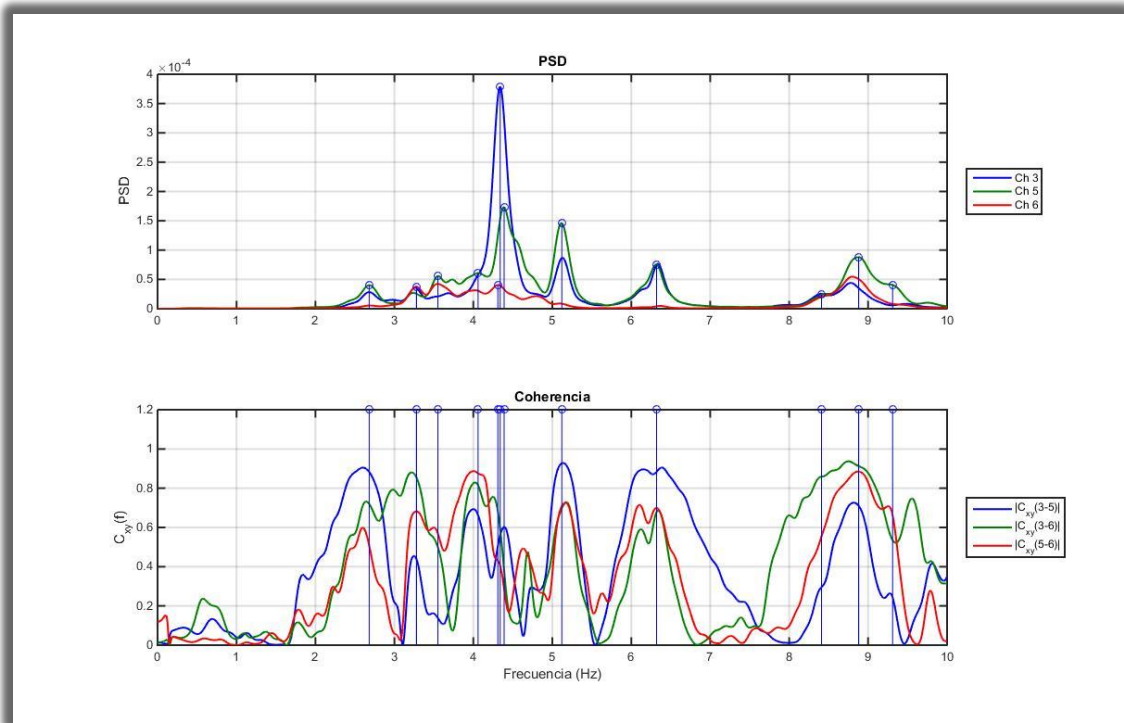


Figura 4-30: Espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición Águila 15, incluyendo el comportamiento no-lineal de la estructura

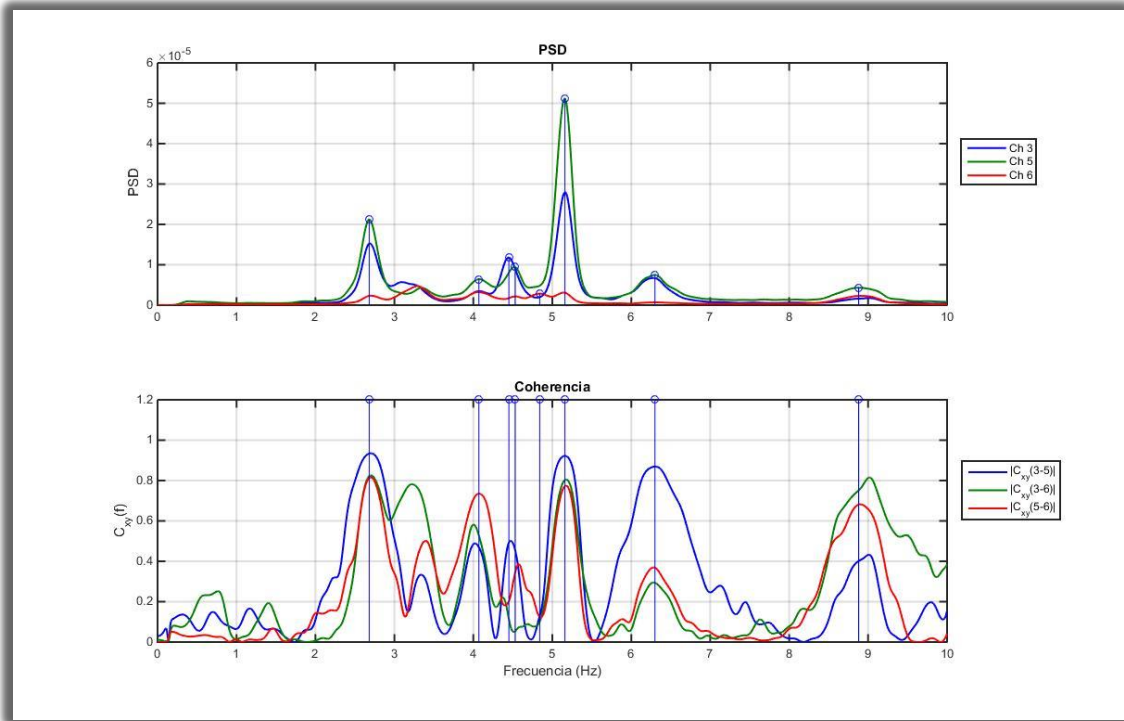


Figura 4-31: Espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición Águila 15, excluyendo el comportamiento no-lineal de la estructura.

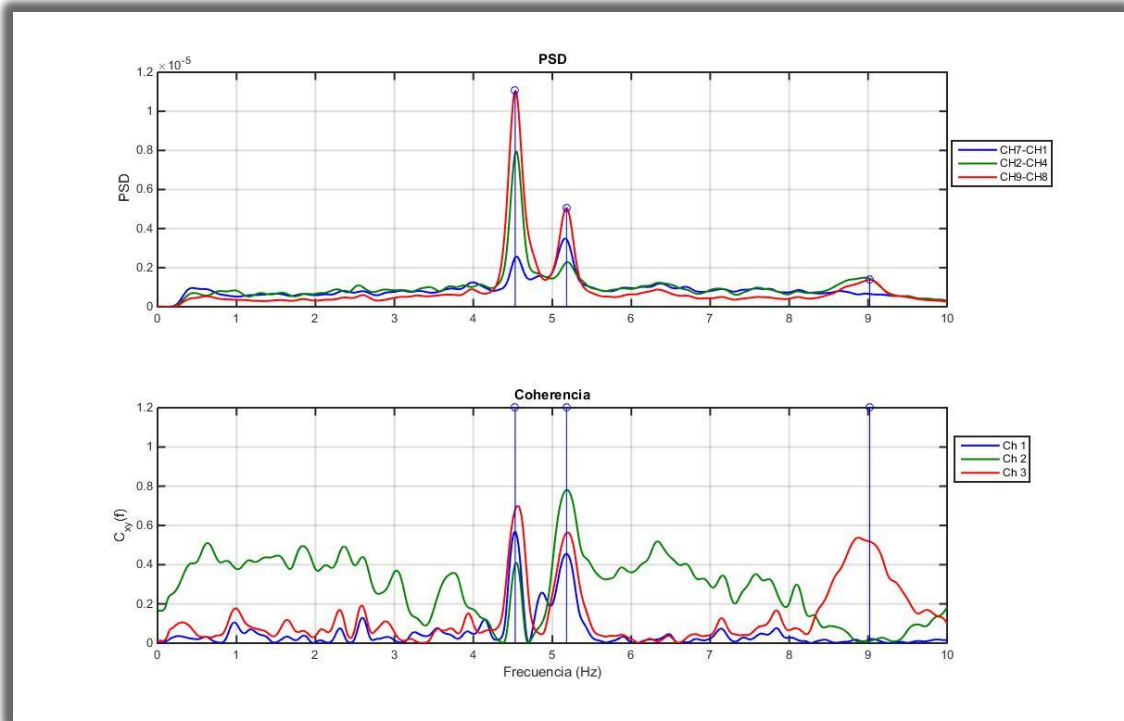


Figura 4-32: Espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales longitudinales opuestos ubicados en las cepas.

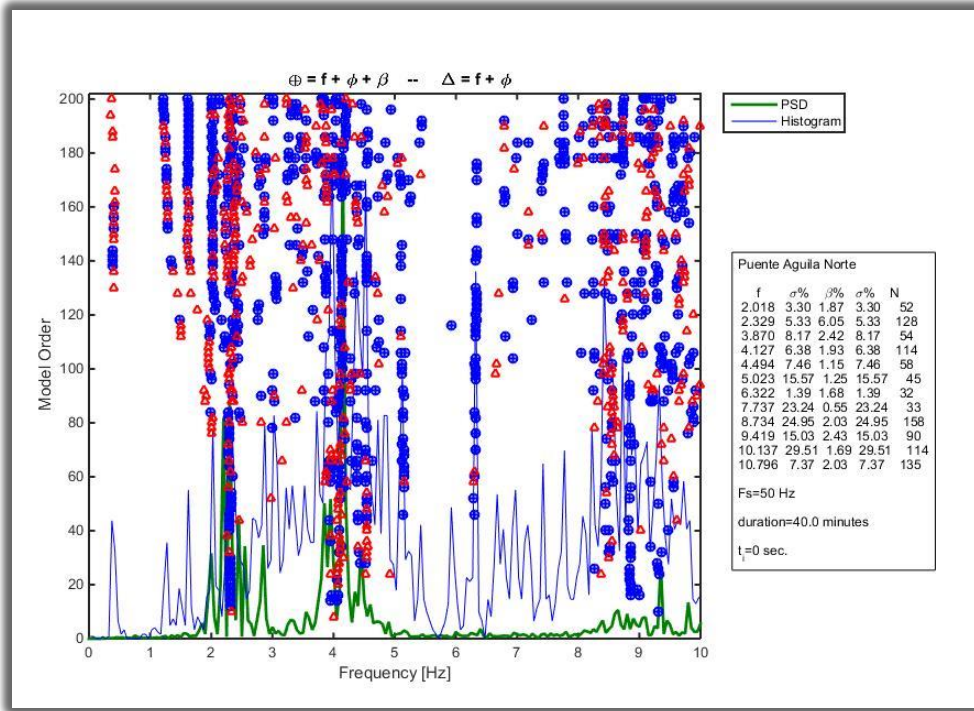


Figura 4-33: Diagrama de estabilidad del comportamiento longitudinal de la medición Águila 15

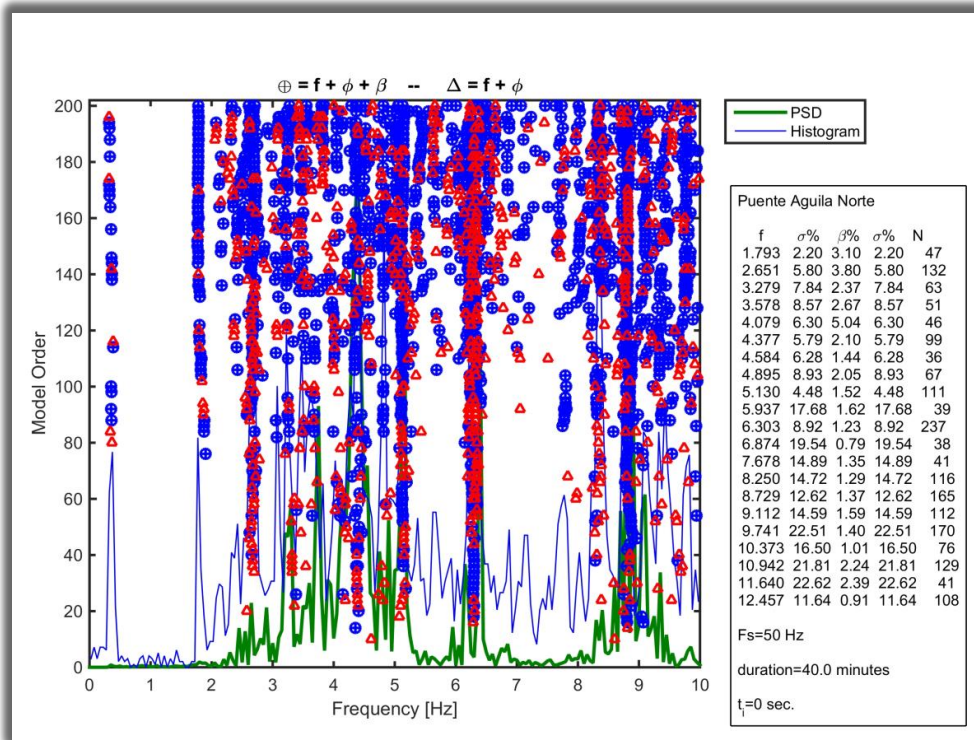


Figura 4-34: Diagrama de estabilidad del comportamiento transversal de la medición Águila 15

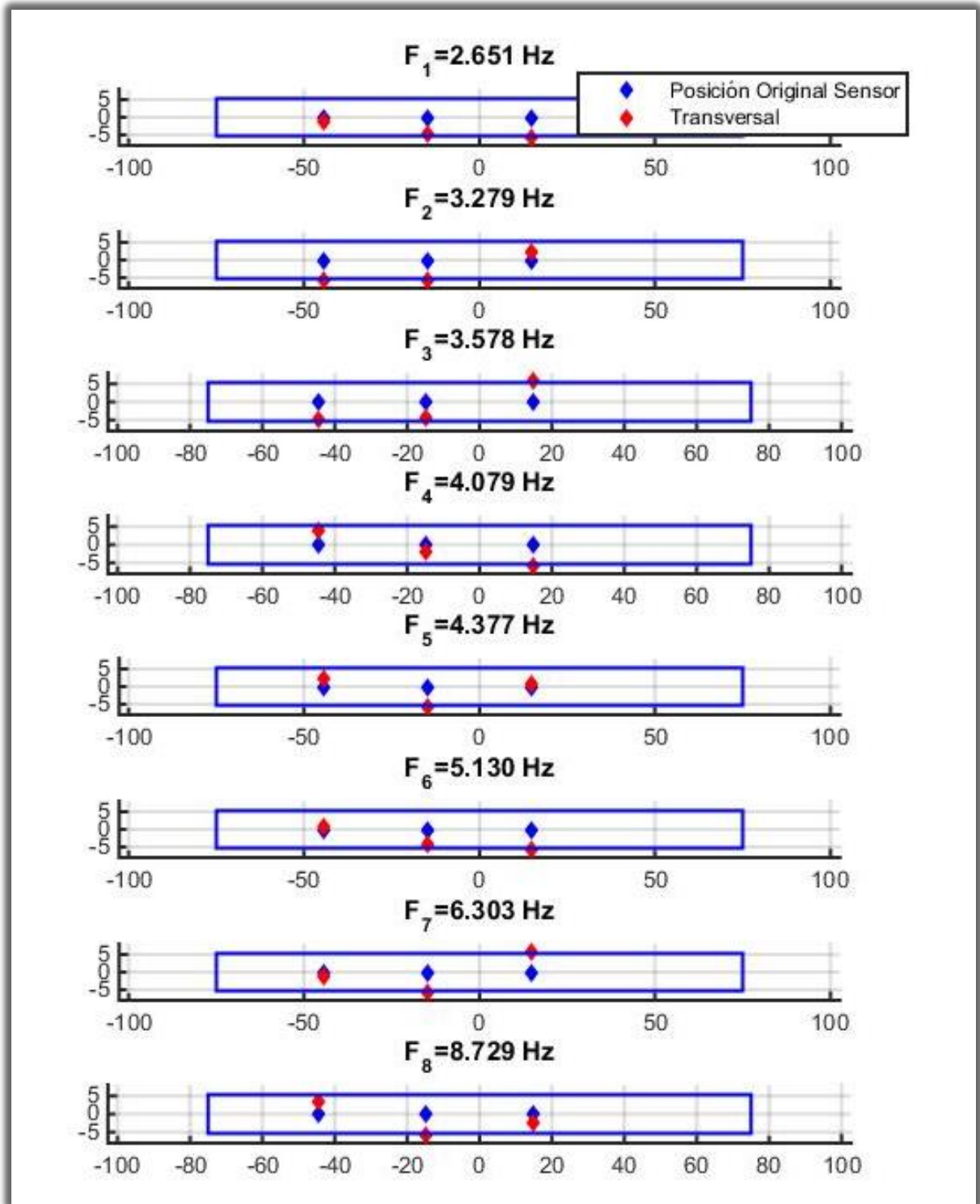


Figura 4-35: Formas modales asociadas al comportamiento transversal del diagrama de estabilidad

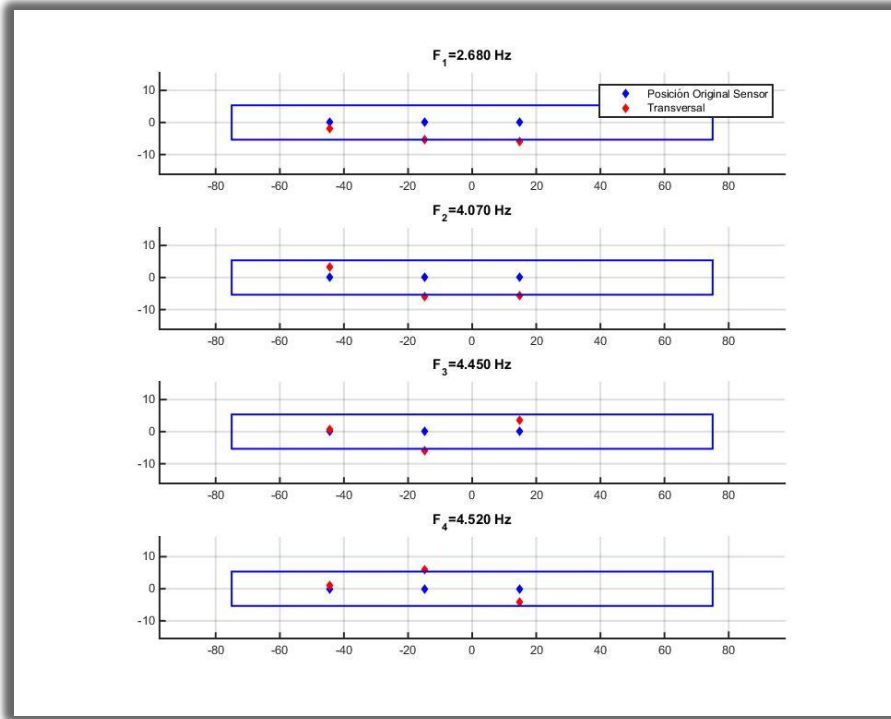


Figura 4-36: Formas modales asociadas al espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición Águila 15

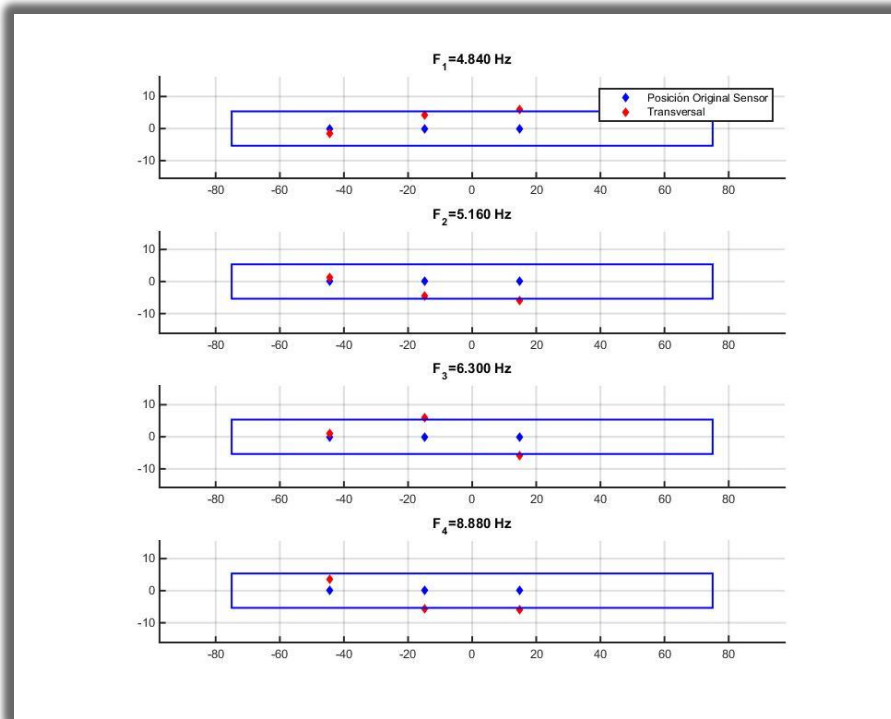


Figura 4-37: Formas modales asociadas al espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición Águila 15

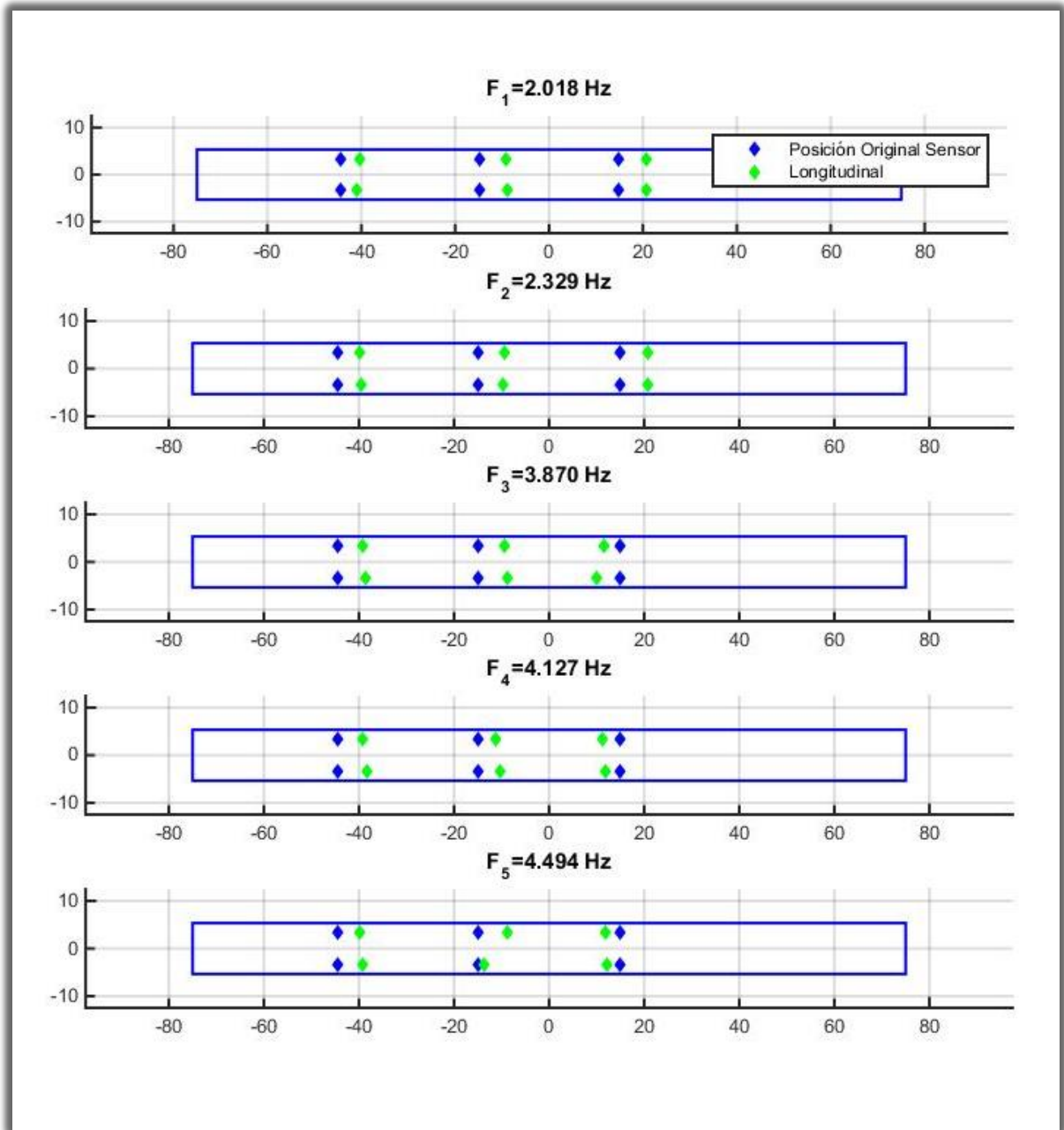


Figura 4-38: Formas modales asociadas al comportamiento longitudinal del diagrama de estabilidad

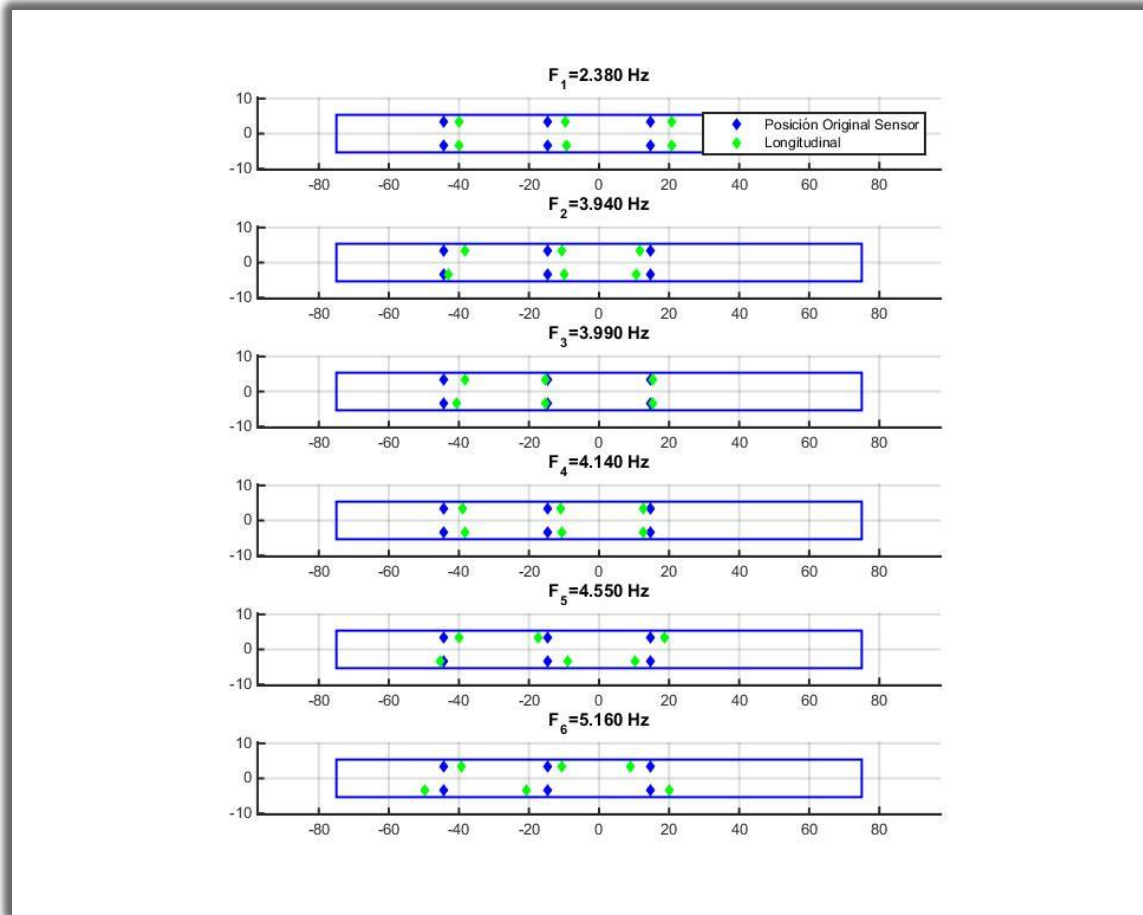


Figura 4-39: Formas modales asociadas al espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición Águila 15

4.4.2 Propiedades identificadas tercera campaña de mediciones

En la Tabla 4-12 se aprecia un resumen de las frecuencias longitudinales por cepa, obtenidas en cada una de las mediciones, en la cual se puede apreciar que dan resultados sumamente similares entre registros, concluyendo que la frecuencia de la cepa 1 se encuentra en valores cercanos a 4.11 [Hz], la frecuencia de la cepa 2 se asocia a valores cercanos a 3.95 [Hz] y la frecuencia de la cepa 3 se identifica en valores cercanos a 3.99 [Hz]. Estos valores ubicándose dentro del rango de 3.8-4.2 [Hz] predicho en la primera campaña de mediciones.

En la Tabla 4-13 se entregan las frecuencias de torsión longitudinal identificadas en cada una de las mediciones, en esta se observa que los valores obtenidos se repiten a lo largo de los registros y en las 3 cepas registradas, identificando tres frecuencias de torsión en valores cercanos a 4.53, 5.18 y 9 [Hz], las cuales se materializan como “peaks” en el espectro de densidad de energía y en la función de coherencia para el caso en que analiza la diferencia entre los canales longitudinales opuestos ubicados en las cepas. Estos resultados indican que la frecuencia de torsión de 5.8 [Hz], observada en las campañas anteriores, se asociaría a la frecuencia de 5.18 [Hz].

Se observa que el efecto no-lineal generado por la masa de los camiones que transita por el puente, produce que las cepas disminuyan sus frecuencias características y que disminuyan bastante la energía asociada a estas, efecto que se aprecia en los sentidos transversales y longitudinales.

El comportamiento transversal del puente se resume en la Tabla 4-14, en la cual se observa que las frecuencias de cepa identificadas, poseen valores similares entre mediciones, concluyendo que la frecuencia de la cepa 1 se observa en valores cercanos a 4.8 [Hz], la frecuencia de la cepa 2 se identifica en valores cercanos a 4.46 [Hz] y la frecuencia de la cepa 3 se asocia a valores cercanos a 4.53 [Hz]. Estos valores ubicándose cerca del rango de 4.1-4.5 [Hz] predicho en la primera campaña de mediciones.

Tabla 4-12: Frecuencias de cepa longitudinales identificadas, tercera campaña

Medición	Cepa 1 [Hz]	Cepa 2 [Hz]	Cepa 3 [Hz]
Águila 13	4.11	-	-
Águila 14	4.11	3.95	-
Águila 15	4.14	3.95	3.99

Tabla 4-13: Frecuencias de torsión longitudinal identificadas, tercera campaña

Medición	Frecuencia “rocking” 1 [Hz]	Frecuencia “rocking” 2 [Hz]	Frecuencia “rocking” 3 [Hz]
Águila 13	4.53	5.07	8
Águila 14	4.53	-	8.93
Águila 15	4.53	5.18	9.01

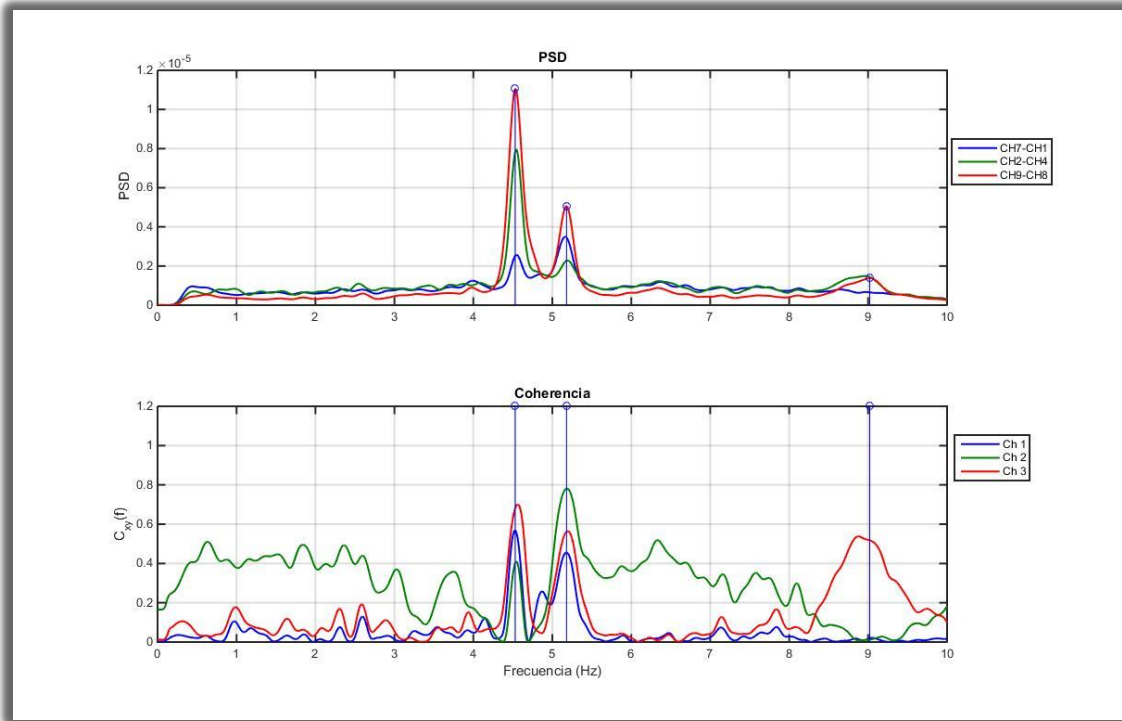


Figura 4-40: Espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales longitudinales opuestos ubicados en las cepas.

Tabla 4-14: Frecuencias de cepa transversales identificadas, tercera campaña

Medición	Cepa 1 [Hz]	Cepa 2 [Hz]	Cepa 3 [Hz]
Águila 13	4.8	-	-
Águila 14	4.8	4.46	-
Águila 15	4.84	4.45	4.53

Capítulo 5

Descripción de la plataforma

La red de cobertura nacional de acelerógrafos del departamento de ingeniería de la Universidad de Chile (RENADIC), cuenta con una red de 23 acelerómetros instalados en el viaducto El Salto, localizado en la vía las palmas, en la comuna de Viña del Mar. El mencionado sistema de monitoreo genera archivos sobre la respuesta del viaducto durante eventos sísmicos, los cuales son almacenados en la biblioteca de registros sísmicos del RENADIC como archivos de texto del tipo V1, V2 o V3. Donde el archivo V1 contiene los registros sin corrección, el archivo V2 contiene las aceleraciones filtradas y las trazas temporales de velocidad y desplazamiento que se obtienen a partir de una integración numérica de los registros de aceleraciones (previamente filtrados). El archivo v3 contiene los espectros elásticos de respuesta de cada canal (a partir de la señal previamente filtrada).

A partir de los registros sísmicos, el departamento de ingeniería de la Universidad de Chile (DIC), genera periódicamente informes del comportamiento sísmico de la estructura, los cuales incluyen información sobre el registro catastrado, información sobre la estructura y red de acelerógrafos, aceleraciones máximas, desplazamientos y velocidades máximos, además de una breve descripción sobre el comportamiento general de la estructura durante el periodo de estudio.

Debido a lo engorroso que resulta realizar un análisis manual de cada uno de los sismos que se encuentran y que se registrarán en la biblioteca del RENADIC, y la limitada información que se puede incorporar a estos informes, es que se desarrolla una plataforma de generación automática de informes sísmicos, que sea capaz de procesar de manera automática, rápida y robusta los registros sísmicos mediante un lenguaje de programación que permita procesar los resultados entregados, y que permita seleccionar que resultados se van a mostrar en el informe, dentro de una gran gama de métodos de análisis a seleccionar.

En las siguientes páginas se detalla sobre cómo se debe ordenar y tratar las carpetas que componen la plataforma, para luego especificar sobre cómo ocupar la interfaz generada en MATLAB, de tal forma que agregue los métodos de análisis deseados bajo los parámetros requeridos. Además, se describe el funcionamiento general de la plataforma. Aclarando cual información adicional al código se debe especificar, que programas se deben utilizar y como se conjuga esta información, junto al código en MATLAB y los programas, para generar un informe en formato PDF que contenga el análisis sísmico realizado. Asimismo, se añade una guía sobre como procesar los resultados obtenidos de los métodos de identificación DSI y DSI por pequeñas ventanas, mediante dos subrutinas que funcionan de manera paralela y como complemento de la plataforma. Finalmente, se anexa un informe sísmico generado a partir de la plataforma (Anexo D), que contiene un ejemplo de cada uno de los métodos programados en ella, a modo de ejemplo para mostrar la forma y contenido de los resultados generados.

5.1 Composición de la plataforma

La plataforma de generación automática de informes sísmicos del viaducto El Salto, se compone de una estructura de carpetas (Figura 5-1), las cuales componen la columna vertebral del sistema de análisis sísmico. Estas carpetas almacenan diferentes secciones de la plataforma, y es importante que no se cambien sus nombres, ya que, de ser así, el código de MATLAB no será capaz de identificar la ubicación de los archivos (o por el contrario se deben modificar los nombres de las carpetas en el código). A continuación, se detallan las carpetas que componen al sistema, especificando su función y archivos que la componen.

- Carpeta de resultados: Carpeta en la cual se almacenan los resultados generados por la plataforma (los cuales pueden ser llamados en caso de que ya se hayan procesado con anterioridad).
- Funciones Matlab: Carpeta en donde se guarda el código principal, y funciones secundarias en lenguaje MATLAB.
- Informe Base: Carpeta que contiene los diferentes archivos necesarios para generar el informe sísmico, de manera automática en lenguaje LATEX. En este contexto, se tiene un archivo tex que es luego modificado además de las figuras bases del informe.

- Informe_2018_X: Carpeta de numeración variable que se genera cada vez que se ejecuta la plataforma, y en donde se guarda el informe y los archivos que son necesarios para generar el informe en Latex.
- Registro marga-marga: Carpeta en la cual se almacena la biblioteca de registros sísmicos que ha registrado la Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (RENADIC).

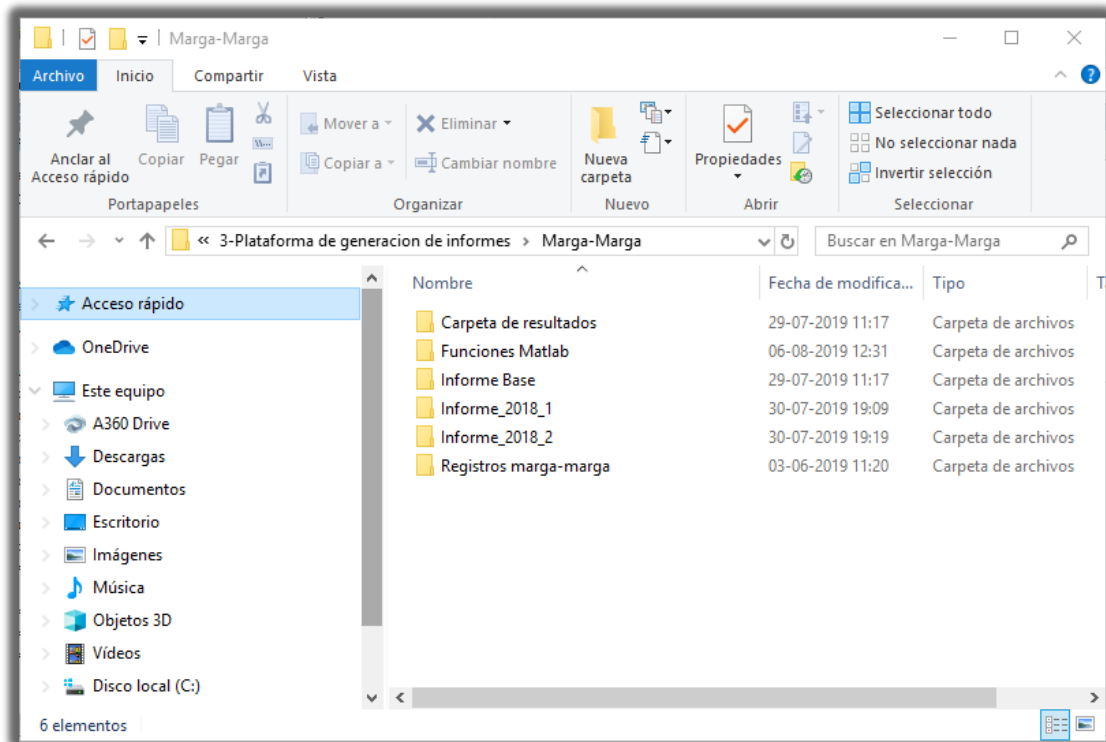


Figura 5-1: Carpetas bases de la plataforma de generación de informes sísmicos

5.1.1 Carpeta de resultados

En la carpeta de resultados es en donde se almacenan los resultados de los diferentes análisis de registros sísmicos realizados durante la ejecución del código de la plataforma. Esta carpeta se encuentra dividida en varias subcarpetas las que se pueden apreciar en la Figura 5-2. El detalle del contenido de las subcarpetas se puede encontrar en el Anexo B, subsección Contenido carpeta de resultados.

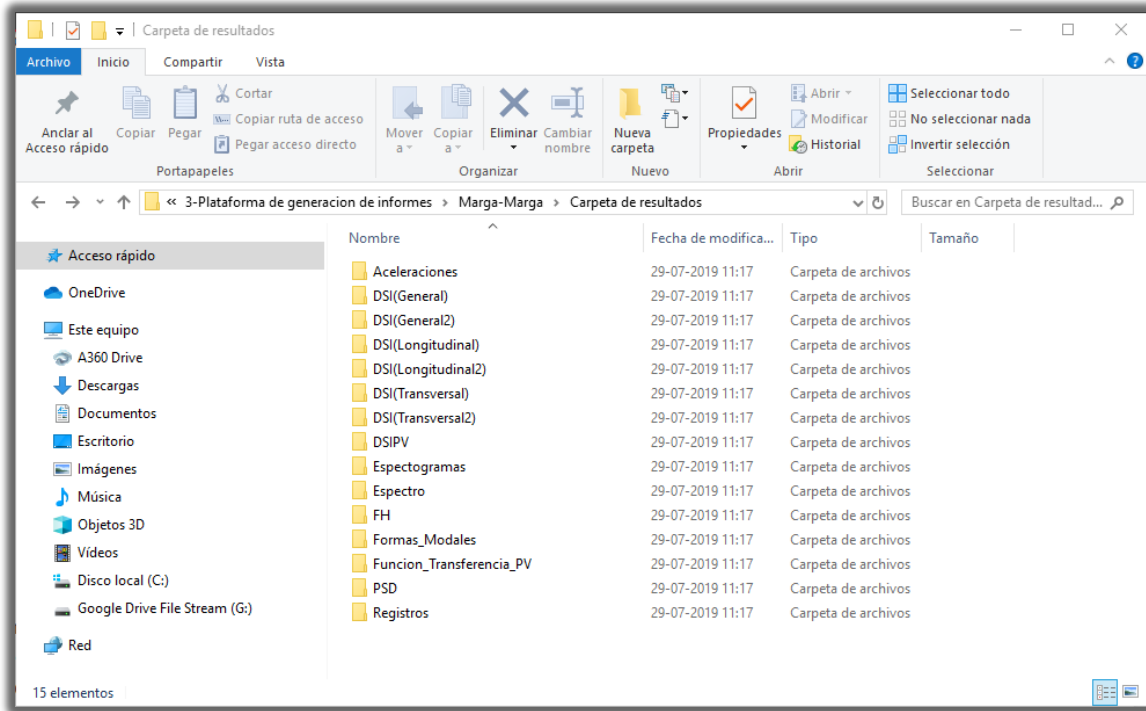


Figura 5-2: Carpeta de resultados

5.1.2 Funciones Matlab

Carpeta que contiene las subrutinas de MATLAB que permiten realizar los cálculos de las diversas funciones y métodos de análisis que conforman a la plataforma de generación automática de informes sísmicos. En esta carpeta se encuentran las rutinas orientada al usuario “generación_informe_M_M.m”, “Calibra_DSI_PV.m” y “Calibracion_dsi_general.m”, que permiten configurar y calibrar la plataforma, además de calibrar sus resultados entregados. Vale la pena recalcar que no se debe cambiar el nombre de las rutinas, ni eliminar archivos, ya que cualquier cambio u omisión generara que la plataforma no funcione.

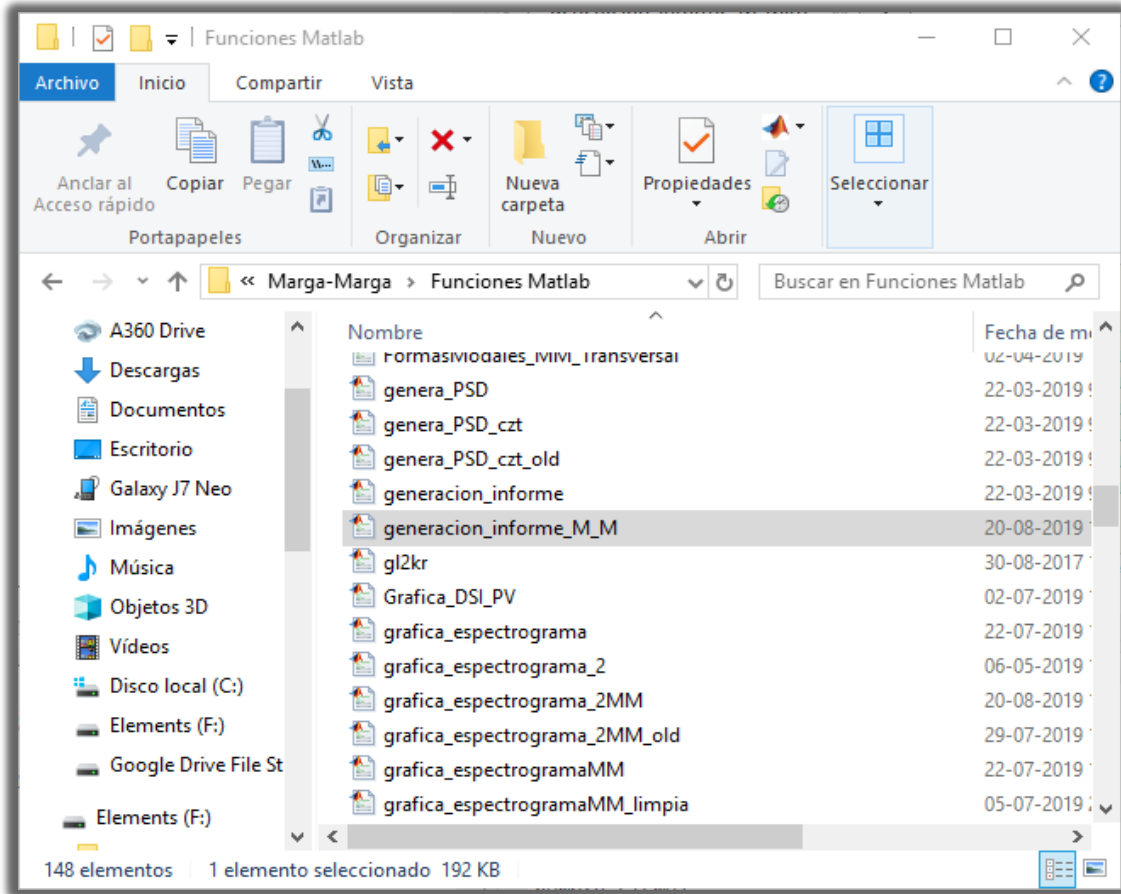


Figura 5-3: Carpeta Funciones Matlab

5.1.3 Informe_2018_X

Esta carpeta se genera de manera automática al ejecutar la función “generación_informe_M_M.m”, y es donde se almacenan los resultados del análisis realizado. Dentro de los archivos generados, se resalta a “Informe Base Marga Marga_v2.tex”, que es el archivo en extensión LATEX, que, al abrir y compilar (en el programa Texmaker, por ejemplo), genera el informe final en formato PDF.

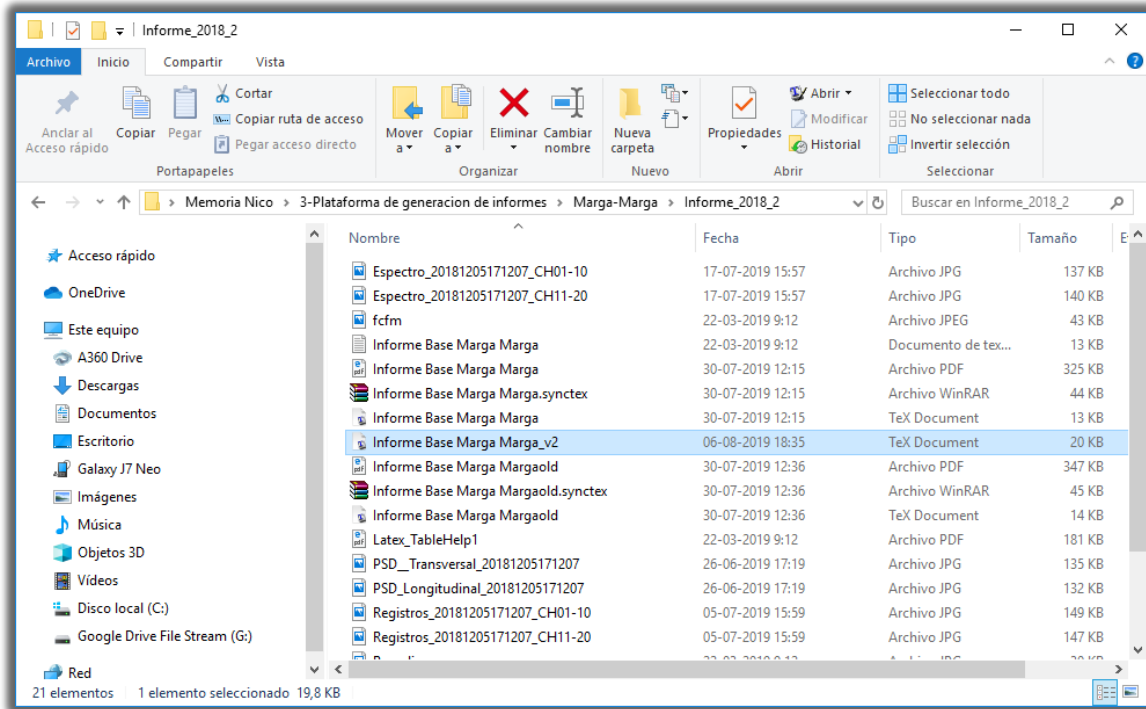


Figura 5-4: Carpeta Informe_2018_X

5.1.4 Informe base

El funcionamiento de la plataforma se basa en analizar registros sísmicos a través de diferentes métodos programados en MATLAB, los cuales son transformados a un código interpretable por programas lectores de LATEX, el cual es montado sobre un informe base, también en formato LATEX. Los archivos que conforman a este informe base son los que se almacenan en la carpeta informe base (Figura 5-5), por lo que cualquier cambio que se genere en estos, podría generar que el archivo final no pueda ser interpretado por lectores de LATEX. El detalle de los archivos que forman el informe base se agrega en el Anexo B, subsección Contenido informe base.

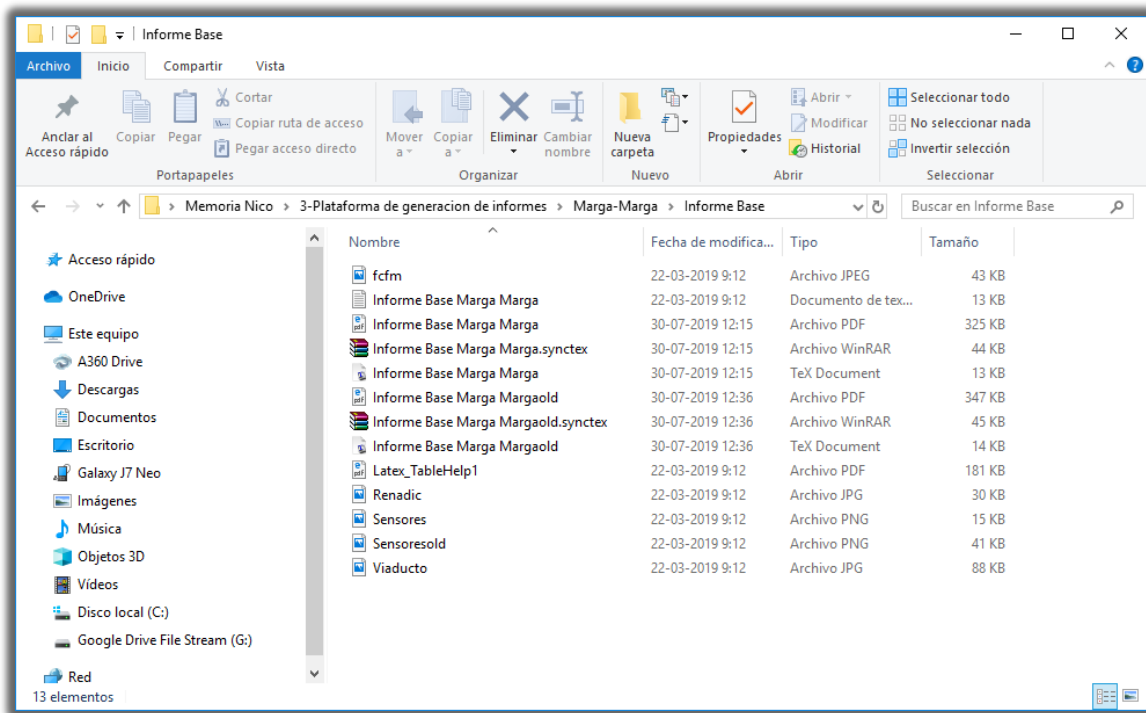


Figura 5-5: Carpeta informe base

5.1.5 Registros marga-marga

La presente carpeta contiene una carpeta llamada “sismos”, la cual contiene subcarpetas que almacenan los registros sísmicos por año y un archivo en extensión Excel de nombre “Lista_Sismos.xls”, el cual debe ser completado cada vez que se incluyen nuevos registros (proceso que se detalla en el subcapítulo (5.3.4). En las subcarpetas de registros sísmicos por año, se almacenan los diversos sismos según se observa en la Figura 5-6, en la cual se puede apreciar que cada registro se almacena en una carpeta diferente, cuyos 6 primeros números del nombre de la carpeta, se correlación con la fecha de ocurrencia del evento sísmico, dividiéndose en 3 pares de números, donde el primer par hace referencia al año en donde ocurre el sismo, el segundo par hace referencia al mes donde ocurre el evento y el tercer par corresponde al día del mes de ocurrencia del sismo. A modo de ejemplo, si el sismo ocurre el 1 de abril de 2018, la codificación de la carpeta será 180104. Es muy importante que se mantenga este formato de nombres, ya que la plataforma basa su sistema de identificación de fechas en él. Cabe mencionar que esta carpeta corresponde exactamente a la carpeta que se tiene en el computador central de RENADIC para

almacenar los archivos. En este contexto, se menciona que la plataforma trabaja con los archivos en su formato V1. Es decir, los archivos *.evt se deben transformar en formato V1 utilizando el programa SMA de Kinemetrics (proceso que se realiza normalmente para todo evento sísmico registrado por RENADIC).

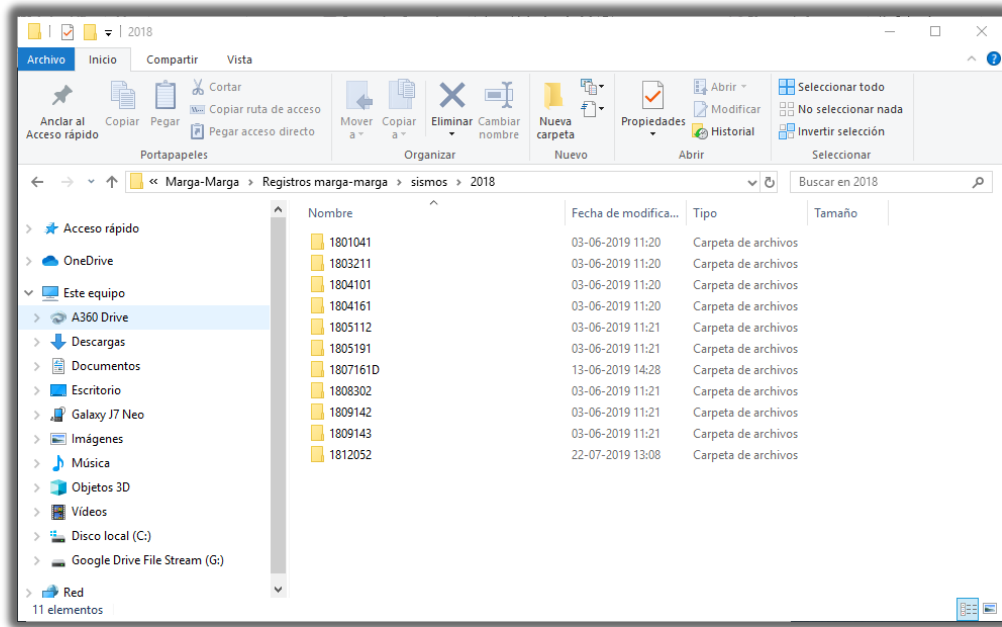


Figura 5-6: Carpeta de registros marga-marga

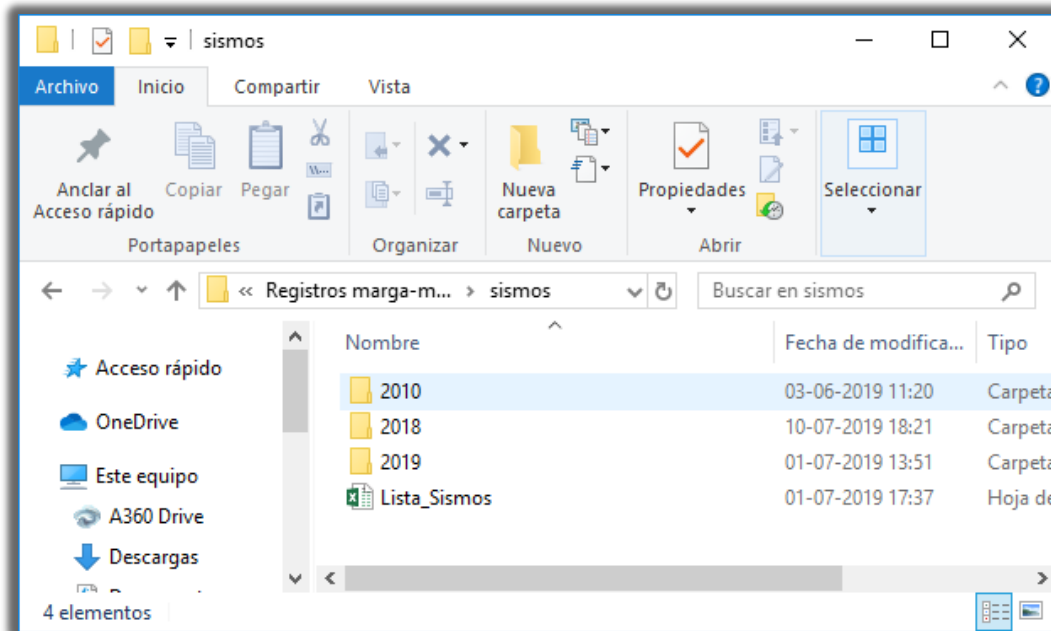


Figura 5-7: Biblioteca de sismos del RENADIC

5.2 Uso de la interfaz de la plataforma

En el presente subcapítulo, se entregan las directrices necesarias para el correcto uso de la plataforma de generación automática de informes sísmicos del viaducto El Salto, de tal manera de especificar las diferentes zonas que componen al código, y sus respectivas funciones, además de dar a entender cuáles zonas son orientadas hacia el usuario, y como estas se pueden configurar, de tal forma de generar un informe con los resultados y análisis sísmicos deseados.

Para poder acceder a la interfaz de la plataforma, el código se encuentra en la carpeta “Funciones Matlab”, y su nombre es “generacion_informe_M_M.m”, este es un código que se divide en 9 zonas principales, cada una representando diferentes funcionalidades de la plataforma, de las cuales las dos primeras son orientadas al usuario para que pueda configurar el uso del programa según sus necesidades.

5.2.1 Zona de configuración de informes

Esta zona es la más relevante para el usuario (Figura 5-8), ya que sirve para configurar que registros sísmicos serán analizados y bajo qué métodos serán analizados, para esto se debe completar una serie de variables que son descritas a continuación.

```
%% 1-ZONA CONFIGURACIÓN DE INFORME
carpeta_informe='C:\Users\Matias\Desktop\Memoria Nico\3-Plataforma de generacion de informes\Marga-Marga';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Carpetas_informe define la ruta dentro del ordenador en donde se almacena la plataforma
%ES LA ÚNICA RUTA QUE SE NECESITA CAMBIAR PARA HACER FUNCIONAR LA PLATAFORMA EN OTRO ORDENADOR
%Es importante que esta ruta sea hasta el punto en donde se almacenan las carpetas
%-Carpetas de resultados
%-Funciones Matlab
%-Informe base
%-Informe evento X
%-Registro marga-marga
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

carpeta_jpg='Informe_2018_2'; %Nombre de la carpeta que se crea en la ruta principal donde se guarda y genera informe
% Se debe definir que eventos sísmicos se quieren procesar para esto se define un lapsus de
% tiempo dentro del cual estarán los eventos
fechaini='2018-12-05'; %-fechaini: Fecha de inicio del lapsus de tiempo (Formato:'aaaa-mm-dd').EJ:fechaini='2018-07-16'
fechafin='2018-12-05'; %-fechafin: Fecha de término del lapsus de tiempo (Formato:'aaaa-mm-dd').EJ:fechafin='2018-07-16'
```

Figura 5-8: Zona de configuración de informe

- ❖ La variable “carpeta_informe” es en donde se especifica la ubicación de la plataforma en el ordenador del usuario, es importante que la ruta especificada sea hasta la carpeta Marga-Marga (C:\...\Plataforma de generación de informes\Marga-Marga).
- ❖ La variable “carpeta_jpg” es el nombre de la carpeta que crea la plataforma, y en donde se almacenan los resultados de los eventos sísmicos analizados.
- ❖ La variable “fechaini” es la fecha inicial del lapsus de tiempo de los eventos que se reportarán en el informe.
- ❖ La variable “fechafin” es la fecha final del lapsus de tiempo de los eventos que se reportarán en el informe.
- ❖ La variable “calcula_todo” define si los resultados de los eventos de interés son calculados nuevamente, o si se ocupan los resultados almacenados de resultados previos, esta distinción se realiza mediante el uso de un valor 1 o 0, respectivamente (en caso de que los resultados no se hayan calculado anteriormente, el sistema lo reconoce y los calculará).

```

calcula_todo=0; %En caso de ser 1 calcula todos los métodos seleccionados
%En caso de ser 0
% -Busca los resultados de los métodos seleccionados y en caso de encontrarlos los agrega al
% informe sin calcular
% -Busca los resultados de los métodos seleccionados y en caso de no encontrarlos los recalcula
%En esta zona se define que información se agrega al informe según
% -Si es 1, se agrega
% -Si es 0, No se agrega

si_registros=1; %Calcula los registros de aceleraciones por canal en dos gráficos(10 canales por gráfico) y los agrega al informe
si_espectro=1; %Calcula los espectros elásticos por canal en dos gráficos (10 canales por gráfico) y los agrega al informe
si_PSD=1; %Calcula los espectros de potencia de los 20 canales y funciones de transferencia de los pares seleccionados
si_FH=0; %Calcula la función transferencia entre los pares de canales indicados, requiere que PSD=1.
%Se configura en la sección 2.1
si_DSIL=0; %Calcula El DSI para entradas [] y salidas [], agregando un diagrama de estabilidad y tabla resumen al informe
%Se configura en la sección 2.2
si_FML=0; %Calcula las formas modales asociadas al DSI para entradas [] y salidas [], agregando un gráfico al informe
si_DSIL2=0; %Calcula El DSI para entradas [] y salidas [], agregando un diagrama de estabilidad y tabla resumen al informe
%Se configura en la sección 2.2
si_FML2=0; %Calcula las formas modales asociadas al DSI para entradas [] y salidas [], agregando un gráfico al informe
si_DSIT=0; %Calcula El DSI para entradas [] y salidas [], agregando un diagrama de estabilidad y tabla resumen al informe
%Se configura en la sección 2.2
si_FMT=0; %Calcula las formas modales asociadas al DSI para entradas [] y salidas [], agregando un gráfico al informe
si_DSIT2=0; %Calcula El DSI para entradas [] y salidas [], agregando un diagrama de estabilidad y tabla resumen al informe
%Se configura en la sección 2.2
si_FMT2=0; %Calcula las formas modales asociadas al DSI para entradas [] y salidas [], agregando un gráfico al informe
si_DSIG=0; %Calcula El DSI para entradas [] y salidas [], agregando un diagrama de estabilidad y tabla resumen al informe
%Se configura en la sección 2.2
si_DSIG2=0; %Calcula El DSI para entradas [] y salidas [], agregando un diagrama de estabilidad y tabla resumen al informe
%Se configura en la sección 2.2
si_CSN=0; %Agrega el informe generado por el CSN del evento(si es que esta)
% Métodos de pequeñas ventanas
si_PSDPV=0; %Calcula el espectrograma de 18 canales
si_PSDPVH=0; %Calcula la función de transferencia en pequeñas ventanas de tiempo para los pares seleccionados
si_DSIPV=0; %Agrega el informe el gráfico de frecuencia en pequeñas ventanas durante el evento para el caso 1
%Los parámetros para setear este método se configuran en 2.5
si_DSIPV2=0; %Agrega el informe el gráfico de frecuencia en pequeñas ventanas durante el evento para el caso 2
%Los parámetros para setear este método se configuran en 2.5
si_DSIPV3=0; %Agrega el informe el gráfico de frecuencia en pequeñas ventanas durante el evento para el caso 3
%Los parámetros para setear este método se configuran en 2.5

```

Figura 5-9: Métodos a seleccionar en la zona de configuración

Las variables que se encuentran en seguida de la variable “calcula_todo” (Figura 5-9), son las que definen que métodos serán incluidos en el informe, para esto se ocupa el valor 1, si se desea agregar el método, o 0 si no se desea incluir el método. Además, si se asigna el valor 0 a alguno de los métodos, pero estos no tienen resultados previos asociados, la plataforma reconoce la falta de resultados previos, y recalcula de todas formas el método. Para ejemplificar la metodología de selección de las variables, se entrega el diagrama de flujo de la Figura 5-10. Además, se muestra la metodología de selección de las variables de cada método en los diagramas de flujo de la Figura 5-11 y de la Figura 5-12.

El detalle sobre que metodología activa cada una de las variables de la Figura 5-9, se puede encontrar en el Anexo B, sub sección Variables de selección de métodos. En complemento de las variables de selección de métodos, la plataforma siempre añade al informe una tabla resumen que contiene información variada de los eventos sísmicos analizados en el informe. Además, añade una tabla por evento, con la aceleración, velocidad y desplazamiento máximo, registrado por cada uno de los canales durante el sismo. Asimismo, genera una tabla por evento sísmico, de la amplificación sísmica registrada durante el evento.

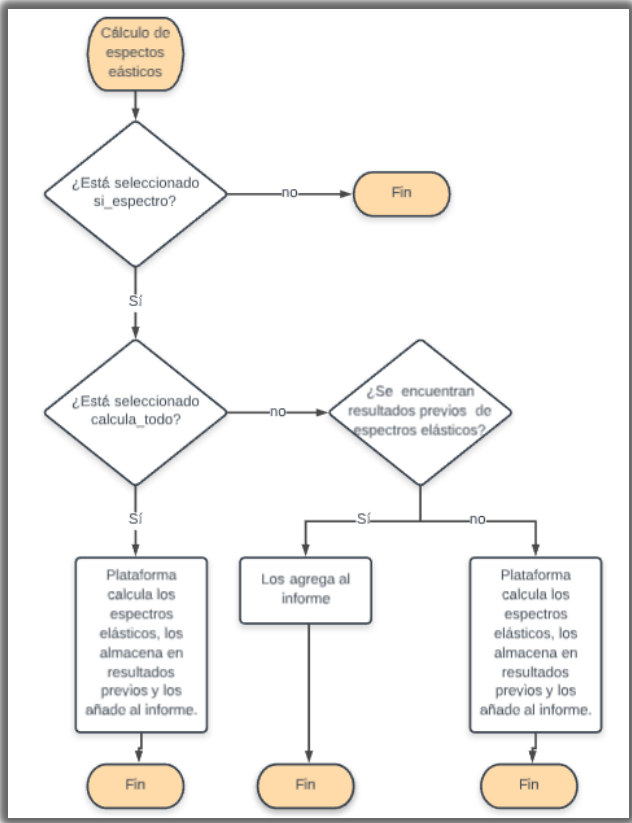


Figura 5-10: Diagrama de flujo sobre selección de cálculo de métodos de informe

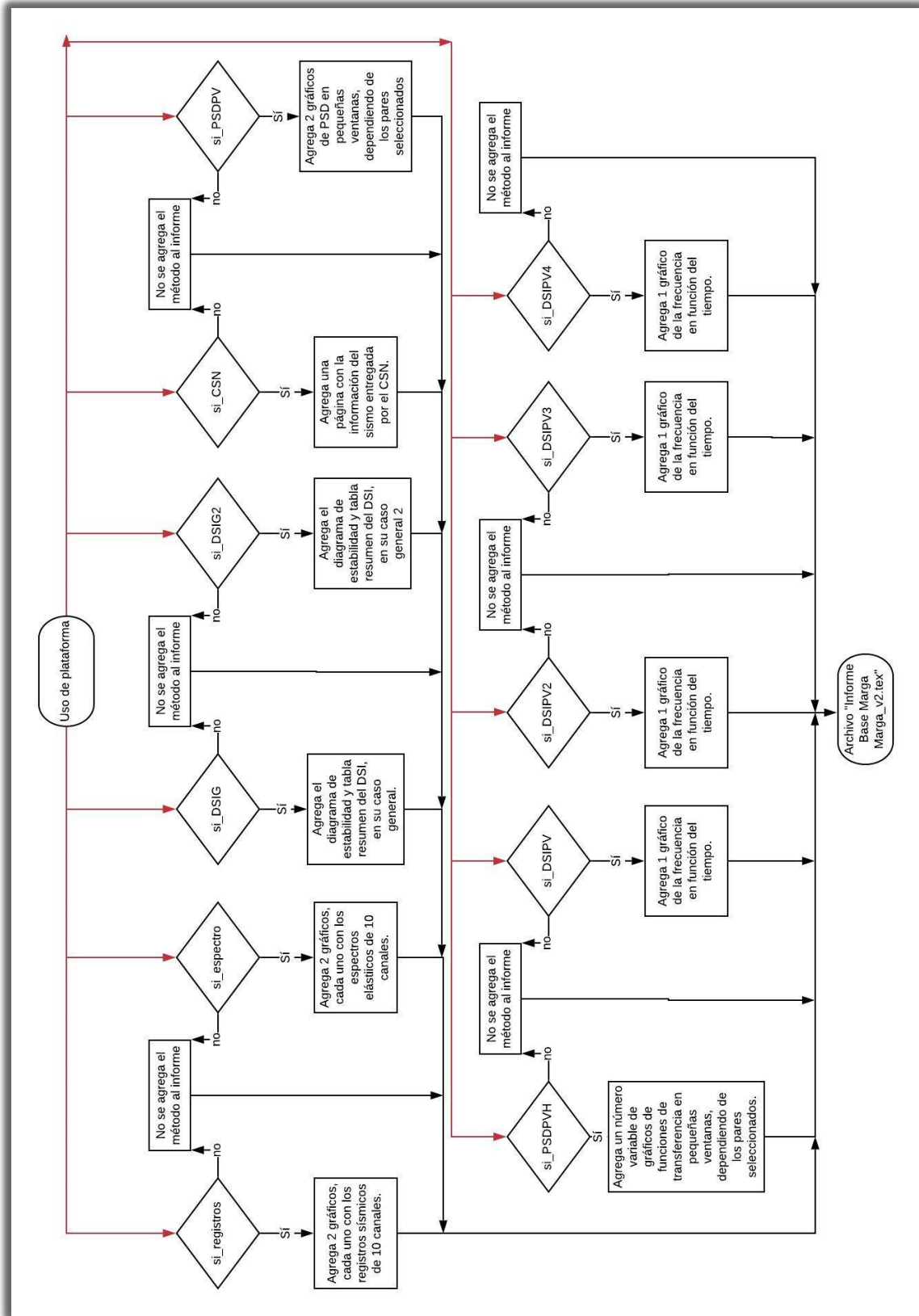


Figura 5-11: Diagrama de flujo del funcionamiento de la plataforma

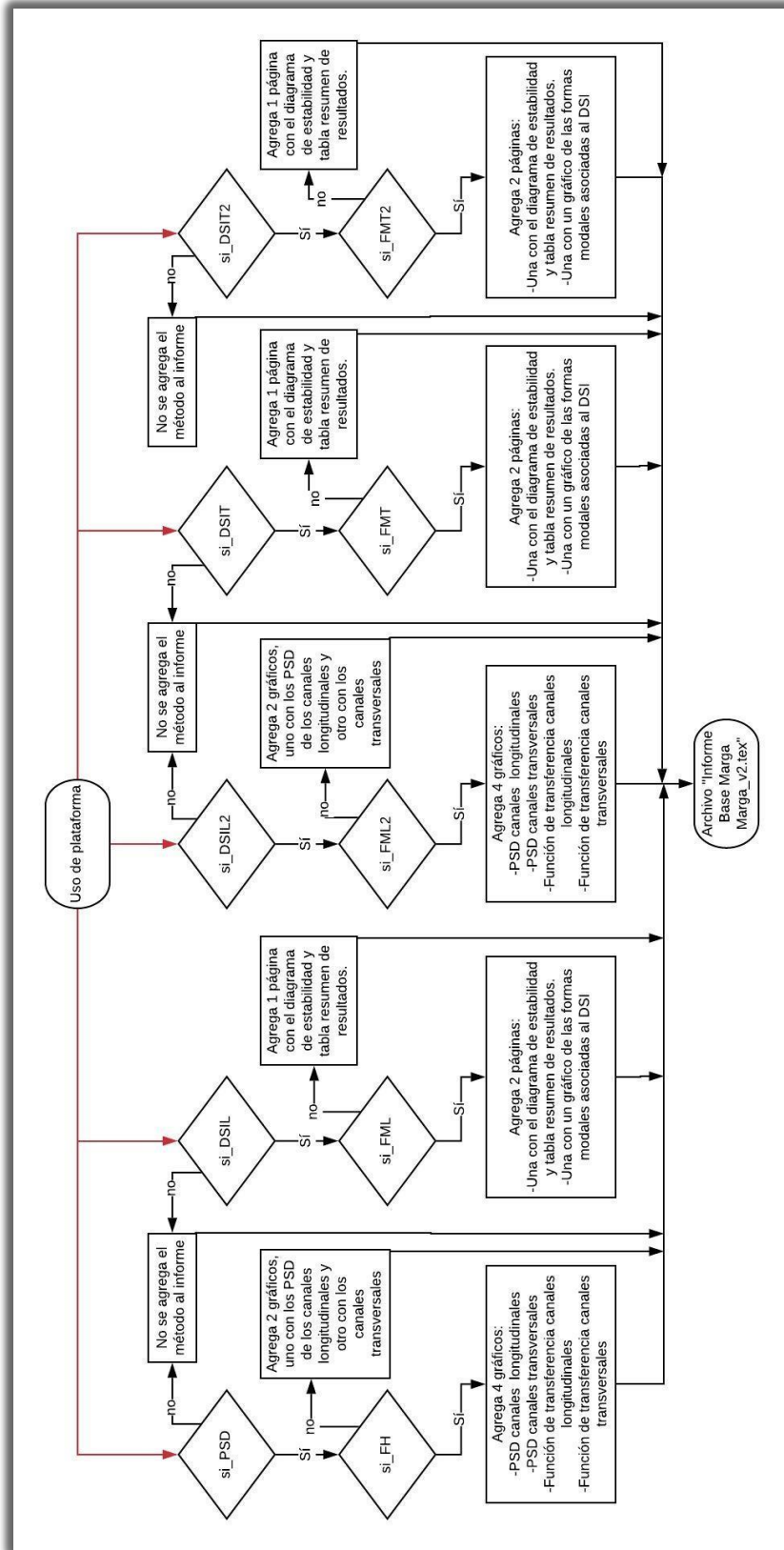


Figura 5-12: Diagrama de flujo del funcionamiento de la plataforma

5.2.2 Zona de configuración de métodos

La zona de configuración de métodos es de utilidad para el usuario, siempre que se desee variar los parámetros que configuran los métodos integrados en la plataforma, ya que la interfaz está programada para permitir variaciones en la configuración de los siguientes métodos:

- ❖ Espectros de densidad de potencia.
- ❖ Espectros de densidad de potencia por pequeñas ventanas de tiempo.
- ❖ Funciones de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo.
- ❖ Método de identificación DSI.
- ❖ Método de identificación DSI por pequeñas ventanas.

La primera sección de la zona de configuración de métodos (Figura 5-13), contiene variables que permiten cambiar las configuraciones de parámetros generales. El detalle de las variables de esta zona se puede encontrar en el Anexo B, subsección Parámetros generales.

```

** 2-ZONA CONFIGURACIÓN DE MÉTODOS
#Parámetros generales
ubicacion_M_M=[-33.048,-71.509]; %LAT y LONG Viaducto Marga Marga.EJ:ubicacion_M_M=[-33.048,-71.509]
Fs=200; %Frecuencia de muestreo de los acelerómetros.EJ:Fs=200
N=8; %Orden de filtro butter.EJ:N=8;
Wn=30*2/Fs; %Frecuencia de filtrado.EJ:Wn=30*2/Fs;
CoordenadasM_M=[ 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,7;0,7;0,7;-183,0;-183,0;-183,0;-100,7;0,-7;100,7;0,0;0,0;0,0;200,0;200,0];
CoordenadasM_Mold=[ 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,7;0,7;0,7;-183,0;-183,0;-183,0;-100,7;0,-7;100,7;200,0;200,0;200,0;0,0;0,0;0,0];

```

Figura 5-13: Configuración de parámetros generales

La segunda sección de la zona de configuración de métodos permite cambiar la configuración de los espectros de densidad de potencia y función de transferencia. El detalle de las variables de esta zona se puede encontrar en el Anexo B, subsección Parámetros de los PSD y Funciones de transferencia.

```

** 2.1- Parámetros PSD
ParesLoid=[15 1;1 4;1 7;4 7;10 7;19 10;10 12;10 18]; %Pares Longitudinales a comparar mediante función de transferencia. EJ:[] [salida,entrada;salida,entrada]. (versión pre-2018)
ParesToId=[21 3;3 6;3 9;6 9;11 9;8 11;11 17]; %Pares Transversales a comparar mediante función de transferencia. EJ:[] [salida,entrada;salida,entrada]. (versión pre-2018)
ParesL=[16 1;1 4;1 7;4 7;10 7;16 10;10 12;10 20]; %Pares Longitudinales a comparar mediante función de transferencia. EJ:[] [salida,entrada;salida,entrada]. (versión post-2018)
ParesT=[18 3;3 6;3 9;6 9;11 9;8 11;11 19]; %Pares Transversales a comparar mediante función de transferencia. EJ:[] [salida,entrada;salida,entrada]. (versión post-2018)
Tesp=7; %Paso de tiempo para el calculo de las ventanas de hanning .EJ: Tesp=7
windows=hann(Tesp*Fs); %Ventana para calculo de PSD (noverlap length/2)
freq_vector=[0:0.01:10]; %Vector de frecuencia para calculo de PSD .EJ:
FreqIdem=[]; %Frecuencias a identificar como peaks en los gráficos

```

Figura 5-14: Configuración de los parámetros de los espectros de densidad de potencia

La tercera sección de la zona de configuración de métodos (Figura 5-15), permite cambiar la configuración de los espectros de densidad de potencia por pequeñas ventanas de tiempo. El detalle de las variables de esta zona se puede encontrar en el Anexo B, subsección Parámetros espectrogramas.

```

%% 2.2- Parámetros Espectrograma
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
flim=[0,2]; %Rango de frecuencias a mostrar en los espectrogramas. EJ:flim=[0,10]
canalesPSDPVLold=[19,10,1,7]; %Vector de 4 números con la numeración antigua de los canales longitudinales a gráficar como espectrogramas.
canalesPSDPVLnew=[16,10,1,7]; %Vector de 4 números con la numeración nueva de los canales longitudinales a gráficar como espectrogramas. EJ:
canalesPSDPVold=[21,11,3,9]; %Vector de 4 números con la numeración antigua de los canales transversales a gráficar como espectrogramas.
canalesPSDPVnew=[19,11,3,9]; %Vector de 4 números con la numeración nueva de los canales transversales a gráficar como espectrogramas. EJ:
canalesPSDPVold=[20,2,5,8]; %Vector de 4 números con la numeración antigua de los canales verticales a gráficar como espectrogramas. EJ:
canalesPSDPVnew=[18,2,5,8]; %Vector de 4 números con la numeración nueva de los canales verticales a gráficar como espectrogramas. EJ:ca
TespPSD=10; %Paso de tiempo para el calculo de las ventanas de hanning .EJ: Tesp=7
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Figura 5-15: Configuración de los parámetros de los espectros de densidad de potencia por pequeñas ventanas

La cuarta sección de la zona de configuración de métodos (Figura 5-16) permite cambiar la configuración de las funciones de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo. El detalle de las variables de esta zona se puede encontrar en el Anexo B, subsección Parámetros función de transferencia por pequeñas ventanas.

```

%% 2-3- Parámetros Función transferencia en pequeñas ventanas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
flimFHPV=[0,2]; %Rango de frecuencias a cortar y mostrar en los espectrogramas
ParesL1oldFHPV=[1 19;4 1;7 1;7 4]; %Pares Longitudinales a comparar mediante función de transferencia(Toma máximo 4 pares).
ParesL2oldFHPV=[7 10;10 19;12 10;18 10]; %Pares Longitudinales a comparar mediante función de transferencia(Toma máximo 4 pares).
ParesT1oldFHPV=[3 21;6 3;9 3;9 6]; %Pares Transversales a comparar mediante función de transferencia(Toma máximo 4 pares).
ParesT2oldFHPV=[9 11;11 8;17 11]; %Pares Transversales a comparar mediante función de transferencia(Toma máximo 4 pares).
ParesL1FHPV=[1 16;4 1;7 1;7 4]; %Pares Longitudinales a comparar mediante función de transferencia(Toma máximo 4 pares).
ParesL2FHPV=[7 10;10 16;12 10;20 10]; %Pares Longitudinales a comparar mediante función de transferencia(Toma máximo 4 pares).
ParesT1FHPV=[3 18;6 3;9 3;9 6]; %Pares Transversales a comparar mediante función de transferencia(Toma máximo 4 pares).
ParesT2FHPV=[9 11;11 8;19 11]; %Pares Transversales a comparar mediante función de transferencia(Toma máximo 4 pares).
TespFHPV=10; %Paso de tiempo para el calculo de las ventanas de hanning .EJ: Tesp=7
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Figura 5-16: Configuración de los parámetros de la función transferencia por pequeñas ventanas de tiempo

La quinta sección de la zona de configuración de métodos (Figura 5-17), permite cambiar la configuración de los diferentes métodos de identificación DSI. La plataforma está programada para realizar 6 métodos de identificación DSI, los cuales presentan 3 parámetros en común a configurar, para luego configurar el método de identificación DSI en específico, junto a su respectiva forma modal. El detalle de las variables de esta zona se puede encontrar en el Anexo B, subsección Parámetros método de identificación DSI.

```

%% 2.4- Parámetros DSI
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nFsi=1; %Factor de remuestreo. EJ:nFsi=1 %
validacion=50; %Porcentaje de MINUTO que no se identifica y se predice en el DSI MIMO %
tolfi=5/100; %Tolerancia para identificar F. modales en tabla de DSI.EJ: 5/100 %
%
% Casos a analizar
%
% CASO 1 DSI (LONGITUDINAL)
ch_output=[7,12,20]; %Canales de salida Caso 1 (Post dolomite) %
ch_input=[4]; %Canales de entrada Caso 1 (Post dolomite) %
ch_outputold=[7,12,18]; %Canales de salida Caso 1 (Pre dolomite) %
ch_inputold=[4]; %Canales de entrada Caso 1 (Pre dolomite) %
GDL1=120; %Número de grados de libertad utilizados para calcular el DSI %
tolerancia=[3.5,5,5]; %Tolerancia para estabilizar el diagrama de estabilidad (forma [f,beta,F.Modales]) %
tolFl=3.5/100; %Tolerancia para identificar frecuencia en tabla de DSI.EJ: 3/100 %
Ncoincidencias1=7; %Numero de coincidencias usado para indentificar F,B,phi en la tabla de DSI %
% AJUSTES FORMAS MODALES DSI CASO 1
dir_canL1=[1,1,1]; %Dirección de los canales de salida. (1 si es longitudinal, 2 si es Transversal.Ej: [1,1,1] %
fbuscl=0; %Frecuencias a identificar en las formas modales. Si es 0, se utilizan las 4 primeras frecuencias %
% que aparecen en la tabla del DSI. EJ:fbuscl=[1.5,2.2,3];
nantes1=GDL1-10; %Cantidad de datos previos dentro de los que busca la frecuencia dentro del diagrama de estabilidad %
%EJ:nantes4=GDL4-10;
GDLantes1=GDL1-10; %Cantidad de GDL's previos dentro de los que busca la frecuencia dentro del diagrama de estabilidad %
%EJ:GDLantes=GDL4-10;
Toll=[20,20,20]; %Tolerancia de diferencia entre los datos del diagrama de estabilidad aceptable.EJ:Toll4=[10,10,10]; %
Tolfb1=[10]; %Tolerancia de diferencia entre la frecuencia identificada en las formas modales y la identificada en %
%la tabla asociada al diagrama de estabilidad. EJ:Tolfb4=[10];
ajusteL1=2; %Aleja el gráfico en formas modales Longitudinales 1, al aumentar el valor. EJ:ajusteL1=1.5; %
%

```

Figura 5-17: Configuración de los parámetros del método de identificación DSI

La sexta sección de la zona de configuración de métodos (Figura 5-18), permite cambiar la configuración de los diferentes métodos de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo. La plataforma está programada para realizar 4 métodos de identificación DSI, los cuales presentan 6 parámetros en común a configurar, para luego configurar el método de identificación DSI en específico. El detalle de las variables de esta zona se puede encontrar en el Anexo B, subsección Parámetros método DSI por pequeñas ventanas.

```

%% 2.5- Parámetros DSI pequeñas ventanas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
GDLDSIPV=120; %Grados de libertad a utilizar en el DSI de pequeñas ventanas. EJ: GDLDSIPV=100
TDSIvent=15; %Tiempo de ventana (seg) para DSI (si es menor al mínimo, se emplea el mínimo). EJ:TDSIvent=4
FsDSIPV=Fs; %Frecuencia de muestreo registro original. EJ:
meresampleo=0; %Si es 1 se resamplea el registro. EJ: meresampleo=0
Fsnew=0; %Frecuencia a la que se resamplea el registro. EJ:Fsnw=0
validacionDSIPV=50; %Porcentaje de MINUTO que no se identifica y se predice. EJ:validacionDSIPV=50
%Casos a analizar bajo DSI en pequeñas ventanas de tiempo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
translapofl=0.997; %Traslapeo entre ventanas de tiempo(entre 0 y 1). EJ:translapofl=0.997;
entradas1=[4]; %Canales inputs Para MIMO DSI pequeñas ventanas caso 1. EJ:entradas1=[4]
entradas1V=[4]; %Canales inputs Para MIMO DSI pequeñas ventanas caso 1. EJ:entradas1=[4] (pre-2018)
salidas1=[7,12,20]; %Canales outputs Para MIMO DSI pequeñas ventanas caso 1. EJ:salidas1=[7,12,20]
salidas1V=[7,12,18]; %Canales outputs Para MIMO DSI pequeñas ventanas caso 1. EJ:salidas1=[7,12,20] (pre-2018)
%Criterio similitud gráfico DSI Pequeñas ventanas
cff=[0.2,0.10,0.2]; %Criterio de similitud de frecuencia en identificación de frecuencia para pequeñas ventanas. EJ:cff=0.8
cmac=[0.8,0.8,0.8]; %Criterio de similitud de MAC en identificación de frecuencia para pequeñas ventanas. EJ:cmac=0.85
cmacs=[0.85,0.85,0.9]; %Criterio de similitud de Super MAC en identificación de frecuencia para pequeñas ventanas. EJ:cmacs=0.85
y1l=0; %Límites inferior en y del gráfico de DSIPV caso 1. EJ: y=1
y2l=4; %Límites superior en y del gráfico de DSIPV caso 1. EJ: y=1
nFsDSIPV1=1; %Factor de remuestreo (Fs/nFs debe ser un numero entero) y Reducen length(a)/nFsi para el caso 3. Ej:2

```

Figura 5-18: Configuración de los parámetros del método de identificación DSI por pequeñas ventanas

5.2.3 Zona de directorios y Zona de etiquetas de gráficos

La zona de directorios es el área del código en donde se definen las diversas carpetas y ubicaciones que fueron previamente tratadas en el capítulo 5.1. Mientras que la zona de etiquetas de gráficos es el área del código en donde se definen las etiquetas que aparecen en las diversas graficas de resultados, que genera la plataforma. La presente zona define las etiquetas de los gráficos de:

- Registros de aceleraciones
- Espectros elásticos
- Espectros de densidad de potencia
- Gráficos de formas modales

En adición a los gráficos anteriores, en esta zona se identifica que canales fueron seleccionados como entradas o salidas para el método de identificación DSI y se crea el código necesario para que en el informe final en LATEX, aparezca de manera automática, que canales fueron ocupados en el análisis de cada uno de los métodos DSI implementados.

5.2.4 Comienzo de cálculos y zona de resultados previos

La zona de comienzo de cálculos marca el fin de la zona de definición de variables para el código de la plataforma, y da paso al inicio del cálculo de los diversos resultados generados por la plataforma para el análisis sísmico de la estructura.

La zona de resultados previos es el área del código anterior al uso de las capacidades de cálculo del ordenador, en la que, si fue indicado en la zona de configuración de informe, la plataforma verifica si existen resultados previos de los métodos escogidos a ser añadidos al informe, y de existir estos, resultados, los agrega al informe sin hacer uso de la memoria del ordenador.

5.2.5 Zona de resultados

La zona de resultados es el área del código en donde se realiza el cálculo, y se generan las gráficas a ser añadidas al informe. En la presente zona se realiza el cálculo de:

- Tabla de resumen de eventos sísmicos.
- Tabla de aceleraciones, desplazamientos y velocidades máximas por evento.
- Tabla de amplificación sísmica por evento.
- Registros de aceleraciones.
- Espectros elásticos.
- Espectros de densidad de potencia.
- Funciones de transferencia.
- Método de identificación DSI, y sus respectivas formas modales.
- Espectros de densidad de potencia por pequeñas ventanas de tiempo.
- Funciones de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo.
- Método de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo.

5.2.6 Zona de guardado de resultados y zona código LATEX

La zona de guardado es el área del código en donde se almacenan los resultados calculados a lo largo del programa y se almacena en su respectiva carpeta de resultados previos. Mientras que la zona de código LATEX, es el área en donde se genera el código necesario para transformar los resultados obtenidos en MATLAB, a un lenguaje LATEX, de tal forma de poder montar este código sobre el informe base.

5.3 Funcionamiento general de la plataforma

El presente capítulo tiene como objetivo entregar una descripción sobre el funcionamiento general de la plataforma, de tal manera que el usuario comprenda como la conjugación de diversos programas y procesos, confluyen para generar un archivo en extensión PDF sobre el análisis sísmico del viaducto El Salto, a partir de la biblioteca de registros sísmicos del RENADIC. Para esto, se describe que

información y carpetas se deben preparar antes del uso del código de MATLAB, los programas necesarios para compilar el informe y como realizar la compilación.

5.3.1 Biblioteca de registros sísmicos del RENADIC

La información principal y fundamental que ocupa la plataforma para realizar su análisis, son los diversos registros sísmicos del viaducto El Salto que contiene la biblioteca del RENADIC, los cuales se encuentran en una extensión correspondiente a la marca de acelerómetros “KINEMATRICS”, la cual debe ser convertida a un formato *.txt, el cual es leído y transformado por la interfaz a un archivo *.mat, que pueda ser trabajado por el código MATLAB.

5.3.2 Informe base en LATEX

Otra información primordial que requiere la plataforma para generar el informe final, son los informes base en LATEX, sobre los cuales la plataforma monta los resultados y códigos generados durante el análisis.

En la carpeta de informe base, se encuentran dos archivos de extensión *.tex, uno es el “Informe Base Marga Marga” y otro es el “Informe Base Marga Margaold”. Estos archivos contienen un código, que al ser compilado por el programa TEXWORKS, muestran un archivo de 9 páginas, las que incluyen:

- Una portada.
- Un índice.
- Una introducción.
- Un capítulo sobre la instrumentación en el puente.
- Una imagen con la ubicación de los sensores en el viaducto.
- Un capítulo de referencias.
- Un capítulo de resumen de registros sísmicos.
- Un capítulo de resumen de respuestas máximas medidas.

Es necesaria la presencia de dos archivos base diferentes, debido a que la instrumentación presente en el viaducto varió en julio del año 2018, por lo que se requiere modificar la información entregada sobre esta en cada uno de los informes.

Dentro de las páginas mencionadas anteriormente, existen palabras claves (Figura 5-19) a lo largo del código, las cuales son buscadas por la plataforma para ser reemplazadas por líneas de código generadas durante su ejecución. Estas palabras claves y sus respectivos resultados son los siguientes.

- Rango de fechas: Palabra clave que es modificada por el rango de fechas dentro del cual se realiza el análisis de registros sísmicos.
- Smayor: Palabra clave que es modificada por la magnitud Richter y fecha del sismo que provoca las mayores aceleraciones en la estructura.
- RRTablaSismoResumen: Palabra clave que es modificada por la tabla resumen de eventos sísmicos.
- RRTablaGeneral: Palabra clave que es modificada por la tabla de aceleraciones, desplazamientos y velocidades máximas por sismo, y por la tabla de amplificación sísmica por sismo.
- Neventos: Palabra clave que es modificada por el número de eventos que suceden entre el rango de fechas.
- amaxP: Palabra clave que es modificada por la aceleración máxima transversal y longitudinal, registrada en la superestructura, durante el rango de fechas estudiado.
- amaxc4: Palabra clave que es modificada por la aceleración máxima transversal y longitudinal, registrada en el campo libre de la cepa 4, durante el rango de fechas estudiado.
- asupmaxc4: Palabra clave que es modificada por la aceleración máxima transversal y longitudinal, registrada en la parte superior de la cepa 4, durante el rango de fechas estudiado.
- RReventos: Palabra clave que es modificada por un código que genera nuevos capítulos en el informe, donde cada capítulo contiene los resultados de un evento sísmico. Además, estos capítulos poseen subcapítulos asociados a un respectivo método de análisis y están programados a aparecer en el siguiente orden:
 - Resumen de registros sísmicos.
 - Resumen de espectros elásticos.
 - Resumen de espectros de potencia.
 - Resumen de espectros de potencia por pequeñas ventanas de tiempo.
 - Resumen de funciones de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo.

- Resumen de métodos de identificación de propiedades dinámicas (DSI).
- Resumen de métodos de identificación de propiedades dinámicas (DSI) por pequeñas ventanas de tiempo.
- Resumen de CSN.

2. Resumen de Registros durante 01-01-2019 al 30-06-2019

Durante el periodo de estudio, se registran los eventos indicados en la tabla presentada a continuación, a estos eventos se les calcula la intensidad de Arias y Potencial destructivo, tomando en cuenta la suma de las componentes horizontales de los sensores ubicados en el campo libre al pie de la cepa. Asimismo, se calcula el PGA con el valor máximo entre las componentes horizontales de los equipos en campo libre.

Tabla 4: Características de Eventos sísmicos registrados

Fecha	Hora	M _w	Prof (km)	Lat	Lon	D _{max} (km)	PGA (g)	I _{ar} (cm/sec)	P _d (cm/sec)
19-01-2019	22:22:51	7.7	50.1	-30.276	-71.861	498.3	0.021	3.919	0.012
09-04-2019	08:29:51	3.8	36.9	-33.425	-71.955	83.4	0.013	0.665	0.000
20-05-2019	11:18:32	5.5	133.7	-31.487	-70.235	298.2	0.013	0.382	0.002
01-06-2019	00:22:25	5.0	62.8	-32.744	-71.400	49.9	0.091	5.028	0.014

A modo de complemento, se entregan las fórmulas de intensidad de Arias y potencial destructivo.

1. Intensidad de Arias

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_{t_0}^{t_0+D} a(t)^2 \cdot dt \quad (1)$$

Donde:

- g: Aceleración de gravedad.
- t₀: Tiempo inicial del registro de aceleraciones.
- D: Duración del registro de aceleraciones.
- a(t): Registro de aceleraciones.

2. Potencial destructivo

$$P_d = \frac{I_a}{v_0} \quad (2)$$

Donde:

- I_a: Intensidad de Arias.
- v₀: Intensidad de cruces por cero.

Figura 5-19: Cambio de palabras claves

5.3.3 Programas utilizados

Debido a que la plataforma de generación automática de informes sísmicos, funciona bajo una conjugación de diferentes programas y lenguajes de programación, que en conjunto permiten realizar de manera automática el reconocimiento de la información necesaria (registros e información sobre el evento sísmico), el análisis sísmico de la estructura y creación de un código de programación, que al montarse a un informe base y al compilarse, genere un archivo en extensión PDF, es necesario especificar los programas necesarios para ocupar la plataforma, estos programas son:

- MATLAB versión R2014b.
- TEXWORKS.
- MIKTEX.

5.3.4 Información de los sismos.

Otra información que debe ser entregada en complemento de la plataforma, son los detalles sobre los registros (magnitud, latitud, longitud, profundidad y hora local), para realizar esto se debe completar una planilla de Excel (Figura 5-20), de nombre “Lista_Sismos.xls”, la cual se encuentra en la carpeta de registros marga-marga, como se especifica en el capítulo 5.1.5. Es importante completar esta información para el sismo que se quiera analizar, ya que, si la plataforma no encuentra esta información, no podrá ocupar las subrutinas.

La planilla se debe completar especificando en la columna B el nombre de la carpeta donde se contienen los registros del sismo a analizar (según el formato de nombre especificado en 5.1.5), luego en la fila del sismo ingresado, se debe agregar respectivamente en las columnas C, D, E, F y G, la magnitud del sismo en escala Richter, la latitud del hipocentro, la longitud del hipocentro, la profundidad del hipocentro y la hora local en la cual ocurre el evento. Es importante recalcar que la información anterior se puede encontrar en la página web del servicio sismológico nacional, a la brevedad del sismo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1		Carpeta	Mw	Lat	Long	Prof	Hora local												
2	1	1002271	8,8	-36,17	-73,14	30,0	3:35:20												
3	2	1801041	4,4	-32,718	-71,658	26,7	3:01:27												
4	3	1803211	3,8	-32,775	-71,365	51,9	6:56:26												
5	4	1804101	6,2	-31,008	-71,552	75,1	7:19:33												
6	5	1804161	3,7	-33,032	-71,697	36,8	7:18:45												
7	6	1805112	4,5	-32,793	-71,746	29,3	18:57:42												
8	7	1805191	4,7	-32,207	-71,373	36,8	2:43:40												
9	8	1807161D	4,3	-32,634	-71,635	29,0	5:44:54												
10	9	1808302	4,8	-32,401	-71,229	56,0	18:43:29												
11	10	1809142	4,5	-32,534	-71,592	33,3	15:15:10												
12	11	1809143	4,1	-32,536	-71,592	28,9	15:46:51												
13	12	1812052	5,2	-33,692	-71,495	39,1	14:12:14												
14	13	1901191F	6,7	-30,276	-71,364	50,1	22:32:51												
15	14	1904091ns	3,8	-33,425	-71,955	36,9	8:29:51												
16	15	1905201	5,5	-31,487	-70,235	133,7	11:18:32												
17	16	1906031	5,0	-32,744	-71,400	62,8	0:22:25												
18	17																		
19	18																		
20	19																		
21	20																		
22	21																		
23	22																		
24	23																		
25	24																		
26	25																		
27	26																		
28	27																		
29	28																		
30	29																		
31	30																		

Figura 5-20: Información sobre registros

5.3.5 Informe final

Una vez que se tienen los registros sísmicos en formato *.txt, se ha completado la información sobre los registros en el Excel “Lista_Sismos.xls”, se tienen los archivos base en formato “.tex” y se encuentran las carpetas ordenadas y nombradas como se detalla en el capítulo 5.1 (Figura 5-21), se puede configurar la plataforma según lo detallado en el capítulo 5.2, para realizar el análisis de los registros sísmicos deseados. Este análisis genera una carpeta en la plataforma, la cual contendrá los gráficos y resultados calculados por el programa (Figura 5-22).

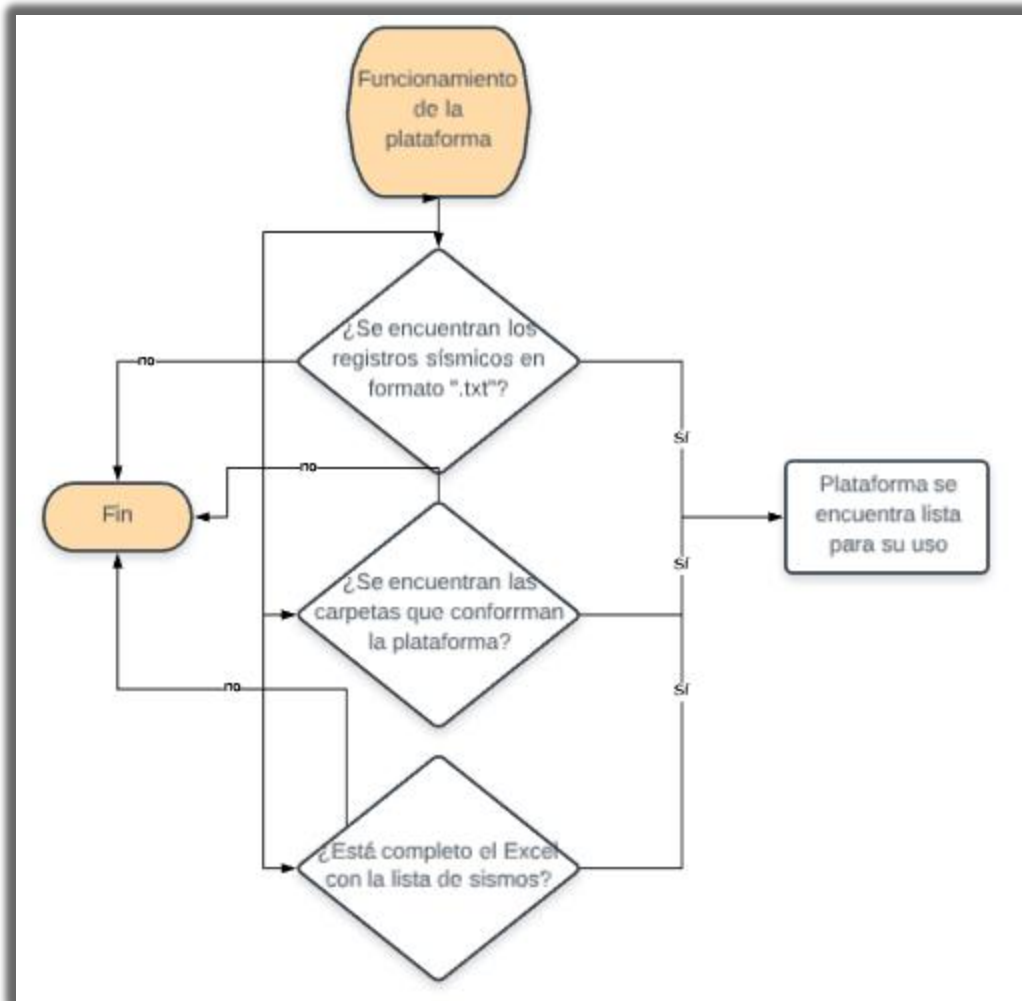


Figura 5-21: Diagrama de flujo de preparación de la plataforma

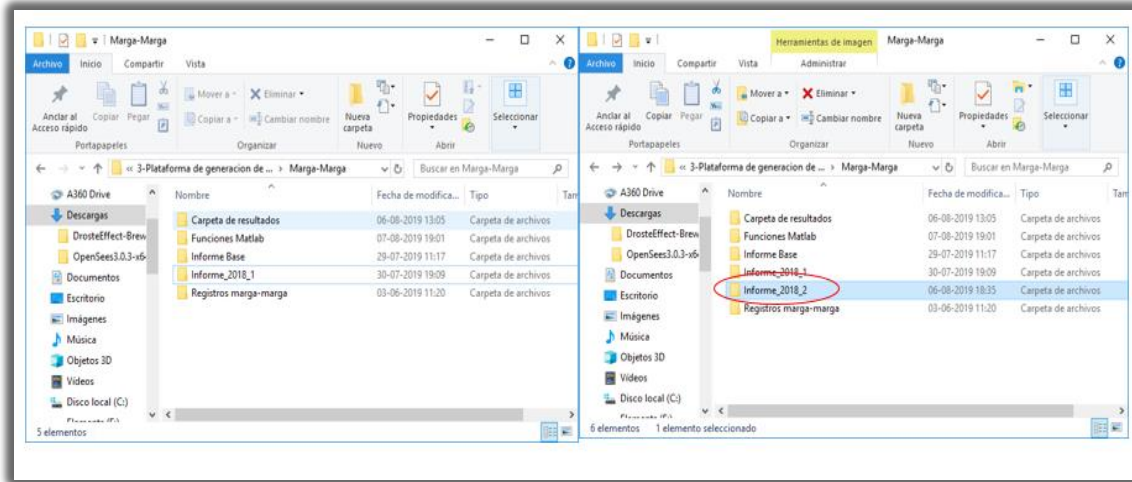


Figura 5-22: Creación de carpeta de resultados

Dentro de la carpeta creada por la plataforma, se encuentra un archivo de nombre “Informe Base Marga Marga_v2.tex” (Figura 5-23), el cual contiene el código creado por la plataforma y que fue montado sobre el informe base.

Este archivo debe ser abierto y compilado (Figura 5-26), lo que genera un archivo de nombre “Informe Base Marga Marga_v2.pdf” (Figura 5-25), el cual es la versión final del análisis sísmico que realiza la plataforma. A modo de complemento, se añade en el Anexo D del presente trabajo de título, un ejemplo de informe generado por la plataforma. Este ejemplo contempla el análisis del sismo del Maule de 2010, mediante todos los métodos implementados en la plataforma, a excepción del segundo método DSI general.

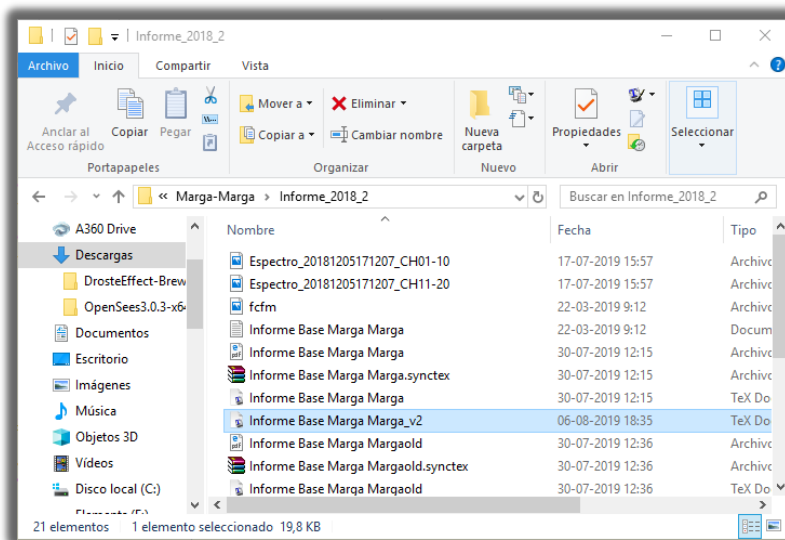


Figura 5-23: Archivo que contiene el código del informe final

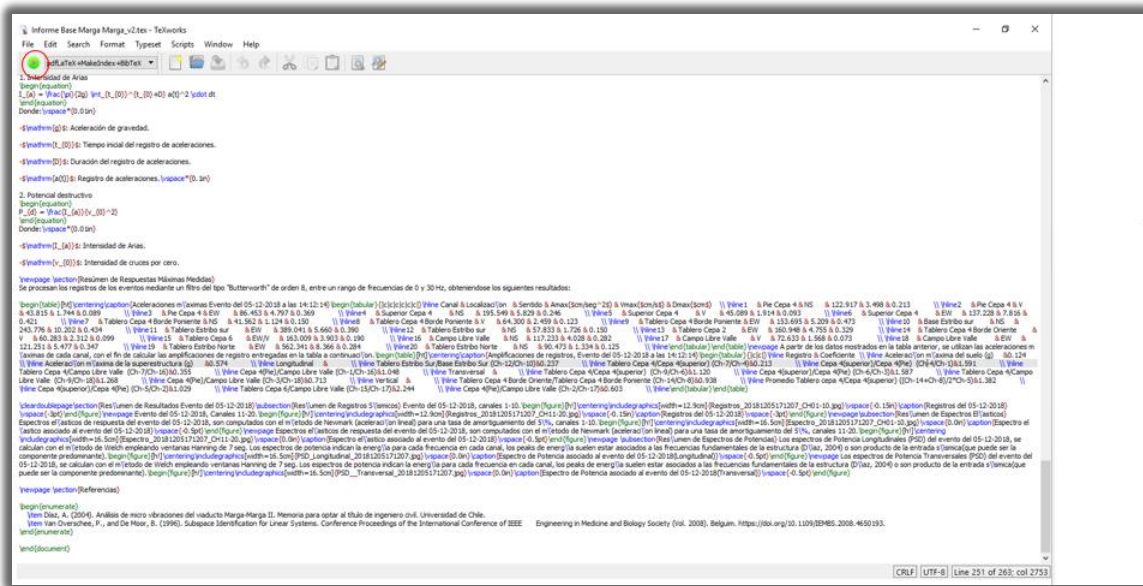


Figura 5-24: Compilación del código LATEX

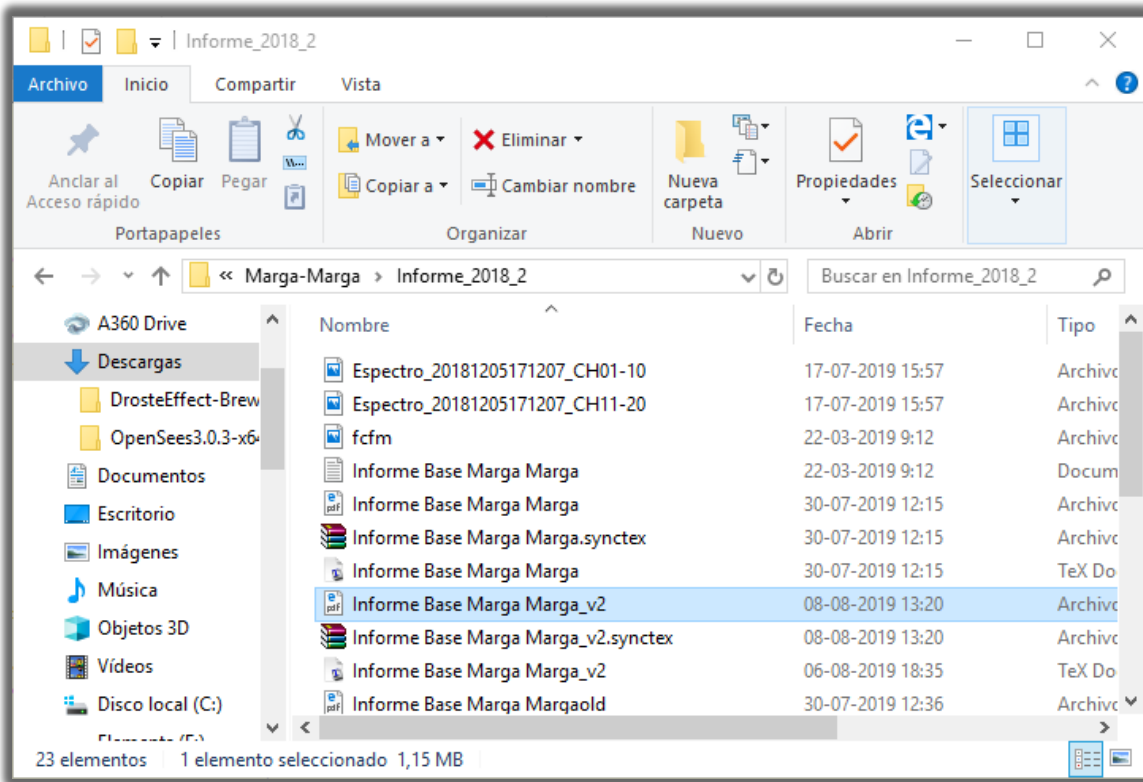


Figura 5-25: Archivo final en formato PDF

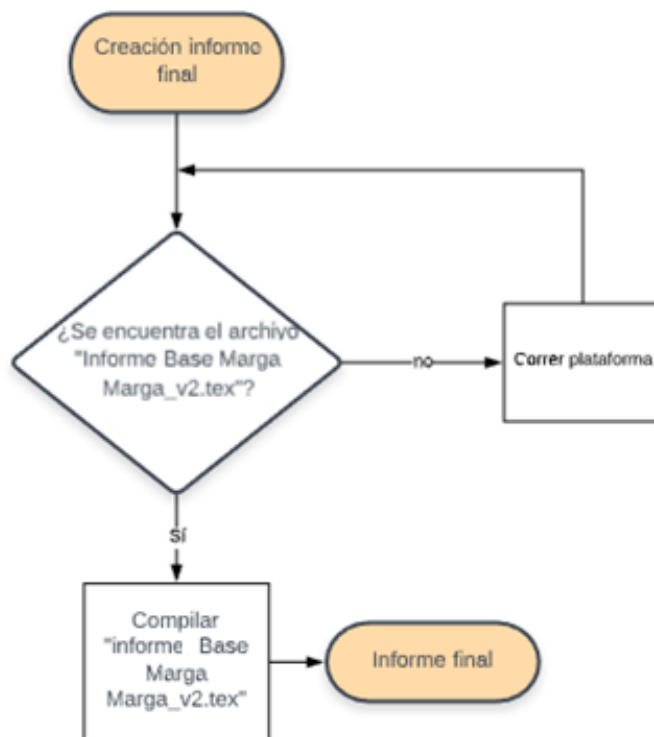


Figura 5-26: Diagrama de flujo de creación del informe final

5.3.6 Calibración de datos

La plataforma de generación automática de informes sísmicos del viaducto El Salto procesa los registros sísmicos registrados mediante varios métodos sofisticados de análisis de propiedades dinámicas de la estructura, dentro de estos métodos sofisticados se encuentran el método de identificación DSI y método de identificación DSI por pequeñas ventanas, los cuales requieren de una gran cantidad de memoria del ordenador en los cuales ejecutan sus respectivas rutinas, es debido a esto que se crean dos programas en paralelo de la plataforma, los cuales son muy útiles ya que trabajan con los resultados generados por la plataforma, y permite que estos sean calibrados sin necesidad de ejecutar nuevamente la plataforma, lo que es engorroso, ya que al calibrar no se requiere generar un informe, sino que se requiere generar nuevos resultados acorde a lo que se busque. En las siguientes páginas se detalla, el funcionamiento de estos programas.

5.3.6.1 Calibración método de identificación DSI por pequeñas ventanas

La subrutina de Matlab que se encarga de la calibración de los resultados generados por el método de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo, se

encuentra en la carpeta de funciones Matlab de la plataforma. Para poder ocupar esta función, es necesario que los resultados generados por la función “ident_identsystem_VM_MIMO_R_PUNTUAL2” (que es ocupada por la plataforma), se encuentren en su respectiva carpeta de resultados previos y que la tabla de resumen de resultados se encuentre en la carpeta de resultados previos “DSIPV”. El detalle del funcionamiento de esta herramienta se agrega al Anexo B, subsección Calibración método de identificación DSI.

5.3.6.2 Calibración método de identificación DSI por pequeñas ventanas

La subrutina de Matlab que se encarga de la calibración de los resultados generados por el método de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo, se encuentra en la carpeta de funciones Matlab de la plataforma. Para poder ocupar esta función, es necesario que los resultados generados por la función “ident_identsystem_VM_MIMO_R_PUNTUAL2” (que es ocupada por la plataforma), se encuentren en su respectiva carpeta de resultados previos y que la tabla de resumen de resultados se encuentre en la carpeta de resultados previos “DSIPV”. El detalle del funcionamiento de esta herramienta se agrega al Anexo B, subsección Calibración método de identificación DSI por pequeñas ventanas.

Capítulo 6

Análisis de resultados de la plataforma

Con el fin de generar una plataforma de informes sísmicos del viaducto El Salto, la red de cobertura nacional de acelerógrafos del departamento de ingeniería de la Universidad de Chile (RENADIC), dispone de los registros de 10 eventos sísmicos (Tabla 6-1.), los cuales se usan para calibrar los resultados calculados por la plataforma.

Los eventos sísmicos se analizan mediante un filtro pasa bajo del tipo “Butterworth” de 30 [Hz], obteniendo los resultados de aceleraciones, velocidades y desplazamiento máximos, espectros elásticos, espectros de densidad de potencia, funciones de transferencia, método de identificación DSI, método de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo y formas modales. Por el contrario, los resultados asociados a los espectrogramas y funciones de transferencia por pequeñas ventanas se filtran mediante un filtro pasa bajo del tipo “Butterworth” de 2 [Hz].

Tabla 6-1: Sismos procesados por la plataforma

Fecha	Hora	Mw	Prof [km]	Lat	Lon	Dept [km]	Ia[cm/s]
27-02-2010	0.507	8.8	30.0	-36.170	-73.140	534.4	917.733
16-07-2018	0.662	4.3	29.0	-32.634	-71.635	67.2	0.170
30-08-2018	0.297	4.8	56.0	-32.401	-71.229	108.3	1.653
14-09-2018	2.242	4.5	33.3	-32.525	-71.592	83.1	0.179
14-09-2018	0.563	4.1	28.9	-32.526	-71.592	82.8	0.231
05-12-2018	0.797	5.2	39.1	-33.692	-71.495	101.3	14.122
19-01-2019	0.692	6.7	50.1	-30.276	-71.364	436.3	3.919
09-04-2019	2.035	3.8	36.9	-33.425	-71.955	83.4	0.065
20-05-2019	0.948	5.5	133.7	-31.487	-70.235	298.2	0.382
03-06-2019	0.741	5.0	62.8	-32.744	-71.400	49.9	5.028

6.1 Análisis de la aislación sísmica

Se realiza un resumen de las aceleraciones máximas calculadas de los 10 eventos sísmicos catastrados (Tabla 6-5 y Tabla 6-6), este resumen muestra que por lo general el valor máximo se asocia a movimientos del tablero en la dirección transversal, lo que implicaría que estos “peaks” se deben a choques del tablero con los topes. Igualmente, se puede destacar que en 3 sismos relativamente débiles (16/07/2018 y 14/09/2018), las aceleraciones máximas registradas ocurren en la dirección transversal o longitudinal, en el coronamiento de la cepa 4 (canales 4 y 6), lo que indicaría que para sismos de esas intensidades no habría impacto entre el tablero y los topes.

También se resume en la Tabla 8-7 y en la Tabla 8-8, los resultados de la amplificación entre canales entregados por la plataforma de informes sísmicos. Estos cocientes representan la variación de la aceleración entre diferentes pares de canales, esto con el fin de observar cómo cambia la amplificación sísmica entre los diversos sectores del puente. Los resultados de la amplificación sísmica registrada en los 10 eventos catastrados son promediados y comparados con resultados previos de la literatura (Tabla 6-2), como los de Boroschek et al., que realizan una comparación de los cocientes de 35 eventos sísmicos, entre los años 1998 y 2003, que hayan producido una aceleración de al menos 0,05g en la superestructura del viaducto, obteniendo un valor promedio para estos casos (Boroschek, Ofelia, & Sarrazín, 2003). A su vez, Sarrazín et al. realizan un análisis similar, tomando en cuenta sismos que hayan producido un mínimo de 0,05g de aceleración en la superestructura, extendiendo el lapsus de tiempo hasta el año 2005, obteniendo el promedio de casi 50 eventos sísmicos (Sarrazín, Moroni, & Roesset, 2005). Por otra parte, Taylor et al. calculan el promedio de los eventos desde 1996 que hayan producido una aceleración igual o superior a 0,1g en la estructura, totalizando 7 eventos. (Taylor, Trigo, Moroni, & Sarrazín, 2010). Al observar las tablas de amplificación sísmica se puede apreciar los siguientes comportamientos:

- los resultados entregados por la plataforma son muy similares a los investigados en la literatura.
- Se observa una disminución de la aceleración registrada en los canales ubicados en campo libre (16, 17 y 18), con respecto a los canales en el pie de la cepa 4 (1, 2 y 3).
- La señal medida en los canales ubicados en el coronamiento de la cepa (4, 5 y 6) aumenta en relación con los canales en el pie de la cepa 4 (1, 2 y 3).

- Se observa una desamplificación en la aceleración registrada en los canales ubicados en el tablero de la cepa (7, 8, 9 y 14), con respecto a los canales en el coronamiento de la cepa (4, 5 y 6). Apreciándose el comportamiento de los aisladores sísmicos.
- Verticalmente se aprecia que la aceleración aumenta entre el canal de campo libre (17) y el canal del tablero de la estructura (15), lo que implicaría que verticalmente existe una amplificación de la señal del campo libre hacia la superestructura.
- Longitudinal y transversalmente se aprecia que la aceleración disminuye entre los canales ubicados en el campo libre de la cepa 4 (16 y 18), y los canales en el tablero de la cepa 4 (7 y 9), lo que implicaría que en estas direcciones la señal se des amplifica entre campo libre y super estructura.
- Al comparar los canales verticales ubicados en el borde oriente y poniente, se aprecia una diferencia entre estos, indicando la posibilidad de un efecto de torsión vertical en el tablero.
- El contraste entre el canal ubicado en el tablero del estribo sur (12) y el canal ubicado en la base del estribo sur (10), indica que la señal se des amplifica al ingresar a la estructura.

Mediante las observaciones anteriores, se aprecia que los aisladores sísmicos producen una des amplificación de la señal, mientras que al subir por la cepa la señal se amplifica, lo que se conjuga en que verticalmente exista una amplificación de la señal entre campo libre y superestructura (también producida por los aisladores), por el contrario, longitudinal y transversalmente existe una des amplificación de la señal. El detalle de los cocientes de los 10 sismos se puede buscar en el Anexo C.

Tabla 6-2: Comparación resultados amplificación sísmica

Canales comparados	Promedio	Sarrazín et al	Taylor et al	Boroschek et al
(Ch-12/Ch-10)	0.507	-	1.030	0.650
(Ch-18/Ch-16)	0.662	-	0.820	0.87
(Ch-7/Ch-4)	0.297	0.300	0.380	-
(Ch-4/Ch-1)	2.242	-	-	-
(Ch-7/Ch-16)	0.563	0.320	0.520	-
(Ch-1/Ch-16)	0.797	-	-	-
(Ch-9/Ch-6)	0.692	0.580	0.570	0.590
(Ch-6/Ch-3)	2.035	2.620	2.510	2.63
(Ch-9/Ch-18)	0.948	0.930	0.650	-
(Ch-3/Ch-18)	0.741	-	-	-
(Ch-14/Ch-8)	0.800	-	0.890	0.91

Tabla 6-3: Comparación resultados amplificación sísmica (continuación)

Canales comparados	Promedio	Sarrazín et al	Taylor et al	Boroschek et al
(Ch-14+Ch-8) / (2*Ch-5)	2.597	2.480	2.690	2.54
(Ch-5/Ch-2)	1.205	-	1.290	1.300
(Ch-15/Ch-17)	1.974	-	2.250	-
(Ch-2/Ch-17)	0.519	-	-	-

Mediante la Tabla 6-2 se puede comparar la amplificación sísmica ocurrida en un sismo, como por ejemplo el evento del 16/07/2018, en el cual se observa que para este caso los cocientes de amplificación para el sismo son bastante similares a los cocientes promediados, a excepción del cociente “Promedio Tablero cepa 4/Cepa 4(superior)” y cociente “Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie)”, en los cuales se observa un valor mucho menor al promedio, pero aún dentro de la tendencia del promedio. Finalmente se destaca que el cociente “Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle” no sigue la tendencia de disminución de la señal entre el campo libre y pie de la cepa 4, identificándose que la señal permanece constante entre campo libre y pie de la cepa 4.

Tabla 6-4: Comportamiento de la amplificación sísmica durante el sismo del 16/07/2018

Registro	16/07/2018	Promedio
Tablero Estribo Sur/Base Estribo Sur (Ch-12/Ch-10)	0.526	0.507
Tablero Cepa 4/Cepa 4(Superior) (Ch-7/Ch-4)	0.209	0.297
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-4/Ch-1)	2.565	2.242
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-7/Ch-16)	0.569	0.563
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-1/Ch-16)	1.061	0.797
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-9/Ch-6)	0.671	0.692
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-6/Ch-3)	1.476	2.035
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-9/Ch-18)	0.810	0.948
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-3/Ch-18)	0.817	0.741
Tablero Cepa 4 Borde Oriente/Tablero Cepa 4 Borde Poniente (Ch-14/Ch-8)	0.594	0.800
Promedio Tablero cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-14+Ch-8) / (2*Ch-5)	1.866	2.597
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-5/Ch-2)	1.139	1.205
Tablero Cepa 6/Campo Libre Valle (Ch-15/Ch-17)	1.868	1.974
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-2/Ch-17)	0.396	0.519

Tabla 6-5: Aceleraciones máximas eventos del 16/07/2018 al 14/09/2018 y evento del 27/02/2010

Canal	Localización	Sentido	27/02/2010	16/07/2018	30/08/2018	14/09/2018	14/09/2018
			A_{\max} (cm/seg2)	A_{\max} (cm/seg2)	A_{\max} (cm/seg2)	A_{\max} (cm/seg2)	A_{\max} (cm/seg2)
1	Pie Cepa 4	NS	339.837	6.763	16.369	5.097	16.566
2	Pie Cepa 4	V	154.579	3.528	7.645	4.606	4.999
3	Pie Cepa 4	EW	367.174	10.095	27.25	5.783	9.411
4	Superior Cepa 4	NS	557.84	17.349	41.757	16.075	30.582
5	Superior Cepa 4	V	173.697	4.018	8.331	5.881	5.881
6	Superior Cepa 4	EW	516.556	14.899	48.814	23.133	17.251
7	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	NS	276.521	3.625	5.489	3.627	8.234
8	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	V	330.131	9.41	25.774	12.351	15.389
9	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	EW	627.814	9.998	40.188	10.39	9.704
10	Base Estribo Sur	NS	1030.346	11.175	32.837	14.997	14.409
11	Tablero Estribo Sur	EW	1936.469	13.624	74.985	15.487	14.508
12	Tablero Estribo Sur	NS	310.819	5.881	9.214	5.391	10.489
13	Tablero Cepa 2	EW	623.218	11.469	33.032	8.822	14.605
14	Tablero Cepa 4 Borde Oriente	V	266.322	5.588	26.862	9.116	11.375
15	Tablero Cepa 6	EW/V	571.36	16.663	42.356	12.448	23.917
16	Campo Libre valle	NS	345.693	6.371	38.031	14.8	15.683
17	Campo Libre valle	V	255.145	8.92	15.977	7.057	9.9
18	Campo Libre valle	EW	331.339	12.351	48.324	11.272	16.173
19	Tablero Estribo Norte	EW	1357.572	13.821	58.42	12.546	13.331
20	Tablero Estribo Norte	NS	266.423	7.155	8.92	6.077	8.136

Tabla 6-6: Aceleraciones máximas eventos del 05/12/2018 al 03/06/2019

Canal	Localización	Sentido	05/12/2018	19/01/2019	09/04/2019	20/05/2019	03/06/2019
			A_{\max} (cm/seg ²)	A_{\max} (cm/seg ²)	A_{\max} (cm/seg ²)	A_{\max} (cm/seg ²)	A_{\max} (cm/seg ²)
1	Pie Cepa 4	NS	122.917	17.74	9.802	7.254	29.798
2	Pie Cepa 4	V	43.815	9.695	2.451	4.411	17.742
3	Pie Cepa 4	EW	86.453	20.88	6.077	9.018	48.913
4	Superior Cepa 4	NS	195.549	41.954	19.211	19.315	62.047
5	Superior Cepa 4	V	45.089	11.851	3.333	5.195	25.877
6	Superior Cepa 4	EW	137.228	37.543	14.703	21.663	80.18
7	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	NS	41.562	9.508	5.489	14.115	11.273
8	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	V	64.3	22.151	12.35	50.088	42.737
9	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	EW	153.695	19.797	6.175	8.718	58.616
10	Base Estribo Sur	NS	243.776	19.504	8.331	10.293	33.817
11	Tablero Estribo Sur	EW	389.041	38.62	17.056	12.349	235.15
12	Tablero Estribo Sur	NS	57.833	8.725	6.763	8.626	18.134
13	Tablero Cepa 2	EW	160.948	23.82	9.313	16.667	110.664
14	Tablero Cepa 4 Borde Oriente	V	60.283	18.645	14.018	18.232	34.405
15	Tablero Cepa 6	EW/V	163.009	33.428	33.328	66.36	81.161
16	Campo Libre valle	NS	117.233	19.703	12.449	7.352	80.377
17	Campo Libre valle	V	72.633	32.207	6.371	4.803	51.755
18	Campo Libre valle	EW	121.251	20.681	7.253	12.645	88.904
19	Tablero Estribo Norte	EW	562.341	56.951	12.252	12.449	104.587
20	Tablero Estribo Norte	NS	90.473	10.096	6.266	11.471	16.369

6.2 Análisis en el espacio de las frecuencias

La plataforma de informes sísmicos analiza los registros de los diversos sismos mediante el método de las frecuencias, calculando los espectros de densidad de potencia utilizando ventanas del tipo “Hanning” de 7 [s] de duración. Para corroborar estos resultados, se comparan los espectros obtenidos del sismo del Maule, con los espectros calculados por Sarrazín et al. (2012) para el mismo evento (Figura 6-1 y Figura 6-2). Al realizar el contraste se observa la repetitividad de los resultados, confirmando la metodología utilizada.

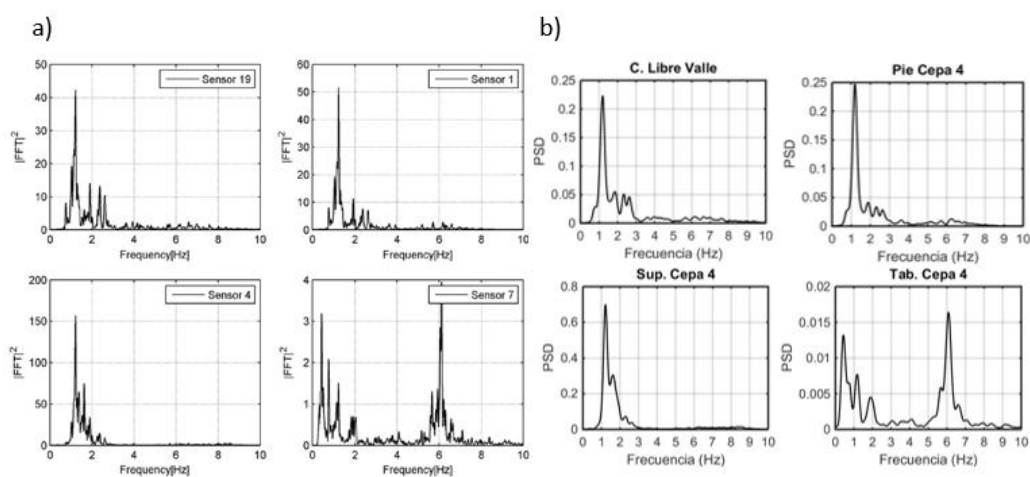


Figura 6-1: PSD Canales longitudinales (a) (Sarrazín, Moroni, Neira, & Venegas, 2012).
(b)Plataforma El Salto

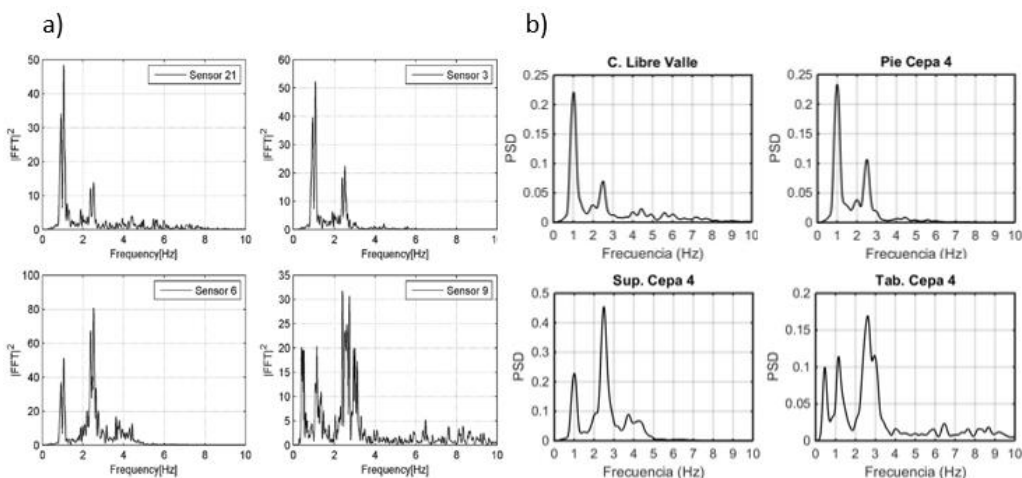


Figura 6-2: PSD Canales transversales (a) (Sarrazín, Moroni, Neira, & Venegas, 2012).
(b)Plataforma El Salto

Una vez verificados los espectros de densidad de potencia con resultados previos obtenidos de la literatura, se realiza un análisis entre el sismo del 16/07/2018 y el terremoto del Maule, esto con el objetivo de comparar el comportamiento de la estructura antes un sismo relativamente débil y un sismo relativamente fuerte.

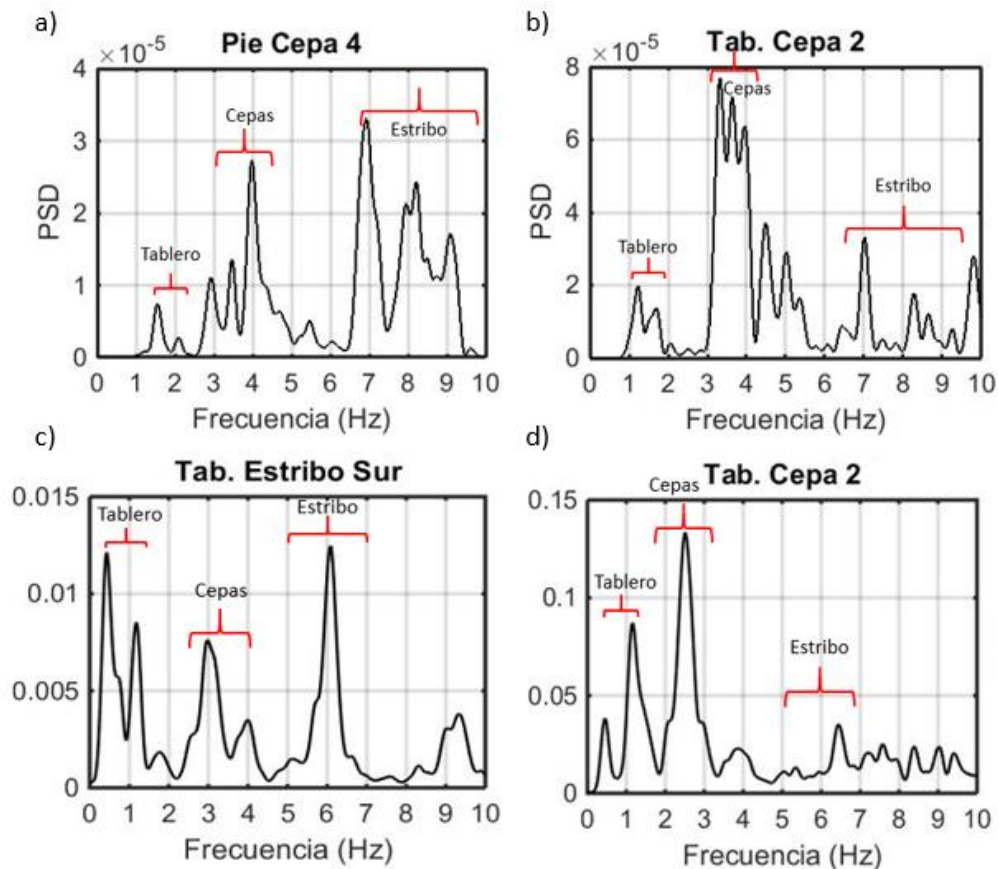


Figura 6-3: (a) y (b) PSD longitudinal y transversal del sismo del 16/07/2018. (c) y (d) PSD longitudinal y transversal del terremoto del Maule

Al analizar los espectros longitudinales del sismo del 16/07/2018 (Figura 6-3), se observan varios “peaks” de energía, asociándose estos de la siguiente manera:

- “Peaks” entre 1.5-2 [Hz], corresponden a modos de tablero.
- “Peaks” entre 3-4.5 [Hz], corresponden a modos de cepa.
- “Peaks” entre 6.5-9 [Hz], corresponden a modos del estribo.

Al analizar los espectros transversales del sismo del 16/07/2018 (Figura 6-3), se observan varios “peaks” de energía, asociándose estos de la siguiente manera:

- “Peaks” entre 1-2 [Hz], corresponden a modos de tablero.
- “Peaks” entre 3-4 [Hz], corresponden a modos de cepa.
- “Peaks” entre 6.5-9.5 [Hz], corresponden a modos del estribo.

Al analizar los espectros longitudinales del terremoto del Maule (Figura 6-3), se observan varios “peaks” de energía, asociándose estos de la siguiente manera:

- “Peaks” entre 0.5-1.2 [Hz], corresponden a modos de tablero.
- “Peaks” entre 2.5-4 [Hz], corresponden a modos de cepa.
- “Peaks” entre 5-7 [Hz], corresponden a modos del estribo.

Al analizar los espectros longitudinales del terremoto del Maule (Figura 6-3), se observan varios “peaks” de energía, asociándose estos de la siguiente manera:

- “Peaks” entre 0.5-1.2 [Hz], corresponden a modos de tablero.
- “Peaks” entre 2-3 [Hz], corresponden a modos de cepa.
- “Peaks” entre 5-7 [Hz], corresponden a modos del estribo.

Mediante el análisis de los “peaks” de energía de los sismos del 16/07/2018 y el terremoto del Maule, se puede observar que las frecuencias características de las cepas y de los estribos disminuyen para la dirección transversal y longitudinal. Transversalmente se denota que el “peak” cercano a 1.1 [Hz] se mantiene para ambas intensidades, apareciendo un nuevo “peaks” cercano a 0.5 [Hz] cuando el sismo es relativamente fuerte.

En la dirección longitudinal se puede observar que la frecuencia cercana a 2.1 [Hz] en el sismo débil, disminuye a un valor del orden de 1.8 [Hz] en el sismo fuerte, mientras que el “peak” próximo a 1.6 [Hz], disminuye a un valor cercano a 1.1 [Hz]. Asimismo, se nota la aparición de una nueva frecuencia cercana a 0.5 [Hz] cuando sucede el sismo fuerte. Esto da cuenta respecto a la variación de las frecuencias del tablero durante un evento sísmico debido al comportamiento histerético del sistema de aislación sísmica.

El detalle de los espectros de densidad de potencia de los eventos del sismo del 16/07/2018 y el terremoto del Maule, se pueden encontrar en el Anexo C, en la subsección PSD del viaducto El Salto.

6.3 Análisis método de identificación DSI

La plataforma de generación automática de informes sísmicos se encuentra programada para analizar los registros sísmicos mediante el método de identificación DSI de varias entradas y salidas. Debido a la dificultad que representa la elección de canales a ocupar como entradas o como salidas de la estructura, se decide ocupar 5 casos de estudio, los cuales se especifican en la Tabla 6-7.

Tabla 6-7: Casos de análisis del método DSI

Caso	Canales de entradas	Canales de salida	Observación
1	4	7-12-20	Respuesta longitudinal del puente, input tope superior de cepa
2	4-10	7-12-20	Respuesta longitudinal del puente, input tope superior cepa y estribo
3	18	3-6-9-11-13-19	Respuesta transversal del puente, input base de cepa 4
4	6	9-11-13-19	Respuesta transversal del puente, input tope superior cepa 4
5	4-6-10	7-9-11-12-13-19-20	Respuesta general del puente, inputs tope cepa 4

Tabla 6-8: Descripción de canales utilizados en los casos de la Tabla 6-7

Canal	Ubicación	Canal	Ubicación
1	Pie Cepa 4: Norte-Sur	11	Estribo Sur: Este-Oeste
3	Pie Cepa 4: Este-Oeste	12	Estribo Sur: Norte-Sur
4	Cabezal Cepa 4: Norte-Sur	13	Tablero Cepa 2: Este-Oeste
6	Cabezal Cepa 4: Este-Oeste	16	Campo Libre Valle: Norte-Sur
7	Tablero Cepa 4 Borde Poniente: Norte-Sur	18	Campo Libre Valle: Este-Oeste
9	Tablero Cepa 4 Borde Poniente: Este-Oeste	19	Estribo Norte: Este-Oeste
10	Base Estribo Sur: Norte-Sur	20	Estribo Norte: Norte-Sur

El caso 1 mostrado en la Tabla 6-7, contiene solo canales de entrada y salida configurados para medir señales longitudinalmente, por lo que mide la respuesta longitudinal de la estructura, además no considera canales al pie de la cepa ni en campo libre, sino canales sobre la cepa del puente como entrada, por lo que los resultados no se ven afectados por la influencia de la subestructura. Esta decisión se toma ya que, al considerar la cepa o el suelo como posible entrada, la respuesta de la estructura se combina con las frecuencias características del suelo, de las cepas y de un posible efecto de sitio, por lo que al eliminar en parte su influencia, se podía apreciar de mejor manera la respuesta de la superestructura. Asimismo, el caso 2 es idéntico al caso 1, con la salvedad que se agrega como entrada al canal ubicado en la base del estribo sur (el otro input medido sincrónicamente de la superestructura).

Los casos 3 y 4 representan una respuesta transversal del puente. Para esta respuesta de la estructura se considera un caso en que se toma como entrada principal a los registros registrados en la base de la cepa 4 (caso 3) y un caso en que se reduce la influencia de las cepas utilizando como entrada el registro sobre la cepa 4 (caso 4).

El caso 5 representa un caso general de la respuesta del viaducto, en el que se ocupa como entrada y como salida, canales longitudinales y transversales exclusivamente de la superestructura del puente, esto debido que, al intentar agregar la respuesta de las cepas, las herramientas computacionales no logran obtener resultados debido a la gran memoria que requiere tal cantidad de canales.

Al definirse los casos de estudio, estos se utilizan para analizar los 10 eventos sísmicos, a los cuales se identifican los modos de vibración de la estructura a partir de las formas modales calculadas y a los resultados de la tabla resumen del diagrama de estabilidad. Para realizar la identificación de las frecuencias, se utilizan como base los resultados de los modos identificados por Balsebre (2019).

Mediante el análisis de los diferentes sismos, se realiza una tabla resumen de las frecuencias identificadas (Tabla 6-9), en la cual se puede apreciar que en la mayoría de los eventos se logran identificar al menos 5 de las 6 frecuencias características identificadas por Balsebre (2019) y estas suelen ser menores, lo cual se explica debido a que las frecuencias identificadas por Balsebre (2019) se obtuvieron mediante micro vibraciones, mientras que las frecuencias identificadas en el presente trabajo se obtienen a partir de respuestas sísmicas, los cuales activan en mayor manera el comportamiento no-lineal de la estructura asociado a los aisladores sísmicos.

Tabla 6-9: Frecuencias identificadas mediante el método DSI

Evento	I_a [cm/s]	F [Hz]	F [Hz]	F [Hz]	F [Hz]	F [Hz]	F [Hz]
27-02-2010	917.733	0.482	1.180	-	-	0.499	1.851
09-04-2019	0.065	1.061	1.214	1.632	-	1.814	1.982
16-07-2018	0.17	1.07	1.263	1.664	-	1.666	2.039
14-09-2018	0.179	1.054	1.243	1.688	1.750	1.805	1.882
14-09-2018	0.231		1.207	1.726	-	1.876	
20-05-2019	0.382	1.090	1.259	1.684	-	1.601	2.086
30-08-2018	1.653	1.035	1.233	1.698	-	1.694	1.804
19-01-2019	3.919	1.027	1.482	1.713	1.430	1.577	1.703
03-06-2019	5.028	1.105	1.221	1.624	-	1.41	1.910
05-12-2018	14.122	0.990		1.581	-	1.452	2.008

Por lo general se nota que al comparar el caso 3 y 4, se distingue un aumento de la rigidez de la estructura al considerar la entrada sísmica en el tope superior de la cepa en vez que, en su apoyo, esto se debe a que la flexibilidad de la cepa reduce las frecuencias relativas de la estructura.

Se observa una tendencia en las frecuencias características si se grafican en relación con la intensidad de Arias (Figura 6-6), observando que los modos 1.195, 1.625 y 2.151 [Hz], se mantienen invariables ante el aumento en la intensidad de los sismos, mientras que la frecuencia fundamental longitudinal 2.051 [Hz] decrece a medida que aumenta la intensidad del sismo, hasta alcanzar valores del orden de 0.5 [Hz] para sismos fuertes como el terremoto del Maule.

Se destaca el comportamiento de la frecuencia fundamental transversal 1.035 [Hz], la cual se mantiene relativamente constante a lo largo del análisis, a excepción de cuando se somete al sismo del Maule, el cual produce una disminución hasta valores cercanos a 0.5 [Hz]. Se debe remarcar que, en las gráficas de variación de la frecuencia, se omite el terremoto del Maule debido a la escala ocupada, pero como los valores de las frecuencias para este evento se muestran en la Tabla 6-9, estos si se consideran para analizar la tendencia de aumento, disminución o mantención de las frecuencias.

Al analizar las formas modales obtenidas para cada una de las frecuencias identificadas en la Tabla 6-9, se observa que la forma modal asociada a la frecuencia fundamental transversal no varía a medida que aumenta la intensidad del sismo, caso similar que sucede en los modos 1.625 y 1.195 [Hz]. Por el contrario, en los modos de vibración longitudinales (2.051 y 2.151 [Hz]), se aprecia un aumento en el movimiento del estribo norte, como se puede ver en la Figura 6-4 y en la Figura 6-5.

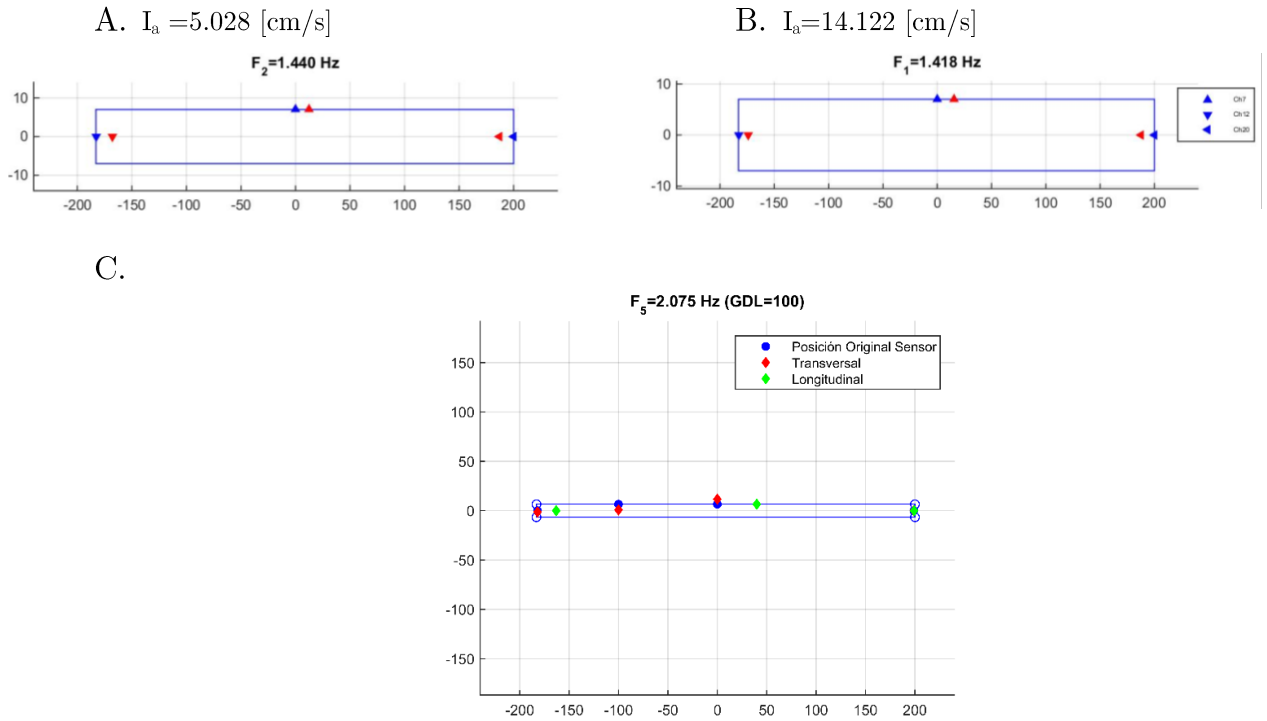


Figura 6-4: Movimiento del estribo norte en la forma modal de la frecuencia 2.051 [Hz]. (A) y (B) Forma modal calculada para dos I_a diferentes. (C) (Balsebre, 2019)

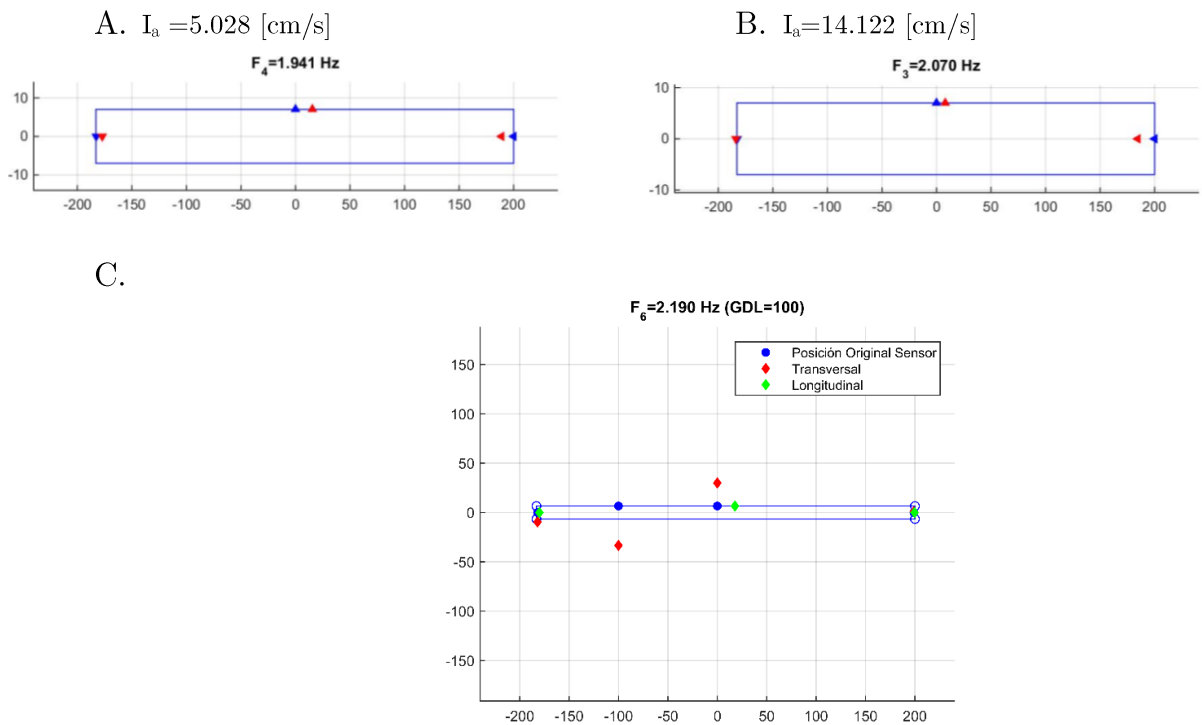


Figura 6-5: Movimiento del estribo norte en la forma modal de la frecuencia 2.151 [Hz]. (A) y (B) Forma modal calculada para dos I_a diferentes. (C) (Balsebre, 2019)

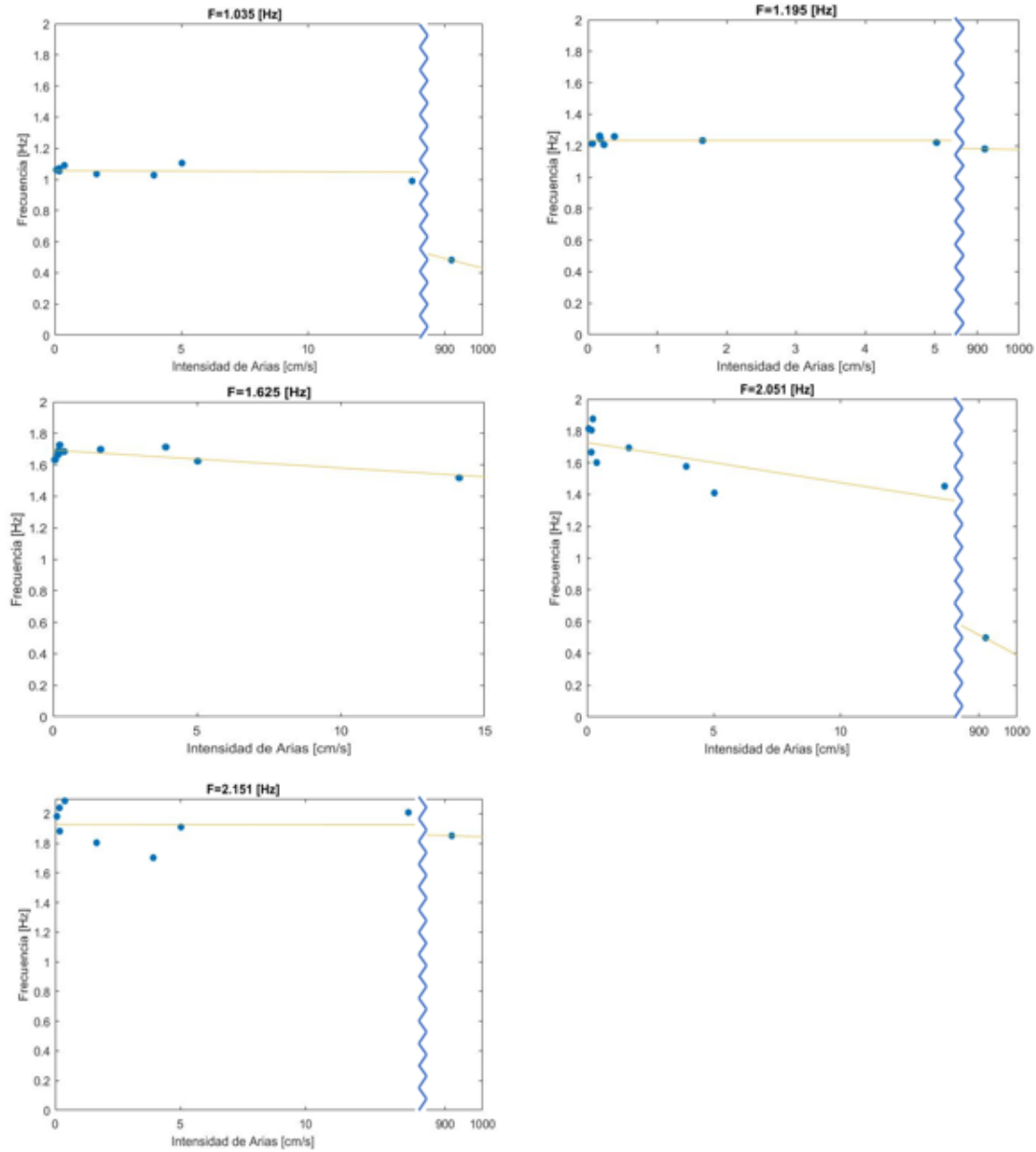


Figura 6-6: Variación de las frecuencias características en función de la intensidad de Arias de los eventos sísmicos

Vale recalcar que el detalle de los resultados de los métodos de identificación DSI utilizados para realizar la identificación de frecuencias de la Tabla 6-9 se añade en el Anexo E, mediante la inclusión del informe enviado al MOP, correspondiente al reporte del primer semestre del 2019 de eventos sísmicos, en el cual se analizan 4 de los 10 sismos de la Tabla 6-1. Los gráficos de formas modales que se utilizan para analizar el cambio de los modos de vibración al aumentar la intensidad del sismo

(como los utilizados en la Figura 6-4 y en la Figura 6-5.), se pueden revisar en el Anexo C, en la subsección Formas modales viaducto El Salto.

6.4 Análisis de propiedades variables en el tiempo

Los resultados obtenidos en los subcapítulos previos indican la disminución de los valores de las frecuencias características fundamentales de los modos longitudinales y transversales, para el caso de sismos relativamente débiles y fuertes. Es debido a lo anterior, que se incluye en la plataforma 3 métodos de análisis de variación de propiedades dinámicas en el tiempo. Para analizar la utilidad de estos métodos en los sismos registrados en el viaducto El Salto, estos se utilizan para identificar el comportamiento en el tiempo del terremoto del Maule y de un sismo de mediana intensidad, como el del 05/12/2018.

En una primera instancia se analiza la variación de la frecuencia debido al terremoto del Maule mediante espectrogramas (Figura 6-9 y Figura 6-10), pero estos no mostraban de forma clara la variación en las propiedades de la estructura, debido a que el espectrograma se ve altamente influenciado por el input sísmico. Con el fin de aislar la frecuencia buscada, se analizan los registros mediante la función de transferencia por pequeñas ventanas (Figura 6-7 y Figura 6-8), en la cual se distingue una clara variación de las frecuencias fundamentales. Longitudinalmente la frecuencia varía desde un valor inicial cercano a los 1.8 [Hz], hasta un valor mínimo del orden de 0.5 [Hz] cuando el sismo se encuentra en su movimiento fuerte, para luego recuperar lentamente su valor inicial. Transversalmente se nota el mismo efecto, siendo el valor inicial de la frecuencia fundamental del orden de 1.1 [Hz], disminuyendo hasta valores cercanos a 0.5 [Hz], para finalmente recuperar lentamente su valor inicial una vez terminado el movimiento fuerte del sismo.

Los resultados entregados por la función de transferencia por pequeñas ventanas se corroboran con el método DSI por pequeñas ventanas, el cual entrega resultados similares en la dirección longitudinal (Figura 6-13) y transversal (Figura 6-14).

Se realiza un análisis similar para el sismo de 12/05/2018, el cual se cataloga como un sismo moderado. Al observar los resultados (Figura 6-11 y Figura 6-12), se nota que estos no entregan información útil sobre la variación de la frecuencia, por lo que se descartan estos métodos para el análisis de sismos que no sean fuertes.

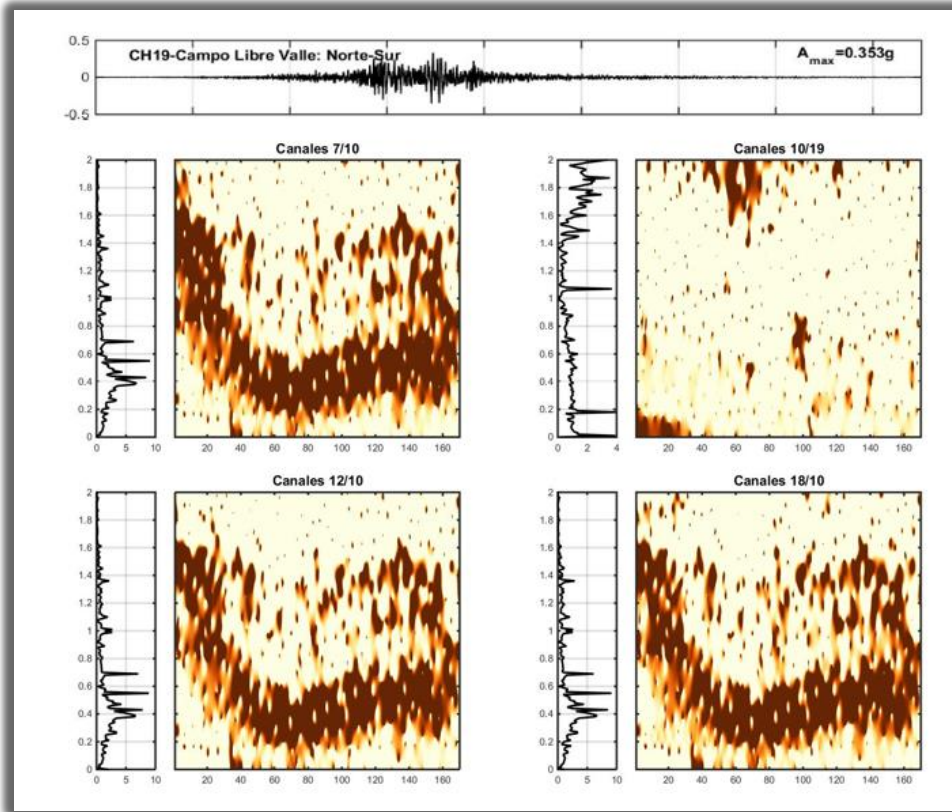


Figura 6-7: Función de transferencia por pequeñas ventanas, terremoto del Maule, dirección longitudinal.

Tabla 6-10: Descripción de canales utilizados en los espectrogramas y funciones de transferencia por pequeñas ventanas

Canal	Ubicación canal longitudinal	Canal	Ubicación canal transversal
1	Pie Cepa 4	3	Pie Cepa 4
7	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	6	Cabezal Cepa 4
10	Base Estribo Sur	9	Tablero Cepa 4 Borde Poniente
12	Estribo Sur	11	Estribo Sur
18	Estribo Norte	13	Tablero Cepa 2
19	Campo Libre Valle	17	Estribo Norte
		21	Campo Libre Valle

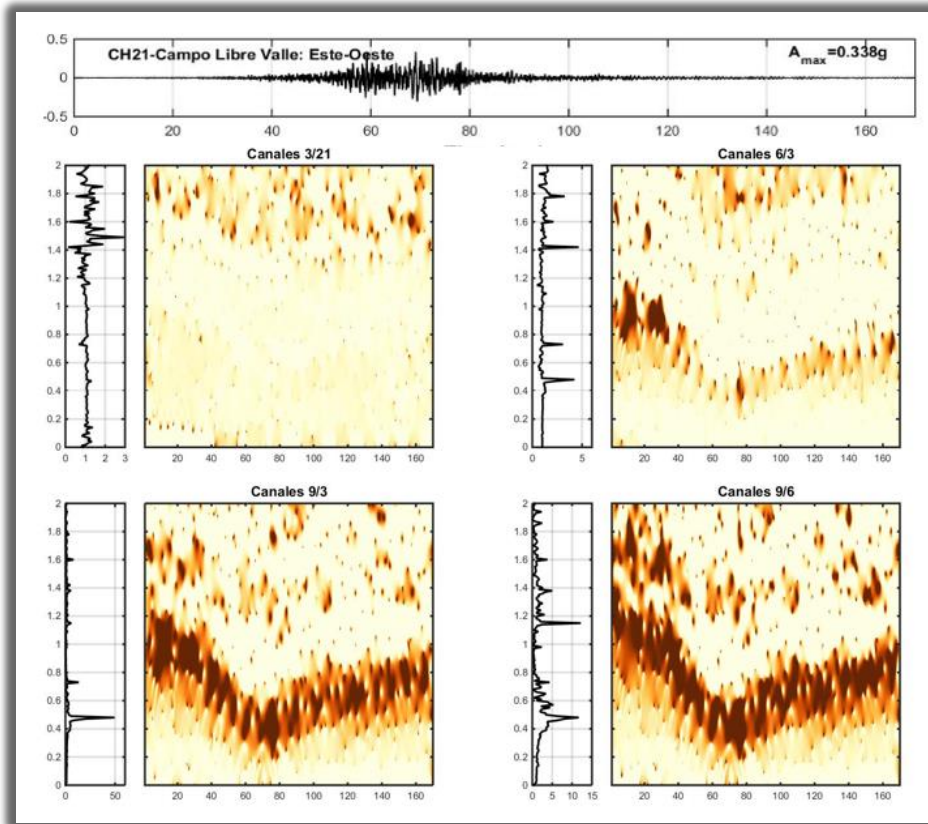


Figura 6-8: Función de transferencia por pequeñas ventanas, terremoto del Maule, dirección transversal

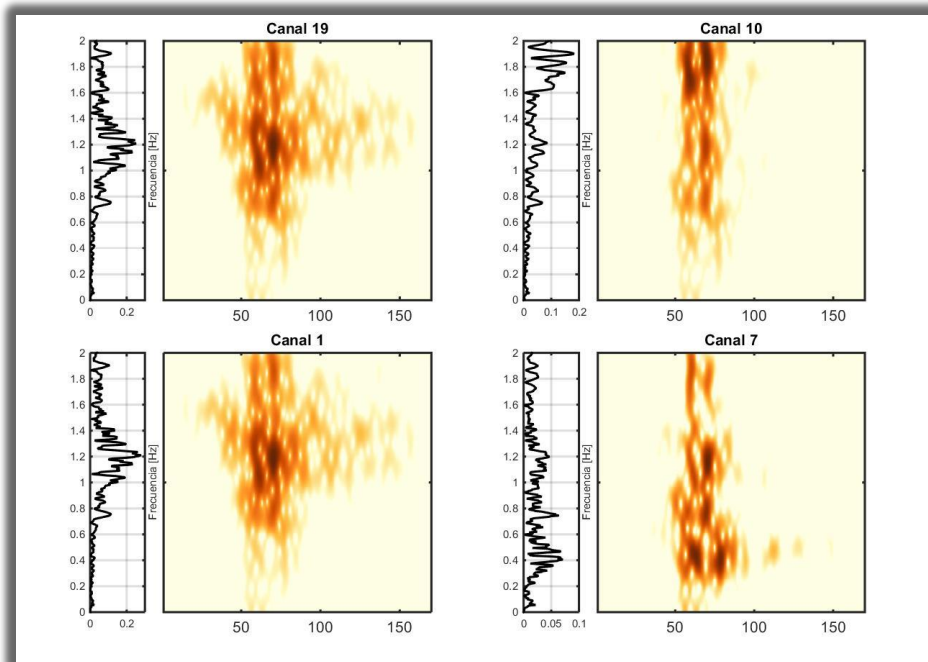


Figura 6-9: Espectrograma terremoto del Maule, dirección longitudinal

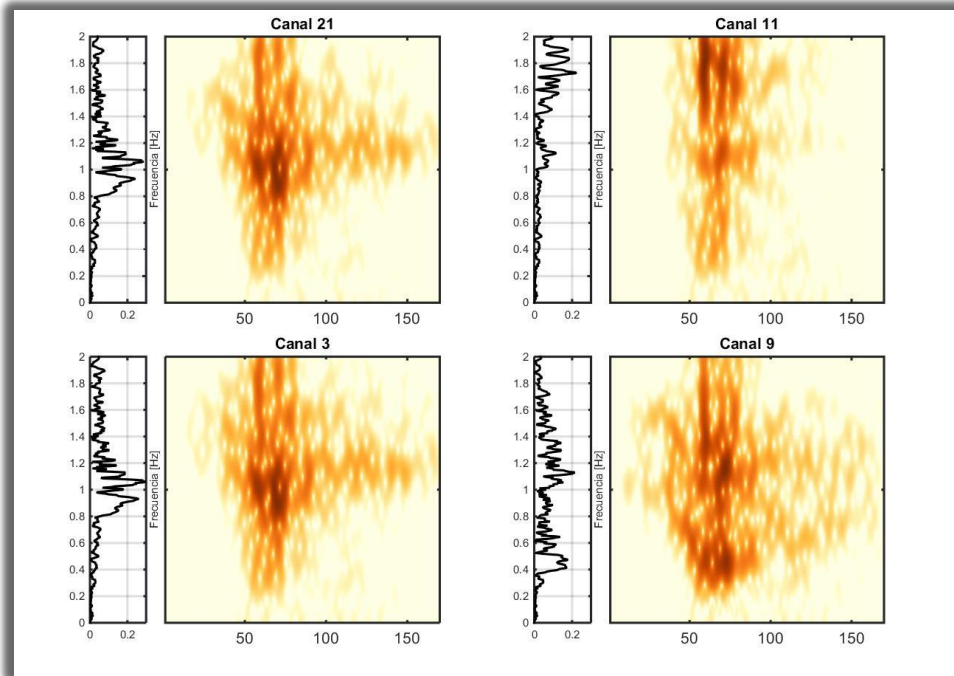


Figura 6-10: Espectrograma terremoto del Maule, dirección transversal

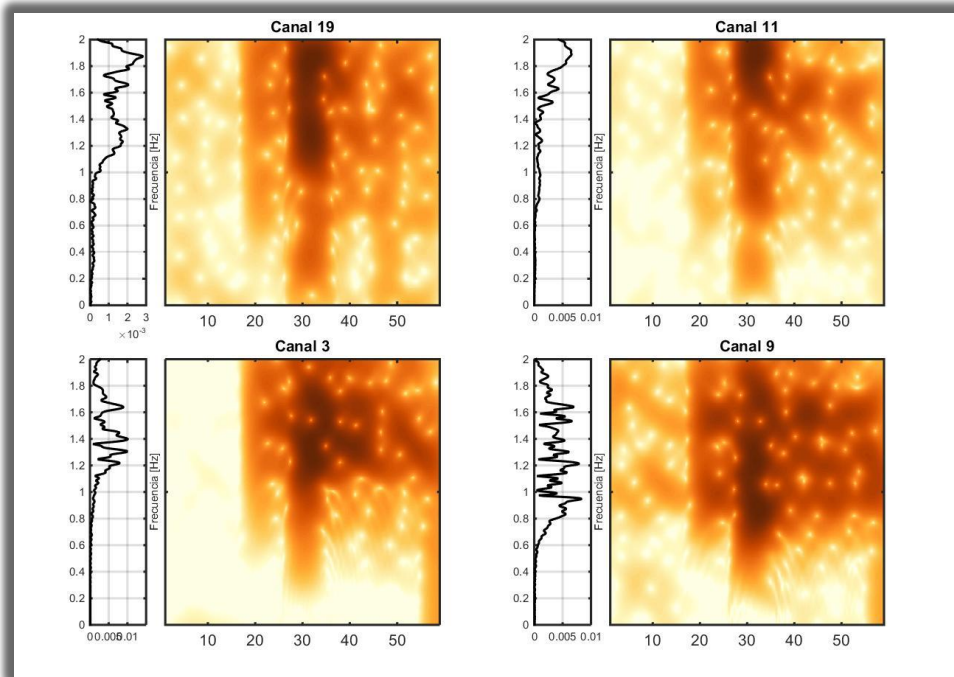


Figura 6-11: Espectrogramas sismo del 12/05/2018

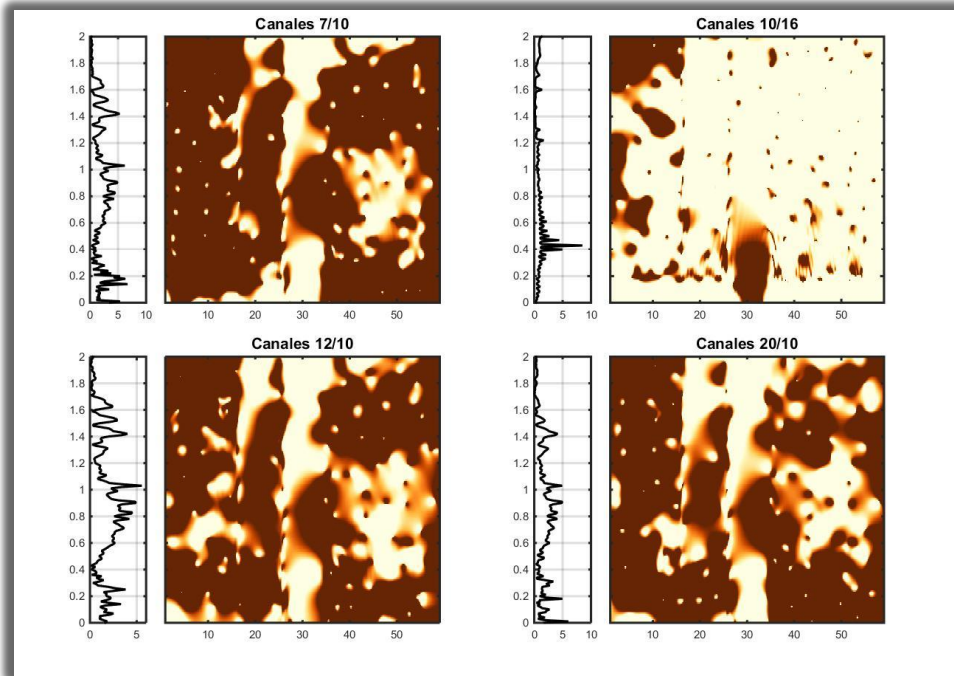


Figura 6-12: Función de transferencia por pequeñas ventanas, sismo del 12/05/2018

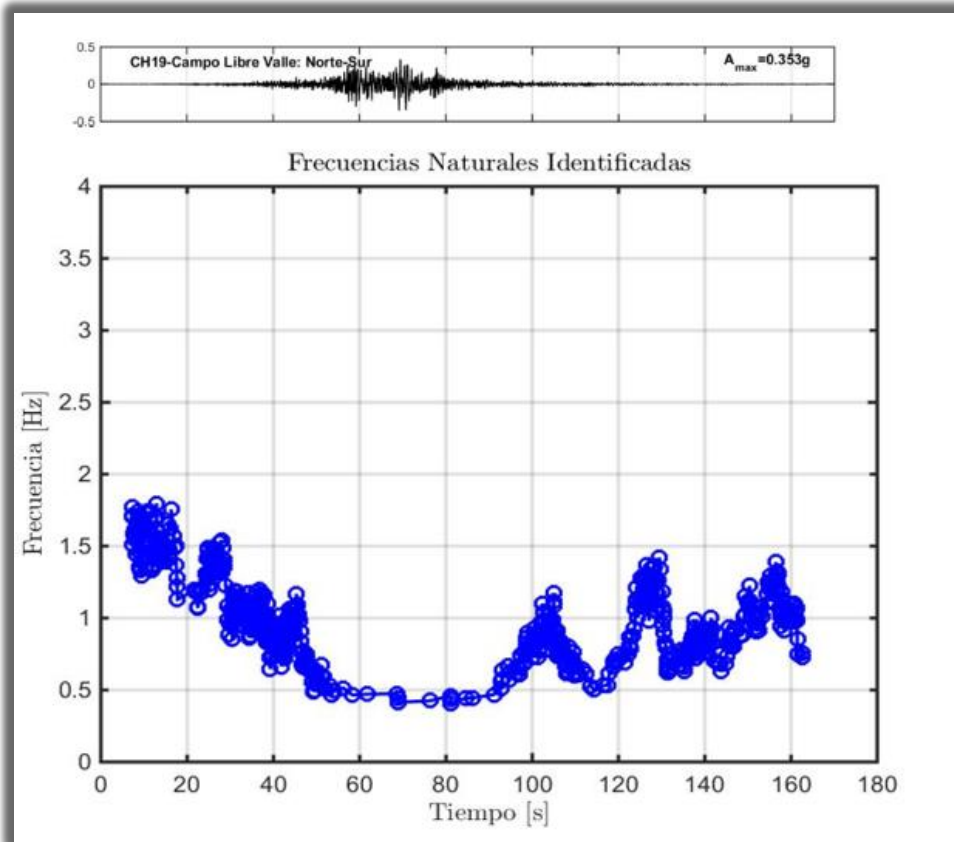


Figura 6-13: DSI por pequeñas ventanas, terremoto del Maule, dirección longitudinal

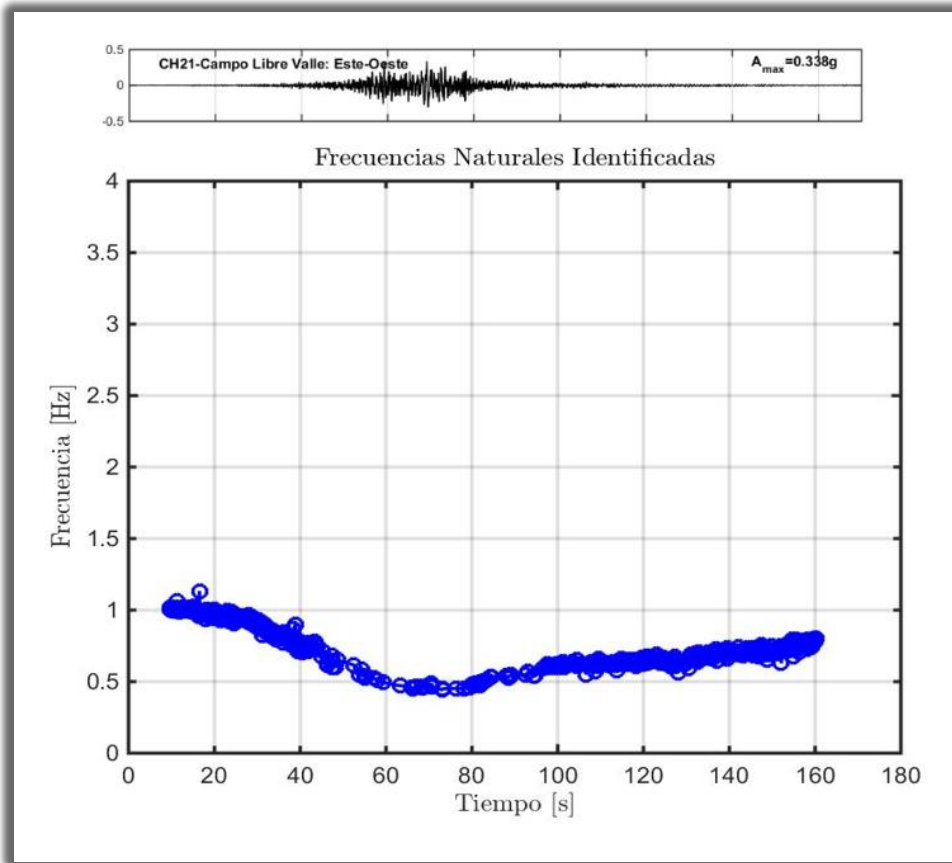


Figura 6-14: DSI por pequeñas ventanas, terremoto del Maule, dirección transversal

Capítulo 7

Conclusiones

7.1 Conclusiones generales

Puente Águila Norte:

Se cumple con los 2 objetivos principales, efectuando la identificación de las propiedades dinámicas del puente Águila norte, logrando identificar las frecuencias fundamentales en dirección longitudinal, transversal y vertical, además de identificar las frecuencias características de los 5 vanos de la estructura, más aun, se consigue identificar indicios de frecuencias características de cepas, lo que conlleva a la planificación de una nueva campaña de mediciones, en la cual se consigue reconocer la frecuencia de 3 cepas del puente.

Mediante el análisis del comportamiento modal del puente Águila Norte, se han podido observar y corroborar comportamientos generales, como lo son los modos fundamentales de la estructura, modos muy relevantes para el análisis y discusión de los modelos de elementos finitos del puente Águila Norte, que se encuentran en elaboración en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Como también se han observado comportamientos locales, como lo son los modos locales de cepa y vano, logrando identificar 3 frecuencias características para cada una de las cepas y dos frecuencias características para cada uno de los vanos, comportamiento que había sido previamente inferido por Balsebre (2019) para el viaducto El Salto, concluyendo que el análisis modal del puente Águila Norte no solo permite obtener resultados típicos como las frecuencias fundamentales, sino que da indicios sobre comportamientos singulares que aportan a la comprensión de la respuesta estructural de puentes.

Viaducto El Salto:

En cuanto a la creación de la plataforma de generación automática de informes sísmicos del viaducto El Salto, esta se realizó a cabalidad obteniendo resultados acordes a lo observado en estudios previos y logrando adaptar exitosamente los métodos presentes en la plataforma del edificio Antígona al viaducto El Salto, además de dotar de nuevas herramientas de análisis a la plataforma, como lo son los métodos de identificación de propiedades dinámicas variables en el tiempo. Asimismo, se complementa la plataforma con una guía de uso la cual contiene las directrices básicas sobre el tratamiento, funcionamiento y configuración del código de programación, de tal manera que pueda ser comprendido, utilizado y calibrado por miembros del RENADIC.

La plataforma de informes sísmicos del viaducto El Salto es una herramienta de gran utilidad y maleabilidad para el RENADIC, ya que permite identificar las propiedades dinámicas del viaducto de una manera más rápida y eficiente de lo que se obtenían a priori, permitiendo reportar al MOP en un corto lapsus de tiempo ocurrido un evento sísmico, sobre el comportamiento de la estructura, lo que puede ser de gran utilidad para tomar medidas de contingencia rápidas y eficientes ante eventos extremos. Además, los métodos utilizados en la plataforma fueron extensamente calibrados bajo un análisis crítico de sus resultados, de tal manera que estos muestren resultados de interés y dentro de lo ordenes esperados para la estructura.

7.2 Conclusiones Puente Águila Norte

Con respecto a la identificación de propiedades dinámicas del puente Águila Norte, mediante el análisis de los resultados de micro vibraciones ambientales, se puede concluir que:

En cuanto al comportamiento longitudinal de la estructura, se identifica el modo principal en valores cercanos a 1.98 [Hz], observándose un comportamiento levemente no-lineal, atribuible al paso de vehículos sobre la estructura que es capaz de generar un comportamiento inelástico de los elastómeros. También se identifican modos locales asociados a cada cepa, identificando los modos de las cepas 1, 2 y 3, en frecuencias del orden de 4.11, 3.95 y 3.99 [Hz]. Además, se observa que las cepas presentan 3 frecuencias “rocking” de valores 4.53, 5.18 y 9 [Hz], siendo la frecuencia de 5.18 [Hz] atribuible a un modo global del puente.

Se concluye que el movimiento trasversal se relaciona a varios modos de respuesta globales del tablero, correspondiéndose el primero de estos modos, a una frecuencia de 2.39 [Hz]. Además, se observan que las cepas poseen modos de respuesta locales, atribuyendo a cada cepa un modo característico, logrando identificar que la frecuencia de la cepa 1 se identifica en valores cercanos a 4.8 [Hz], la frecuencia de la cepa 2 se observa en valores cercanos a 4.46 [Hz] y la frecuencia de la cepa 3 se asocia a valores cercanos a 4.53 [Hz].

En el movimiento vertical se observa que cada vano posee un movimiento independiente que se caracteriza por una frecuencia vertical y otra de torsión respecto al eje longitudinal del tablero (Tabla 7-1), distinguible por una frecuencia vertical del orden de 3.9 [Hz], y una frecuencia de torsión del orden de 4.55 [Hz]. Adicionalmente se observan modos globales asociados al movimiento del tipo “warping” que involucran la respuesta de todos los vanos del tablero con frecuencias de 4.33 y 4.99 [Hz].

Tabla 7-1: Frecuencias asociadas al movimiento independiente de los vanos

Vano 1 [Hz]	Vano 2 [Hz]	Vano 3 [Hz]	Vano 4 [Hz]	Vano 5 [Hz]
3.93	3.99	3.86	3.9	3.85
4.64	4.60	4.50	4.55	4.51

Se identifica que la masa de los vehículos que transitan por el puente podría afectar a los modos longitudinales y transversales de las cepas (cuando los vehículos se ubican sobre las cepas), los cuales aumentan su respuesta a cuando transita un vehículo en su cercanía, además se observa que los vehículos pesados producen un efecto no-lineal en los modos de cepa, disminuyendo el valor de sus frecuencias asociadas.

Se realizan exitosamente las campañas de medición, con algunos contratiempos menores que no influyeron en el cumplimiento del objetivo planificado, se destacan los percances acaecidos en la tercera campaña de mediciones, en la cual, al momento de instalar los equipos, dos de los cables que alimentan a los acelerógrafos se cortaron, dejando fuera de servicio a estos sensores, a pesar de esto, se logra medir la respuesta de las cepas de forma satisfactoria.

Finalmente, se concluye que, para llevar a cabo una correcta medición de un puente con vanos compuestos por vigas independientes, se requiere medir cada vano por separado, fijando sensores en los otros vanos, igualmente, se requiere medir en ambos lados del tablero para identificar la torsión respecto al eje del tablero, además de realizar mediciones en el coronamiento de las cepas, de tal manera de identificar los modos de cepa.

7.3 Conclusiones Viaducto El Salto

Se concluye que los resultados calculados por la plataforma del viaducto El Salto son consistentes con los valores obtenidos previamente en estudios anteriores, ya que cuando se contrastan los espectros de densidad de potencia y los cocientes de amplificación sísmica entre acelerógrafos obtenidos mediante la plataforma, con sus similares en la literatura calculados por Sarrazín et Al (2012) y Boroschek et Al (2003), Sarrazín et Al (2005) y Taylor et Al (2010) respectivamente, se observan valores cercanos entre los diferentes análisis, lo que validaría la calibración de los parámetros utilizados en los métodos de identificación programados en la plataforma.

Se observa que el comportamiento de los aisladores sísmicos del viaducto El Salto se puede distinguir en los cocientes de amplificación entre canales calculados por la plataforma, apreciando que los aisladores sísmicos producen una des amplificación de la aceleración en el tablero, lo que se aprecia al comparar los registros de aceleraciones medidos en el coronamiento y el tablero sobre la cepa 4, mientras que al contrastar la señal medida entre el pie y el coronamiento de la cepa 4, se distingue un aumento de la aceleración producto de la respuesta estructural de la cepa. Por otra parte, los elastómeros proveen una alta rigidez vertical y por tanto se observa un nivel de amplificación de las aceleraciones verticales en el tablero.

Se aprecia del análisis de las aceleraciones máximas de 10 registros sísmicos, que, para sismos de medianas y altas intensidades, la aceleración máxima se registra en los canales del tablero que se encuentran sobre los estribos, lo que se atribuye al impacto del tablero con los topes sísmicos de la estructura o con los estribos, comportamiento que es igualmente reconocido por Boroschek et al. (2003), mientras que en sismos débiles la aceleración máxima ocurre sobre la viga de coronamiento de la cepa 4.

Al analizar el viaducto mediante el método DSI (Deterministic-Stochastic Subspace Identification), se observa que las frecuencias fundamentales longitudinales y transversales (2.051 y 1.035 [Hz] respectivamente) identificadas por Balsebre (2019), son las que disminuyen su valor hasta alcanzar la frecuencia objetivo del aislador sísmico de 0.5 [Hz] para sismos fuertes como el evento registrado en el terremoto del Maule 2010; por el contrario las demás frecuencias de 1.195, 1.625 y 1.817 [Hz] identificadas por Balsebre (2019), no muestran una variación ante el aumento de la intensidad de los sismos.

Se nota que al realizar los métodos de identificación DSI, al considerar como salidas del método a los canales ubicados en la superestructura, en vez de los canales localizados en la superestructura y las cepas, se distingue un aumento leve de las frecuencias calculadas por el método (dado que no incluye la flexibilidad de la cepa). Además, a pesar de no estar programado para registrar la variación de las propiedades, el método DSI logra notarla, ya que se puede apreciar en la tabla resumen de resultados del diagrama de estabilidad varias frecuencias asociadas a la misma forma modal, lo que podría identificarse como una variación de la frecuencia.

Mediante el análisis de los resultados de variación de propiedades dinámicas, se distingue que las funciones de transferencia y método de identificación DSI por pequeñas ventanas logran identificar una clara disminución de las frecuencias fundamentales, hasta alcanzar el periodo objetivo de 2 [s] de los aisladores sísmicos durante movimientos sísmicos fuertes, para luego recuperar sus valores iniciales.

Se observa que la función de transferencia y método de identificación DSI por pequeñas ventanas, logran demarcar la variación de la frecuencia en función del tiempo durante los eventos sísmicos, solo para el caso de sismos de gran intensidad, como el terremoto del Maule ($M_w=8.8$), mientras que para el resto de los sismos no entrega resultados claros. Asimismo, los espectrogramas no entregan resultados satisfactorios en ninguno de los casos, por lo que se concluye que el análisis de la variación de propiedades durante eventos sísmicos se debe limitar solo para sismos de intensidad fuerte, descartando el uso de espectrogramas, en favor de la función de transferencia y método de identificación DSI por pequeñas ventanas.

Se concluye que la plataforma de generación automática de informes sísmicos representa una mejora en la rapidez y eficiencia con la que se analizan los registros sísmicos por el RENADIC, logrando aumentar la cantidad de información entregada por cada informe y disminuyendo los tiempos de análisis de datos, pasando de días a pocas horas.

7.4 Comentarios y aprendizajes

Comentarios puente Águila Norte:

Se observa que el estudio de micro vibraciones ambientales es una herramienta muy práctica para investigar las propiedades dinámicas de estructuras, ya que es de fácil implementación, es un método no-invasivo y de costo moderado, características que permiten que su implementación sea realizada sin necesidad de una gran cantidad de recursos humanos y monetarios. Además, como se ha observado en el presente

trabajo, entrega resultados generales sobre el comportamiento de estructuras complejas como son los puentes.

Debido al comportamiento mayoritariamente global de las formas modales transversales del puente Águila Norte, es que se recomienda realizar una medición completa del tablero en sentido transversal, para visualizar de mejor forma los modos globales.

Comentarios viaducto El Salto:

La plataforma de informes sísmicos del viaducto El Salto entrega una gran variedad de resultados, tanto para el uso académico como para la ingeniería práctica, resaltando al método de identificación DSI por la claridad de los resultados entregados, dejando un poco de lado a los espectros de densidad de potencia, los que, a pesar de ser una herramienta útil, requiere de un experto que los analice e interprete, sumado al hecho que estos siempre tendrán presente el efecto del input sísmico.

Se recomienda utilizar los primeros cuatros casos del método DSI programados en la plataforma para analizar los registros sísmicos futuros, ya que por lo general el caso 1 y 3 reconocen formas modales características que los casos 2 y 4 no reconocen y viceversa, por lo que para concretar un completo análisis del viaducto El Salto, se requiere trabajar con los casos en complemento, por otra parte, los casos generales de análisis no han mostrado entregar información extra que la entregada por demás casos sobre el comportamiento del puente, por lo que el uso de estos no se consideran tan relevantes, además que requieren de un mucho mayor tiempo de cálculo en comparación con los casos longitudinales (casos 1 y 2) y transversales (casos 3 y 4).

A modo de obtener resultados más claros y definitivos sobre el comportamiento del suelo sobre el que se funda el viaducto El Salto, se recomienda instalar nuevos equipos en el campo libre y que estos se ubique a una mayor distancia de las cepas, ya que la cercanía entre el campo libre hace que este sea influenciado notoriamente por la respuesta del viaducto al presentar frecuencias características asociadas a los modos fundamentales del puente (cepas y tablero).

Se observa que los métodos de identificación de propiedades como el método de las frecuencias y los métodos DSI y SSI, son herramientas de análisis muy útiles y complejos, a pesar de esto, los resultados que entregan pueden verse contaminados por diferentes efectos, como lo puede ser el comportamiento no-lineal de la estructura o como lo puede ser la misma interpretación que realiza el método de la estructura dependiendo de la configuración de los parámetros del método, como tiempo de duración de ventanas, grados de libertad utilizados, tolerancias, entre otros. Debido

a lo anterior es que estos métodos deben trabajar en complemento con otros métodos, siendo una muy buena combinación la utilización del método de las frecuencias con el método DSI o SSI, lo que se debe a que la información extra que entregan los métodos DSI o SSI, pueda ser filtrada por los resultados fundamentales entregados por los espectros de densidad de potencia y, por otra parte, la complejidad del análisis de los espectros, puede ser interpretada por los resultados de los métodos SSI o DSI.

Aprendizajes

A lo largo del presente trabajo de título se ha profundizado sobre el uso de métodos de identificación sofisticados para el análisis de registros sísmicos y de micro vibraciones ambientales, lo cual ha permitido comprender sobre el funcionamiento y calibración de estos métodos, además de entender sobre cómo se interpretan los resultados calculados, de tal forma de poder asociar modos y comportamientos a la estructura global, como de forma local a las respuestas de sus elementos. Para esto ha sido necesario investigar sobre el comportamiento de los puentes, haciendo énfasis en su comportamiento no-lineal y como este afecta a sus propiedades dinámicas mediante la disminución de sus frecuencias características, lo cual varía su magnitud dependiendo del tipo de registro, siendo mayor el efecto no-lineal para registros sísmicos. Además, ha sido menester el aprendizaje de los lenguajes programación MATLAB y LATEX en la construcción y diseño de la plataforma, asimismo de realizar un completo análisis del comportamiento del viaducto El Salto. Los diversos tópicos sobre los cuales se ha profundizado el aprendizaje y comprensión se resumen a continuación:

- ✓ Programación, funcionamiento y calibración de métodos sofisticados de análisis de propiedades dinámicas, como lo son el método del dominio de las frecuencias y los métodos de identificación DSI y SSI.
- ✓ Análisis e interpretación de los resultados entregados por los métodos de identificación, logrando identificar modos fundamentales de las estructuras en estudio, además de modos locales asociados a elementos en específico del puente.
- ✓ Se ha reconocido el comportamiento de un puente formado por vigas independientes, logrando identificar la presencia de una frecuencia fundamental y de torsión para cada uno de los vanos, además de la presencia de 3 frecuencias características por cepa.
- ✓ La codificación de lenguajes de programación como LATEX y MATLAB.
- ✓ Comportamiento del viaducto El Salto mediante el estudio de bibliografía asociada a sus formas modales, amplificación sísmica y comportamiento de

los aisladores sísmicos, para luego complementar esta información con los nuevos datos aportados por la plataforma.

- ✓ Estudio del efecto del comportamiento no-lineal de los puentes, observado en la disminución de las frecuencias características identificadas en las estructuras.
- ✓ Compresión sobre el manejo, configuración e instalación de los diferentes equipos utilizados en el registro de micro vibraciones ambientales, además de participar en la instalación, registro y planificación de una campaña de mediciones.

Finalmente se reflexiona sobre la complejidad que representa el análisis estructural del comportamiento de puentes, ya que como se ha notado en el presente trabajo, los modos de vibración se componen de la conjugación de los diversos elementos que conforman la estructura, los que a su vez poseen comportamiento característicos, como los identificados en cepas y vanos, lo anterior se debe agregar a la importante componente no-lineal presente en los puentes, que no es exclusiva de estructuras aisladas sísmicamente, sino que se observa igualmente en viaductos con apoyos elastómericos. Debido a lo anterior, es que métodos como el análisis de los espectros de densidad de potencia y métodos de identificación DSI o SSI, se deben calibrar y complementar entre sí, con el fin de dilucidar que representa cada uno de los “peaks” y frecuencias detectadas, ya que estas pueden atribuirse tanto a modos locales o globales, como a modos duplicados debido al efecto no-lineal del puente, como pueden deberse a comportamiento específicos de los componentes de la estructura.

Bibliografía

- Arrochas, A. (2019). *Identificación de las propiedades dinámicas de un estanque de nivel de agua variable*. Universidad de Chile.
- Astroza, R., Ebrahimian, H., Conte, J., Restrepo, J., & 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*, 535-559.
- Astroza, R., Gutiérrez, G., Repennin, C., & Hernandez, F. (2018). *Time-variant modal parameters and response behavior of a base-isolated building tested on a shake table Earthquake spectra*.
- Balsebre, M. (2019). *Estudio de variación en el tiempo de propiedades dinámicas de puentes Chilenos con aislación sísmica por medio de análisis de micro vibraciones*. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil, Universidad de Chile.
- Berrios, R. (2003). *Amplificación Local en el viaducto Marga-Marga*. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil, Universidad de Chile.
- Boroschek, R., Ofelia, M., & Sarrazín, M. (2003). *Dynamic characteristics of a long span seismic isolated bridge*. Universidad de Chile.
- Buckle, I., Hube, M. ., Yen, W., & Arias, J. (2012). Structural performance of bridges in the offshore Maule earthquake of 27 February 2010. *Earthquake Spectra*, S533-S552.
- Castillo, A., & Boroschek, R. (2002). *Código N° a14-11. Uso del Método de Frecuencias no Paramétricas y SSI para la identificación de propiedades*. (Noviembre).
- Costa, M. (2019). *Estudio del comportamiento del edificio Antígona sometido a sismos de mediana intensidad*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Crisafulli, F. (2002). *Espectros de respuesta y de diseño*. Universidad Nacional de Cuyo.
- Daza, V. (2003). *Interacción Sísmica Suelo-Estructura en el Puente Marga-Marga*. Universidad de Chile.

- Díaz, A. (2004). *Análisis de micro vibraciones del viaducto Marga-Marga II*. Universidad de Chile.
- Díaz, P. (2017). *Análisis de estructuras aisladas con el método de múltiples entradas sísmicas*.
- Dirección de vialidad, M. (2015). *Dimensionamiento y características de la red vial nacional*. Santiago. Obtenido de <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/gestionvial/Paginas/Informesyestudios.aspx>
- Hernández, F. (2009). *Análisis de métodos de identificación de variación de propiedades dinámicas*. Universidad de Chile.
- Kawashima, K., Unjoh, S., Hoshikuma, J., Kosa, & K. (2011). Damage of bridges due to the 2010 Maule, Chile, Earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 1036-1068.
- LOGICBUS. (s.f.). Recuperado el 15 de Agosto de 2019, de <https://www.logicbus.com.mx/DAQBOOK-2005.php>
- Peeters, B. (2000). *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*. Katholieke Universiteit Leuven.
- RENADIC. (2017). *Registros de sismos enero 2017 a agosto 2017*. Universidad de Chile.
- RENADIC. (13 de Agosto de 2019). Obtenido de <http://www.terremotosuchile.cl/anexos/marga2.html>
- Romo, D. (1999). *Análisis de registros sísmicos y microambientes en el puente Marga Marga*. Universidad de Chile.
- Sarrazín, M., Moroni, O., & Roesset, J. (2005). *Evaluation of dynamic response characteristics of seismically isolated bridges in Chile*.
- Sarrazín, M., Moroni, O., Neira, C., & Venegas, B. (2012). *performance of bridges with seismic isolation during the Maule earthquake, Chile*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
- Taylor, D., Trigo, T., Moroni, O., & Sarrazín, M. (2010). *Dynamic Analysis of Marga-Marga Bridge Considering Spatial Variation of Seismic Input*. Universidad de Chile.
- Valdés, P. (2004). *Identificación paramétrica de sistemas estructurales utilizando el método del subespacio estocástico*. Universidad de Chile.

- Van Overschee, P., & De Moor, B. (1996). *Subspace Identification for linear Systems*.
- Verdugo, A. (1996). *Estudio geofísico de los suelos de fundación para una zonificación sísmica de Valparaíso y Viña del Mar*. Universidad de Chile.
- Wilches, J. (2017). *Comportamiento sísmico de puentes carreteros Chilenos, con llaves de corte externas de sacrificio en zonas de alta amenaza sísmica*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

Anexos

Anexo A

Respuesta longitudinal de la primera campaña de mediciones

Se correlacionan las frecuencias identificadas por el método de análisis de frecuencias (Figura 8-1) y en el método del subespacio estocástico (Figura 8-2), distinguiendo 5 puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia, que corresponden a frecuencias identificadas en la estructura, de las cuales se verifica la globalidad de la frecuencia mediante la función coherencia.

La totalidad de las frecuencias identificadas mediante el método de análisis de frecuencias, se replican en el método SSI (Tabla 8-1). Vale recalcar que se aprecian un mayor número de frecuencias en el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, las cuales pueden deberse a modos secundarios o elementos que estén vibrando en la estructura, es por esto por lo que se contrastan ambos métodos.

Las cimas de energía del espectro de potencia, se asocian a los canales ubicados en la estructura, mientras que el canal ubicado en el estribo no muestra puntos de energía, esta baja energía en el estribo se condice con lo observado en las formas modales (Figura 8-3), las que muestran un casi nulo movimiento del estribo, este comportamiento refleja que el movimiento en el estribo no es comparable con el de los sensores dispuestos en el tablero. Al igual que en la medición Águila 2, se observa un modo fundamental en 2.01 Hz, asociado al tablero, además de varios puntos altos de energía en 3.9 Hz, que se relacionan a la respuesta de las cepas.

Tabla 8-1: Frecuencias identificadas en la medición Águila 3, dirección longitudinal

Frecuencia identificada PSD [Hz]	Frecuencia identificada SSI [Hz]	Coherencia
2.01	2.004	Alta
3.93	3.893	Baja
4.46	4.500	Baja
5.76	5.739	Baja
8.26	5.722	Baja

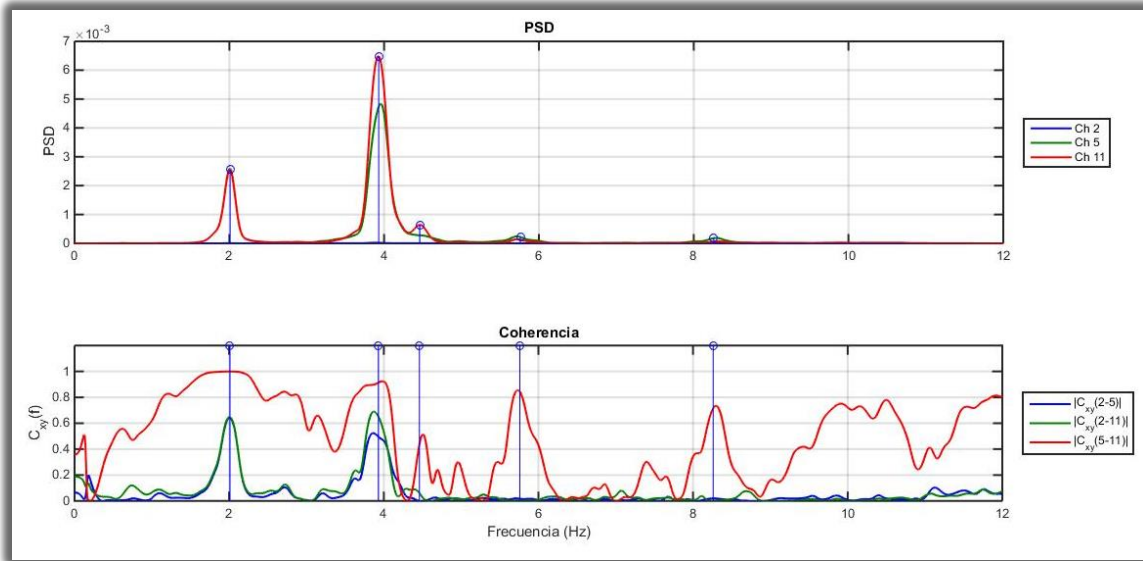


Figura 8-1: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 3, dirección longitudinal

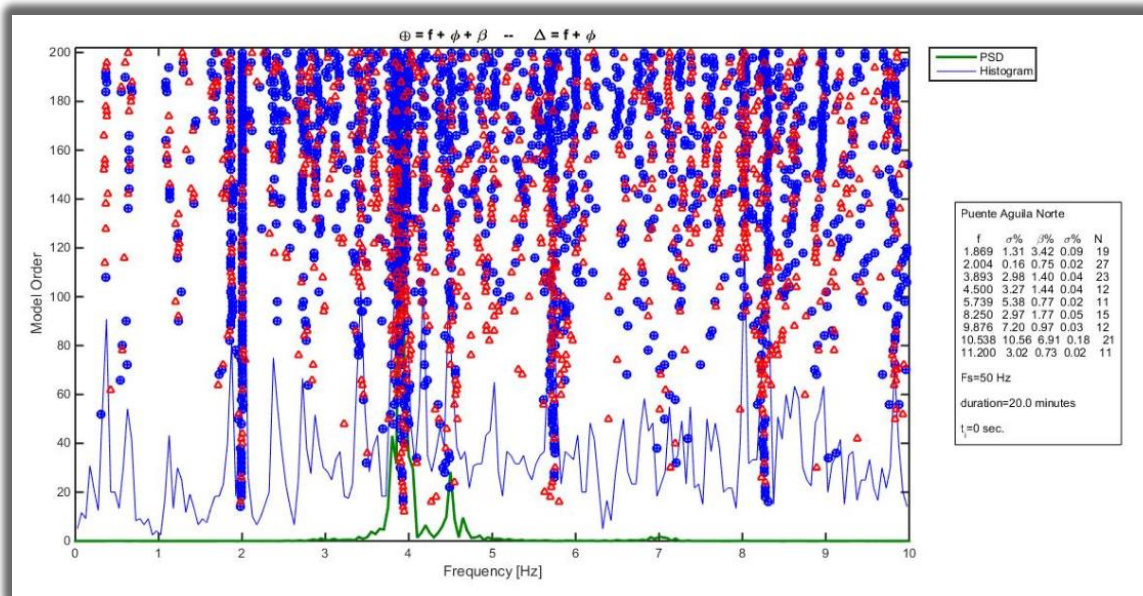


Figura 8-2: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 3, dirección longitudinal

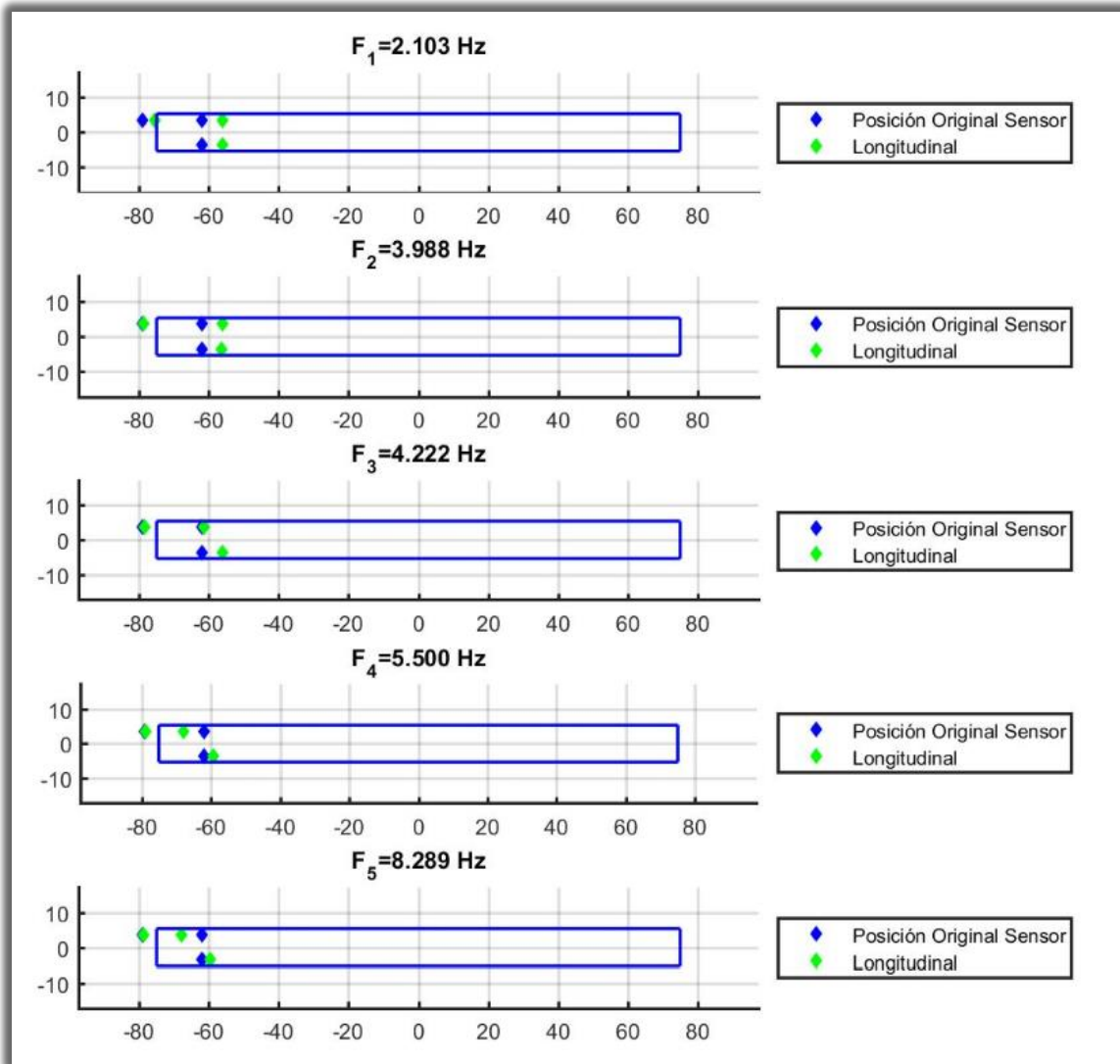


Figura 8-3: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 3, dirección longitudinal

Respuesta transversal de la primera campaña de mediciones

Medición Águila 2

Se correlacionan las frecuencias identificadas por el método de análisis de frecuencias (Figura 8-4) y en el método del subespacio estocástico (Figura 8-5), distinguiendo 10 puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia, que corresponden a frecuencias identificadas en la estructura, de las cuales se verifica la globalidad de la frecuencia mediante la función coherencia.

La totalidad de las frecuencias identificadas mediante el método de análisis de frecuencias, se replican en el método SSI (Tabla 8-2). Vale recalcar que se aprecian un mayor número de frecuencias en el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, las cuales pueden deberse a modos secundarios o elementos que estén vibrando en la estructura, es por esto por lo que se contrastan ambos métodos. Se aprecia en las figuras de formas modales (Figura 8-6 y Figura 8-7) que los canales 1 y 4, presentan un movimiento casi idéntico, evidenciando que los modos transversales son globales para el tablero.

Tabla 8-2: Frecuencias identificadas en la medición Águila 2, dirección transversal

Frecuencia identificada PSD [Hz]	Frecuencia identificada SSI [Hz]	Coherencia
2.37	2.388	Alta
2.77	2.766	Alta
3.35	3.343	Alta
3.89	3.865	Baja
4.16	4.16	Alta
4.47	4.498	Baja
4.93	4.917	Alta
5.7	5.71	Alta
6.88	6.879	Alta
8.22	8.214	Alta

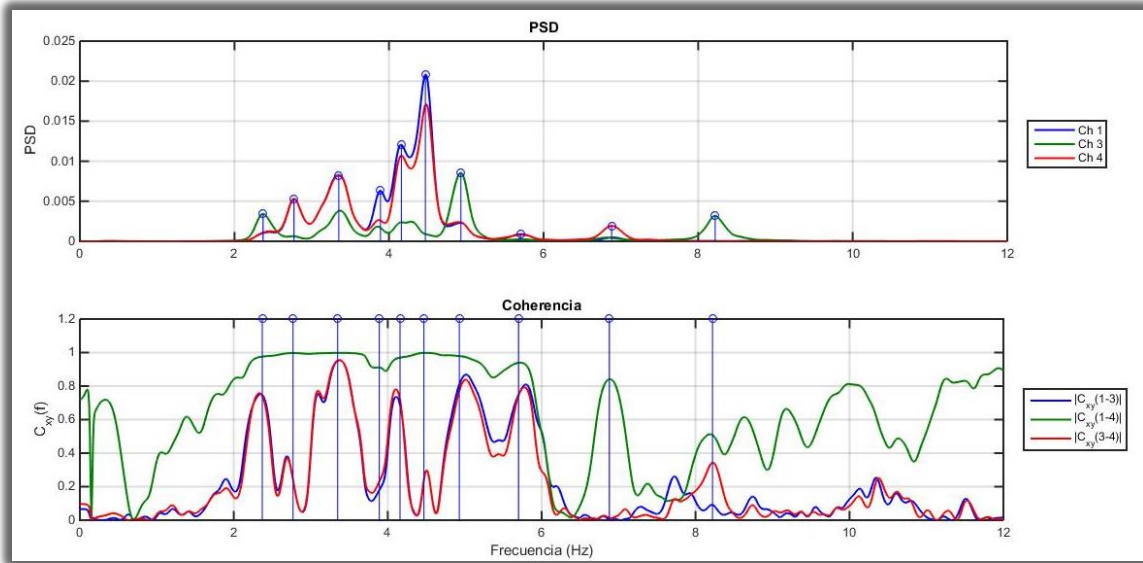


Figura 8-4: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 2, dirección transversal

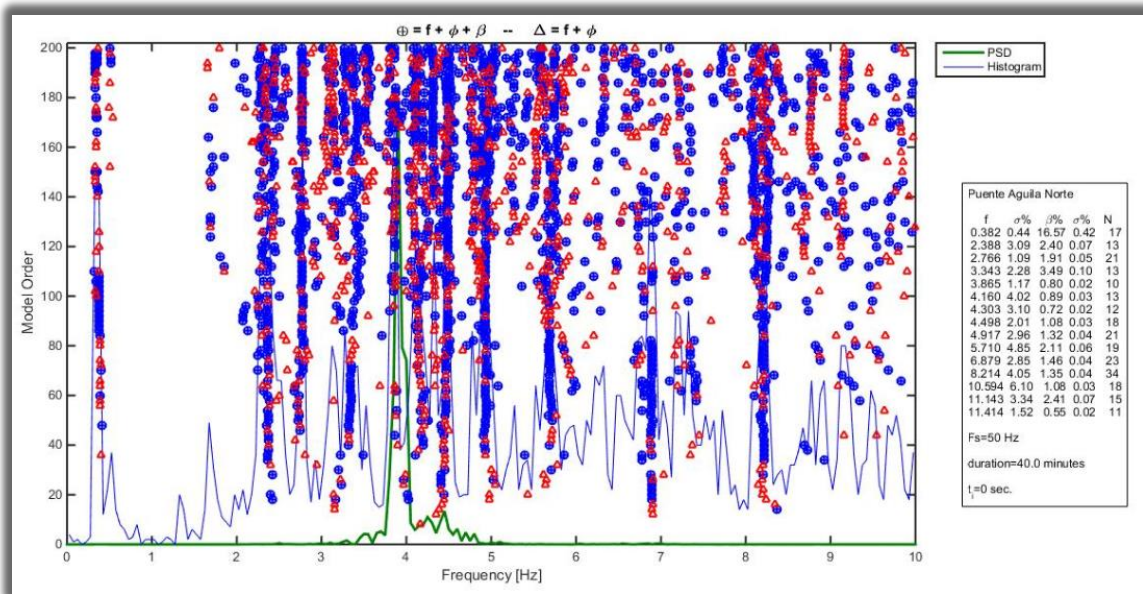


Figura 8-5: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 2, dirección transversal

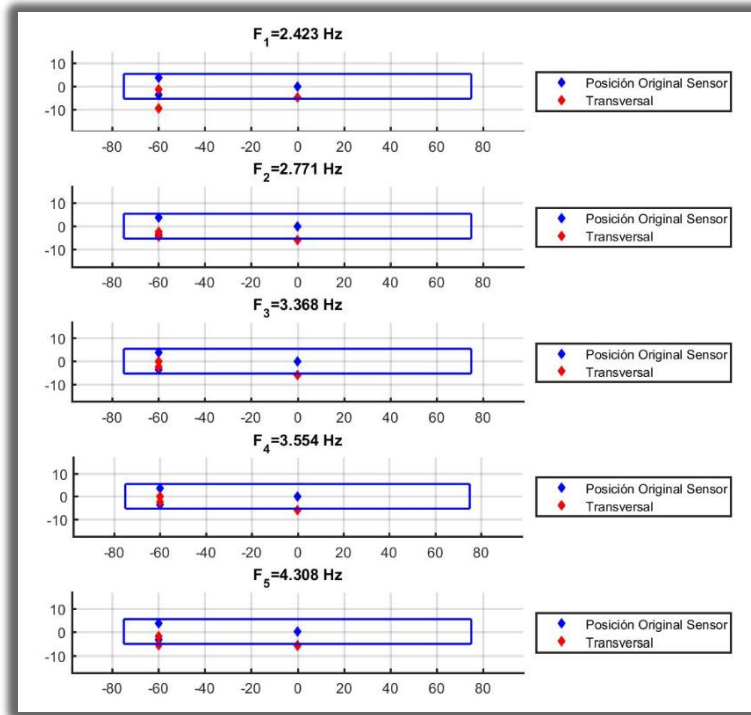


Figura 8-6: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondientes a la medición Águila 2, dirección transversal

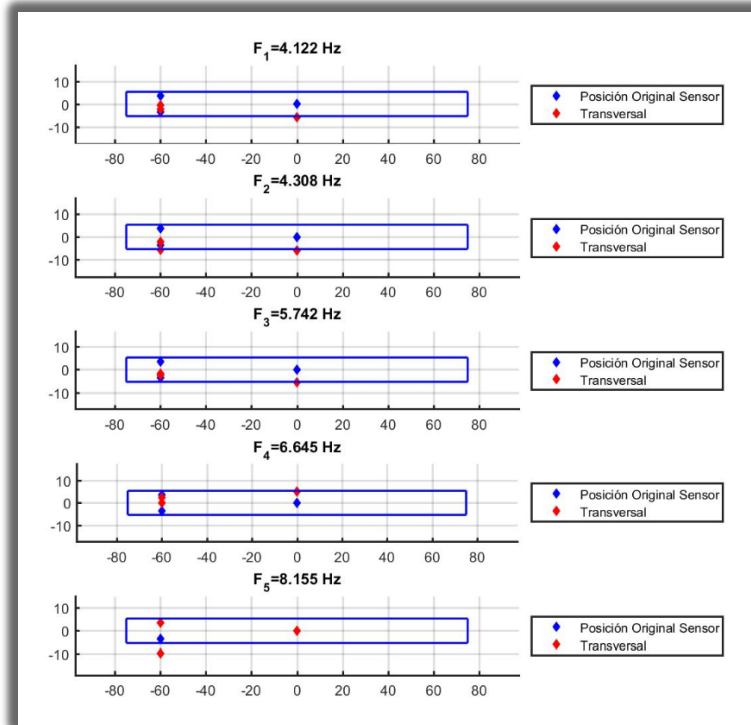


Figura 8-7: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondientes a la medición Águila 2, dirección transversal

Medición Águila 3

Se correlacionan las frecuencias identificadas por el método de análisis de frecuencias (Figura 8-8) y en el método del subespacio estocástico (Figura 8-9), distinguiendo 9 puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia, que corresponden a frecuencias identificadas en la estructura, de las cuales se verifica la globalidad de la frecuencia mediante la función coherencia.

8 de las frecuencias identificadas mediante el método de análisis de frecuencias, se replican en el método SSI (Tabla 8-3). Vale recalcar que se aprecian un mayor número de frecuencias en el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, las cuales pueden deberse a modos secundarios o elementos que estén vibrando en la estructura, es por esto por lo que se contrastan ambos métodos.

Se observa una alta coherencia entre los canales 3 y 4(ubicados en el vano 1), mientras que el canal 1(ubicado en el estribo), presenta una muy baja coherencia con los canales 3 y 4, además de una muy baja energía en comparación con los canales del vano 1, demostrando que el sensor del estribo casi no tiene movimiento. Se aprecia en la Figura 8-10 que los canales 3 y 4, presentan un movimiento casi idéntico, evidenciando que los modos transversales son globales para el tablero.

Tabla 8-3: Frecuencias identificadas en la medición Águila 3, dirección transversal

Frecuencia identificada PSD [Hz]	Frecuencia identificada SSI [Hz]
2.44	2.417
2.83	2.81
3.42	3.388
4.18	4.175
4.49	4.485
4.97	4.962
5.7	5.789
6.97	6.976
7.65	-

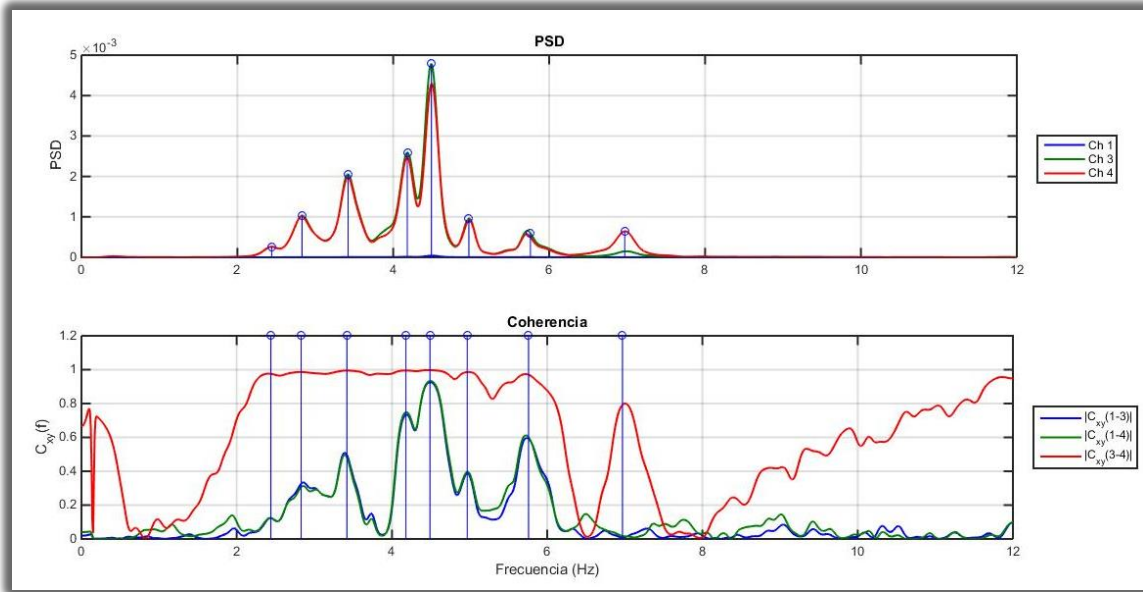


Figura 8-8: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 3, dirección transversal

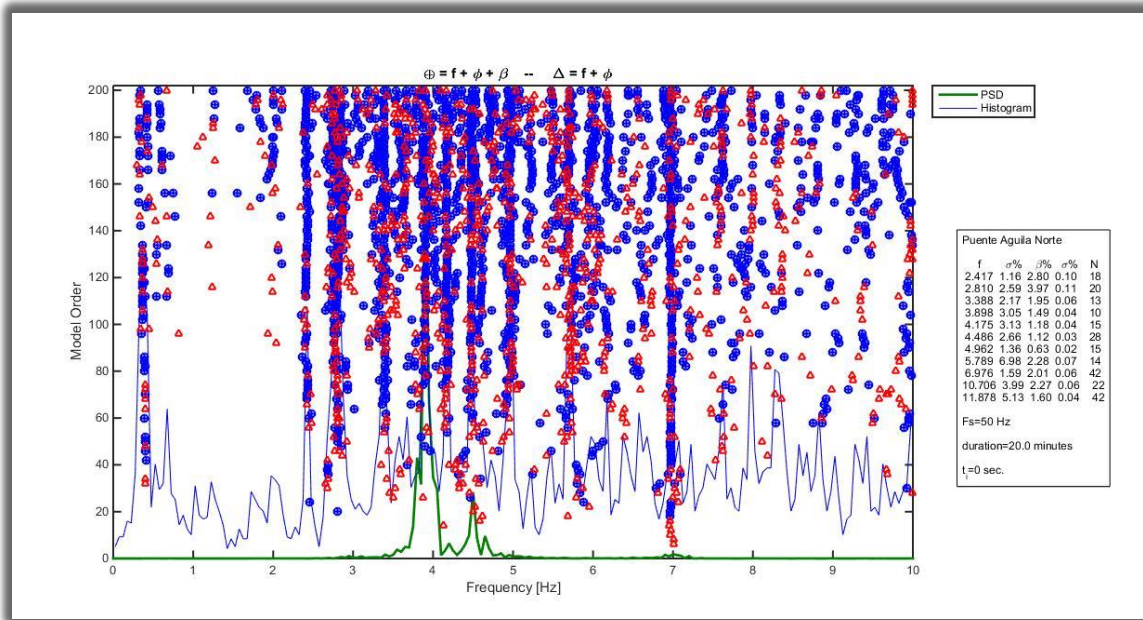


Figura 8-9: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 3, dirección transversal

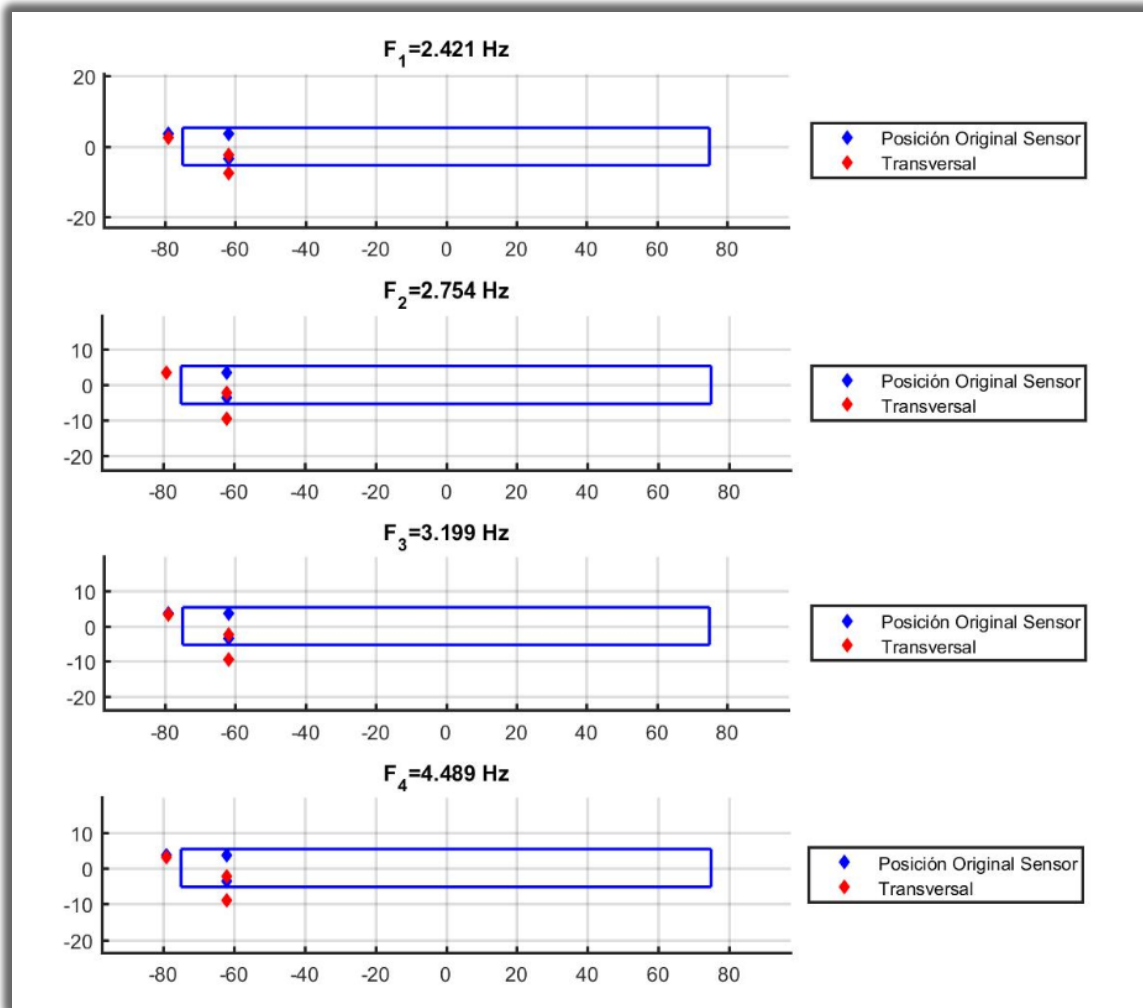


Figura 8-10: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 3, dirección transversal

Respuesta vertical de la primera campaña de mediciones

Medición Águila 2

Se correlacionan las frecuencias identificadas por el método de análisis de frecuencias (Figura 8-11) y en el método del subespacio estocástico (Figura 8-12), distinguiendo 3 puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia, que corresponden a frecuencias identificadas en la estructura, de las cuales se verifica la globalidad de la frecuencia mediante la función coherencia.

La totalidad de las frecuencias identificadas mediante el método de análisis de frecuencias, se replican en el método SSI (Tabla 8-4). Vale recalcar que se aprecian un mayor número de frecuencias en el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, las cuales pueden deberse a modos secundarios o elementos que estén vibrando en la estructura, es por esto por lo que se contrastan ambos métodos.

Se obtiene que las tres frecuencias identificadas poseen una alta coherencia, lo que se corresponde con que los canales estén dispuestos solo en el primer vano. Al analizar las formas modales obtenidas mediante el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico (Figura 8-13), se observa un modo fundamental vertical del vano 1, con una frecuencia cercana a los 3.87 [Hz], Además se aprecian efectos de torsión en frecuencias cercanas a 4.495 y 7.423 [Hz].

Tabla 8-4: Frecuencias identificadas en la medición Águila 2, dirección vertical

Frecuencia identificada PSD [Hz]	Frecuencia identificada SSI [Hz]	Coherencia
3.87	3.869	Alta
4.5	4.49	Alta
6.87	6.888	Alta

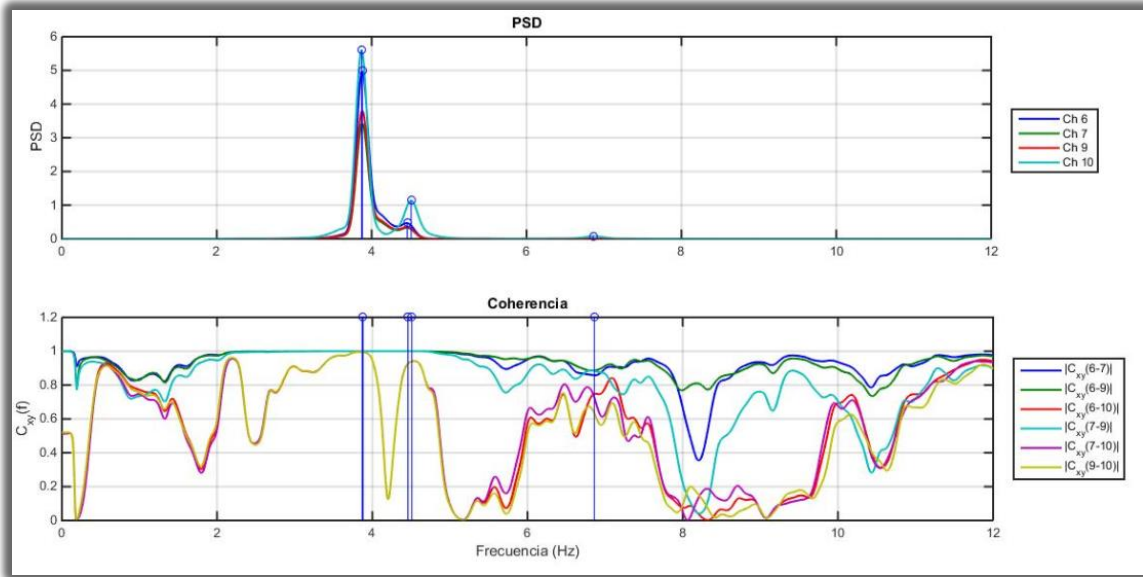


Figura 8-11: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 2, dirección vertical

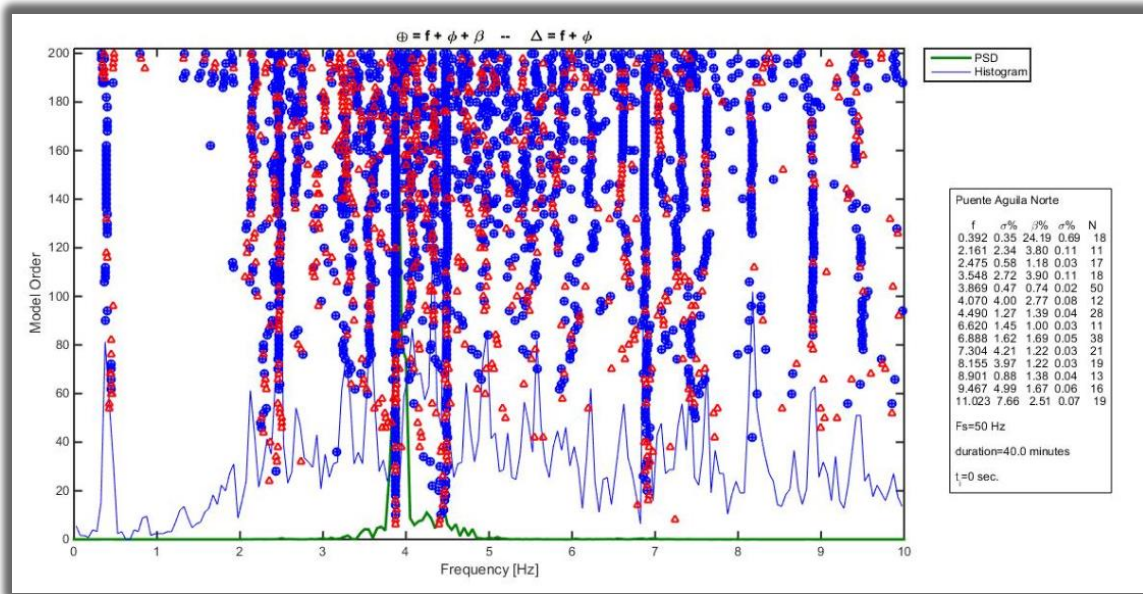


Figura 8-12: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 2, dirección vertical

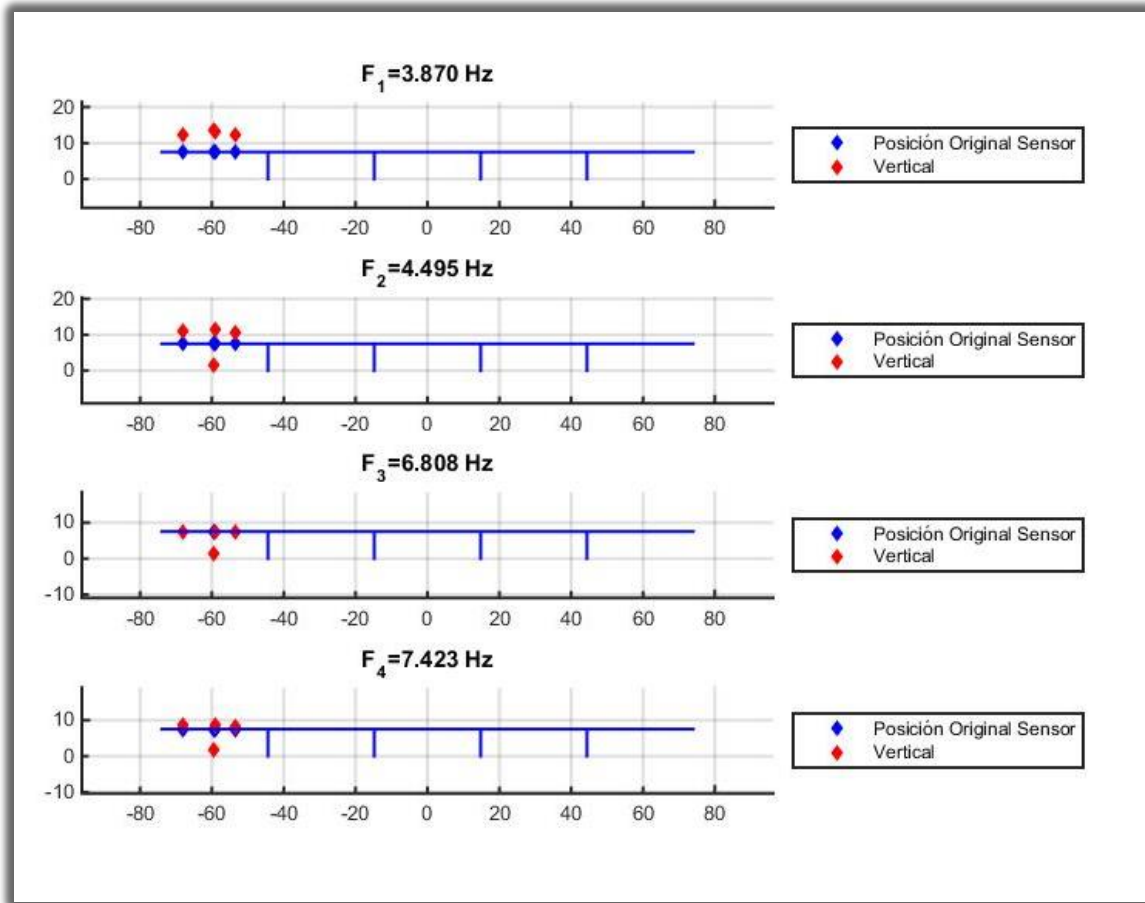


Figura 8-13: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 2, dirección vertical

Medición Águila 3

Se correlacionan las frecuencias identificadas por el método de análisis de frecuencias (Figura 8-15) y en el método del subespacio estocástico (Figura 8-14), distinguiendo 5 puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia, que corresponden a frecuencias identificadas en la estructura, de las cuales se verifica la globalidad de la frecuencia mediante la función coherencia.

4 de las frecuencias identificadas mediante el método de análisis de frecuencias, se replican en el método SSI (Tabla 8-5). Vale recalcar que se aprecian un mayor número de frecuencias en el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, las cuales pueden deberse a modos secundarios o elementos que estén vibrando en la estructura, es por esto por lo que se contrastan ambos métodos.

Al analizar las formas modales obtenidas mediante el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico (Figura 8-16), se observa efectos de torsión en frecuencias cercanas a 4.493 y 6.954 [Hz]. También se observa que los canales ubicados en el estribo (canales 6 y 9), no presentan movimiento comparable con los sensores dispuestos en el tablero.

Tabla 8-5: Frecuencias identificadas en la medición Águila 3, dirección vertical

Frecuencia identificada PSD [Hz]	Frecuencia identificada SSI [Hz]	Coherencia
3.88	3.853	Alta
4.36	-	Alta
4.51	4.493	Alta
4.97	4.975	Baja
6.97	7.005	Alta

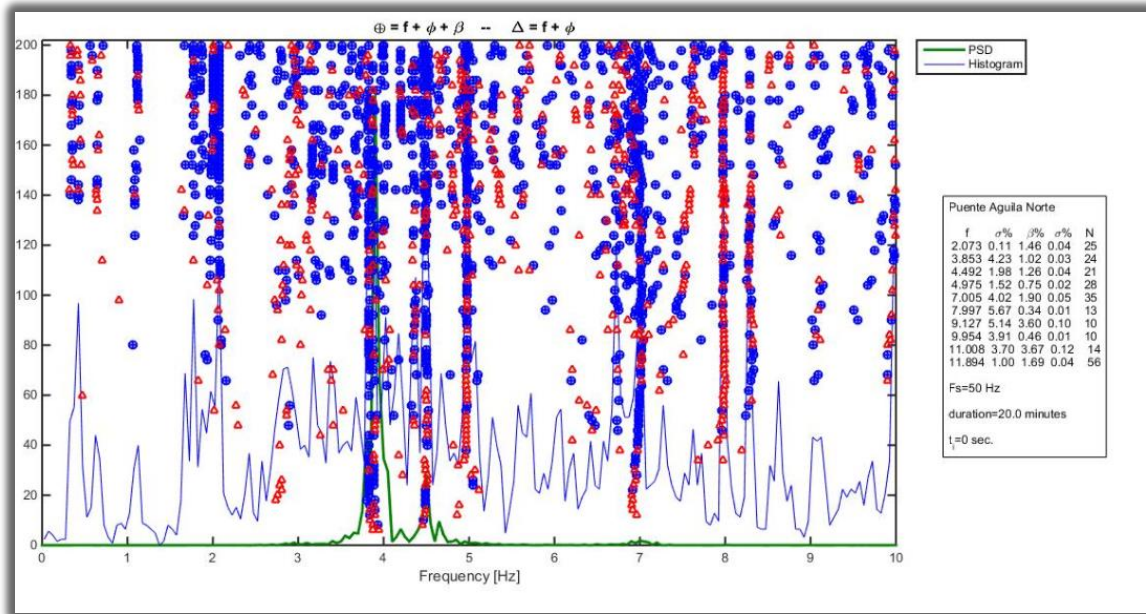


Figura 8-14: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 3, dirección vertical

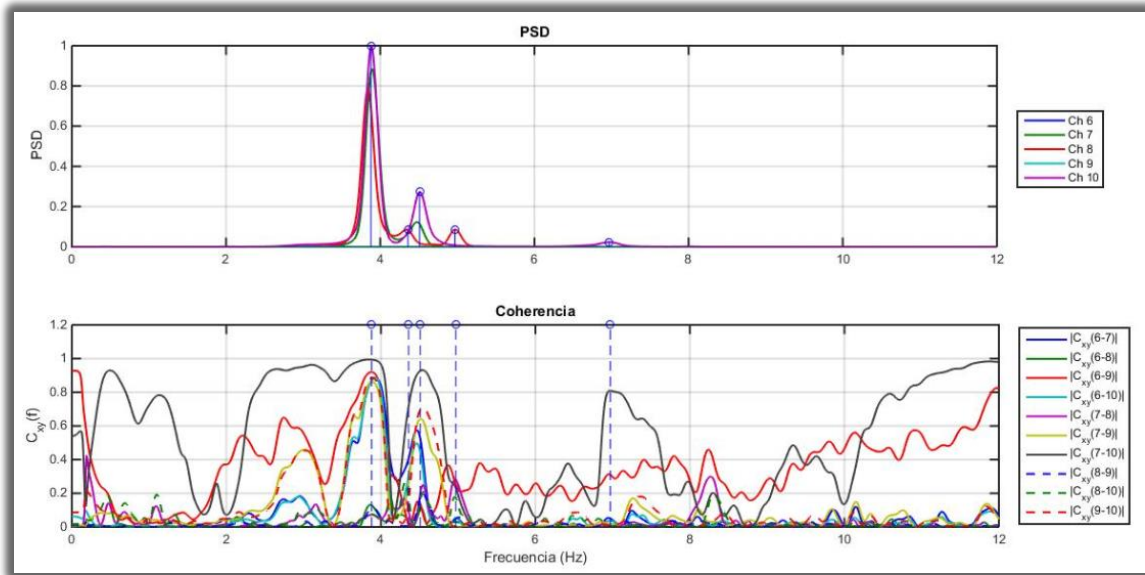


Figura 8-15: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 3, dirección vertical

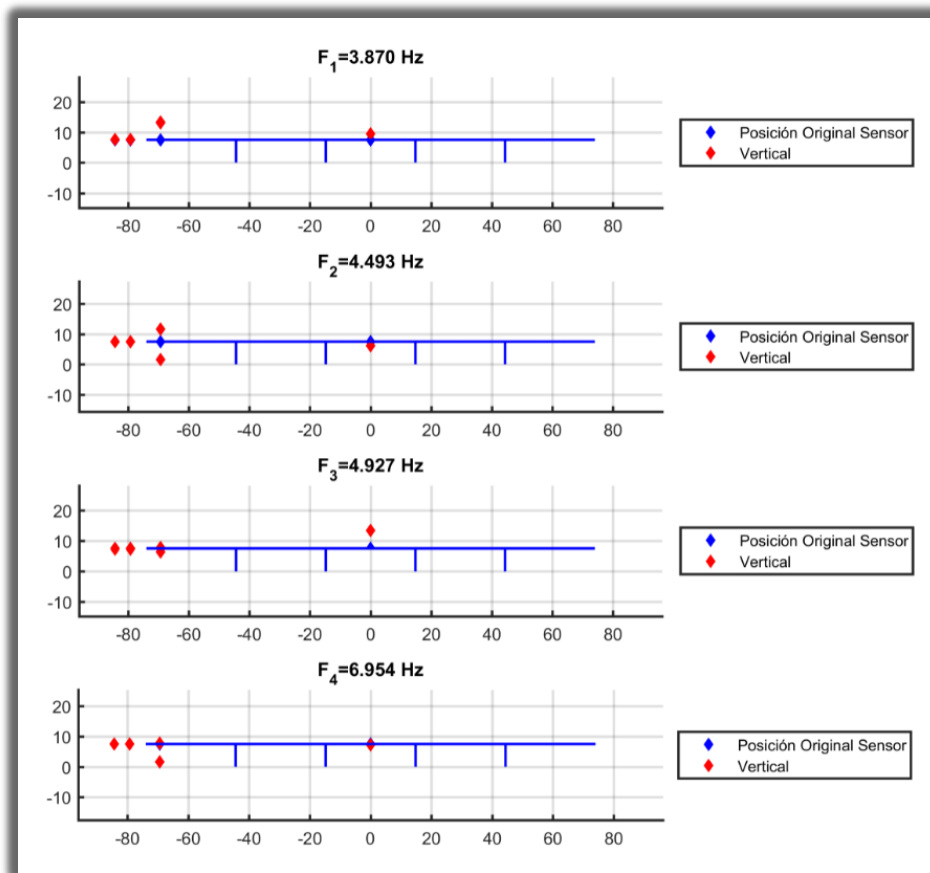


Figura 8-16: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 3, dirección vertical

Medición Águila 4

Se correlacionan las frecuencias identificadas por el método de análisis de frecuencias (Figura 8-17) y en el método del subespacio estocástico (Figura 8-18), distinguiendo 5 puntos altos de energía en el espectro de densidad de potencia, que corresponden a frecuencias identificadas en la estructura, de las cuales se verifica la globalidad de la frecuencia mediante la función coherencia.

Tres de las frecuencias identificadas mediante el método de análisis de frecuencias, se replican en el método SSI (Tabla 8-6). Vale recalcar que se aprecian un mayor número de frecuencias en el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico, las cuales pueden deberse a modos secundarios o elementos que estén vibrando en la estructura, es por esto por lo que se contrastan ambos métodos. Se observa una gran cantidad de modos cercanos a los 3.8 y 3.9 [Hz], que pueden representar modos característicos de los vanos en medición, los cuales tiene una baja coherencia, indicando una baja coherencia entre estos.

Tabla 8-6: Frecuencias identificadas en la medición Águila 4, dirección vertical

Frecuencia identificada PSD [Hz]	Frecuencia identificada SSI [Hz]	Coherencia
3.93	3.928	Baja
3.98	-	Baja
4.33	-	Baja
4.36	-	Baja
4.49	4.973	Baja
5.77	5.747	Baja

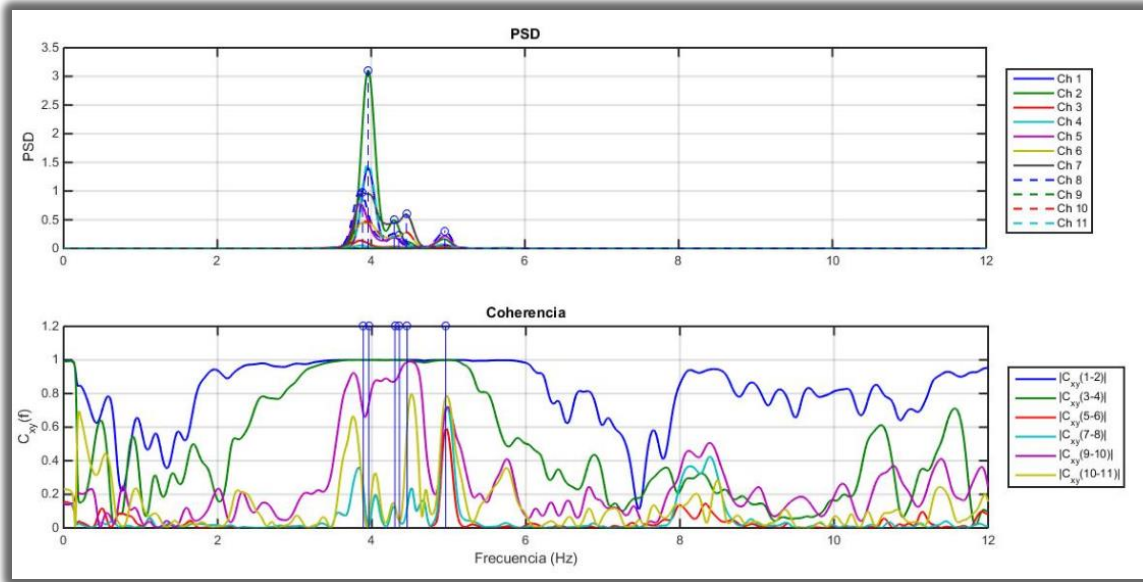


Figura 8-17: Espectro de potencia y función coherencia correspondiente a la medición Águila 4, dirección vertical

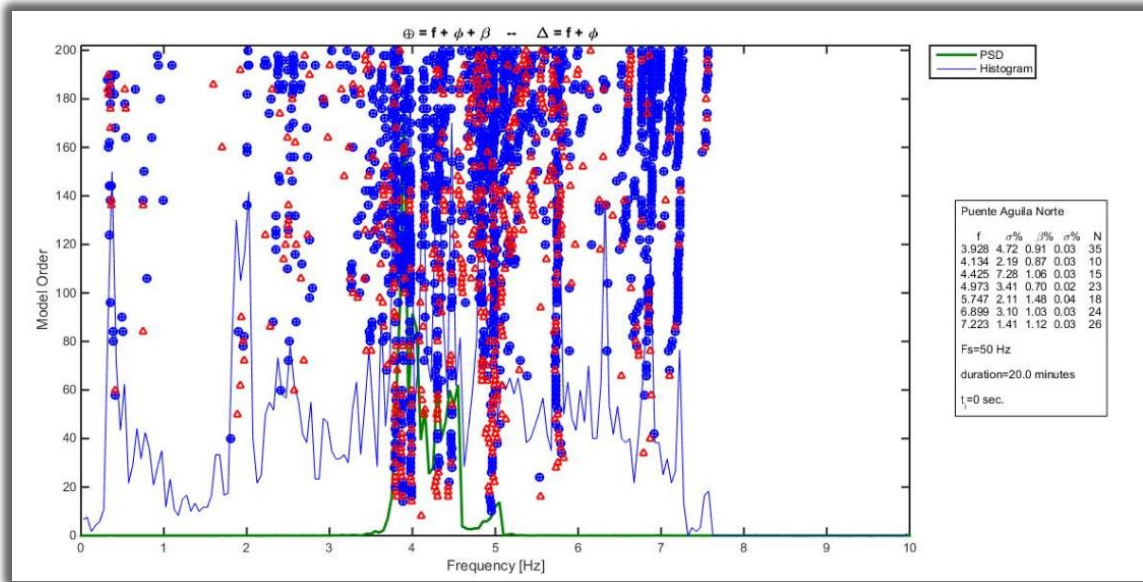


Figura 8-18: Diagrama de estabilidad correspondiente a la medición Águila 4, dirección vertical.

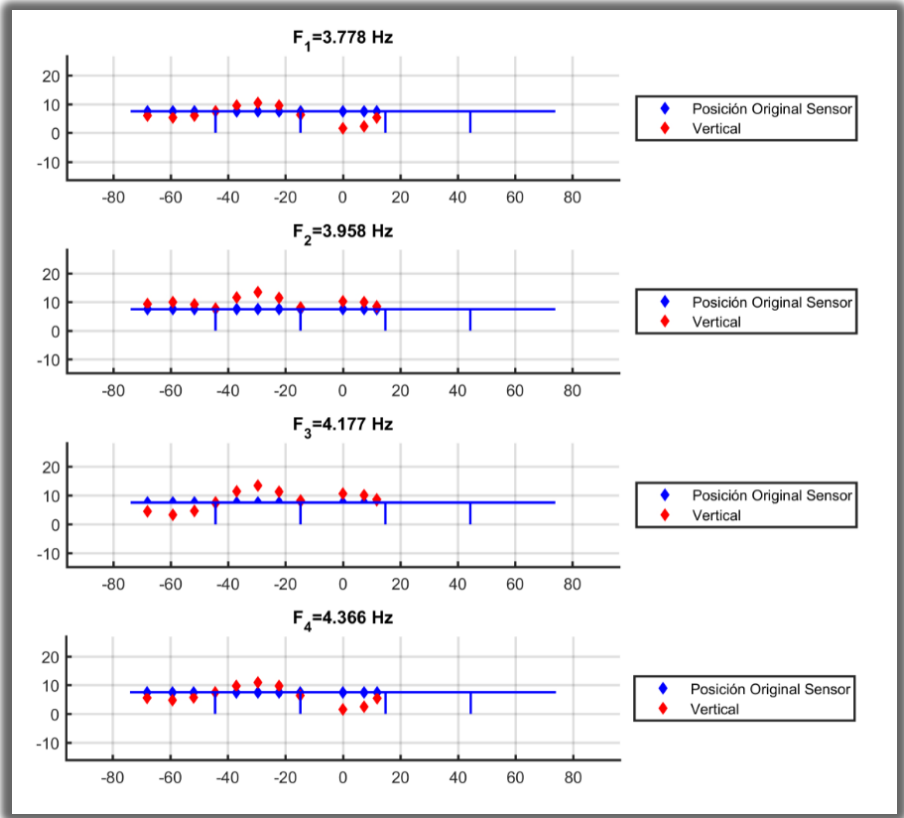


Figura 8-19: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 4, dirección vertical

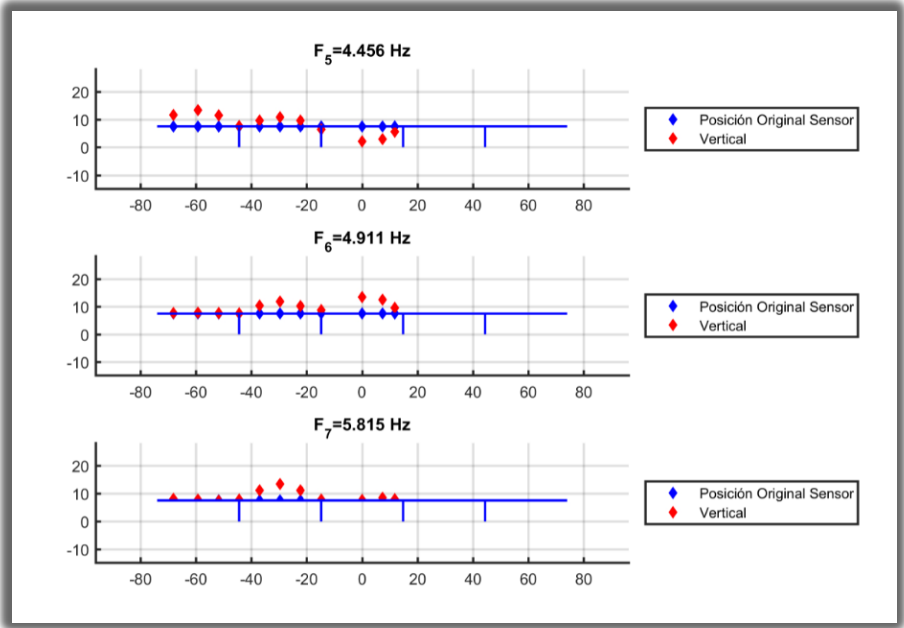


Figura 8-20: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad, correspondiente a la medición Águila 4, dirección vertical

Resultados segunda campaña de mediciones

Medición Águila 7

Al obtener el espectro de densidad de potencia, con todos los canales utilizados en la medición (Figura 8-21), se observan varios puntos altos de energía, asociados a un valor cercano a 3.99 [Hz], a la vez se observan “peaks” secundarios en frecuencias cercanas a 4.34, 4.40, 4.94 y 5.8 [Hz]. Estos resultados se conllevan con lo mostrado por el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico (Figura 8-22), el cual muestra frecuencias similares, las que son resaltadas en la tabla resumen del diagrama de estabilidad.

Las formas modales obtenidas, para el caso con todos los canales dispuestos en la medición (Figura 8-23 y Figura 8-24), indican la presencia de tres formas globales, identificadas en 3.87, 4.37 y 4.956 [Hz], resaltadas en la figura. Vale recalcar que, en el diagrama se aprecian un número mayor de modos que corresponderían a modos secundarios y a posibles artificios asociados a objetos que vibrarían en la estructura. Además, las formas modales obtenidas, resultan consistentes con las formas modales obtenidas en las mediciones águila 2 y águila 4.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 8-29), bajo el caso de análisis de sensores ubicados en los diversos centros de vano (canales 4, 10, 8, 14, 13, 3 y 12), se aprecia una baja coherencia entre los canales ubicados en el centro de distintos vanos, y una alta coherencia entre sensores ubicados en el mismo vano, lo que indica un grado de independencia de la respuesta vertical de cada vano. A excepción de los indicado anteriormente, la frecuencia 4.97 [Hz], no presenta la tendencia resaltada, ya que se mantiene con una alta coherencia a pesar de ser obtenida a través de registros de sensores posicionados en diferentes vanos.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 8-25), bajo el caso de análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 2 (canales 1, 8, 7, 9, 10 y 11), se distingue una alta coherencia para los canales ubicados en el vano, observando la presencia de modos en las frecuencias 3.99, 4.33, 4.40, 4.94 y 5.87 [Hz]. Igualmente, las frecuencias anteriores, son identificadas por el diagrama de estabilidad (Figura 8-26) correspondiente al análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 2, resaltándose estas frecuencias en la tabla resumen del diagrama de estabilidad.

Al contrastar las formas modales asociadas al espectro de potencia (Figura 8-27) y al diagrama de estabilidad (Figura 8-28), de los canales ubicados exclusivamente en el vano 2, se nota que se obtienen las mismas formas modales, corroborando el análisis realizado. También, se observa que las frecuencias 4.01 y 4.362 Hz (resaltadas

en la figura), corresponden a frecuencias características del vano 2, siendo la primera asociada a un movimiento vertical y la segunda a un movimiento de torsión.

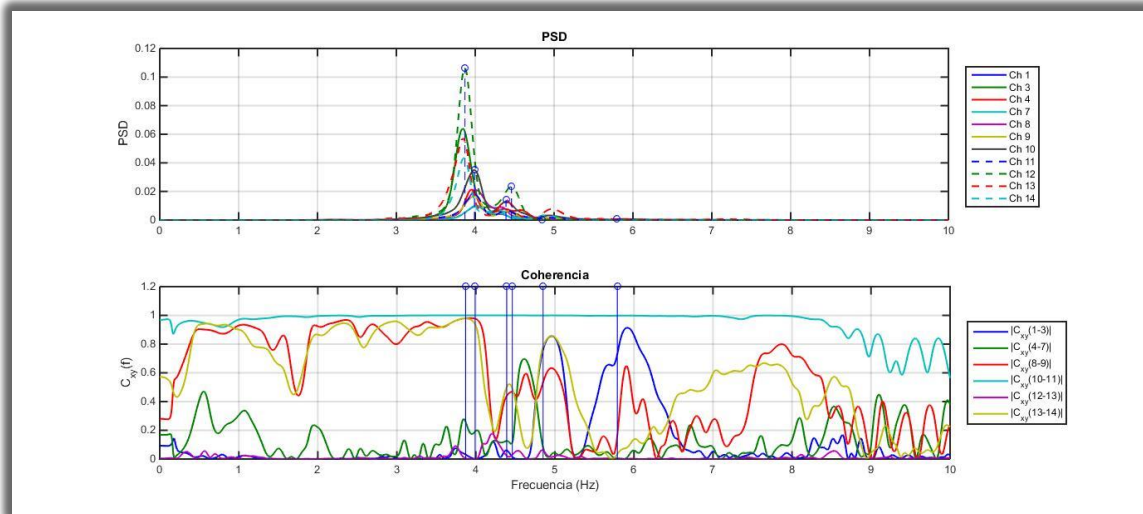


Figura 8-21: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 7

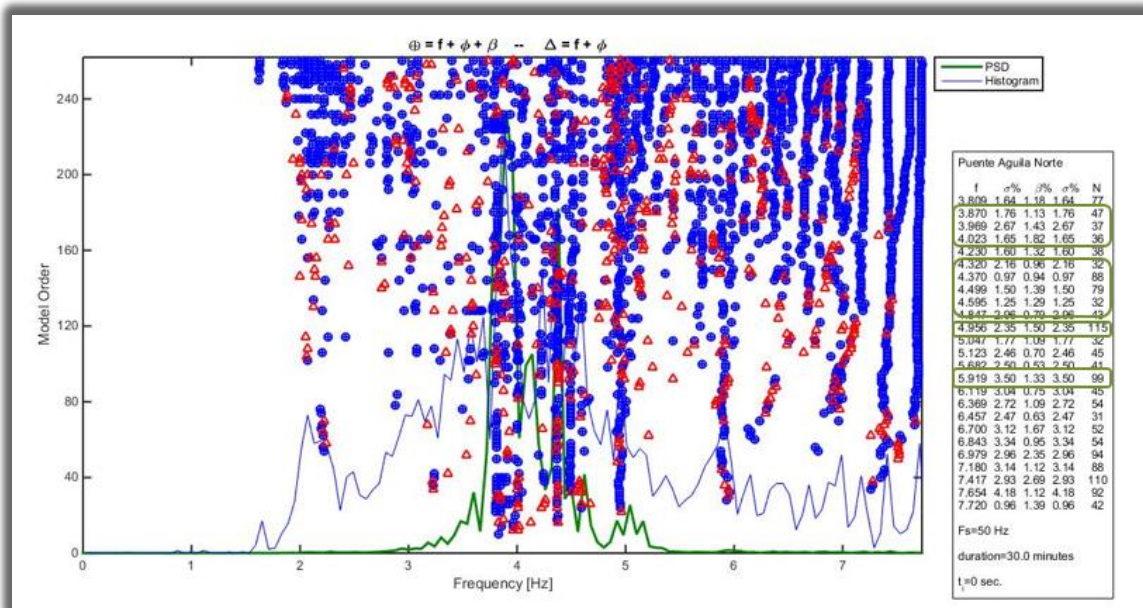


Figura 8-22: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila 7

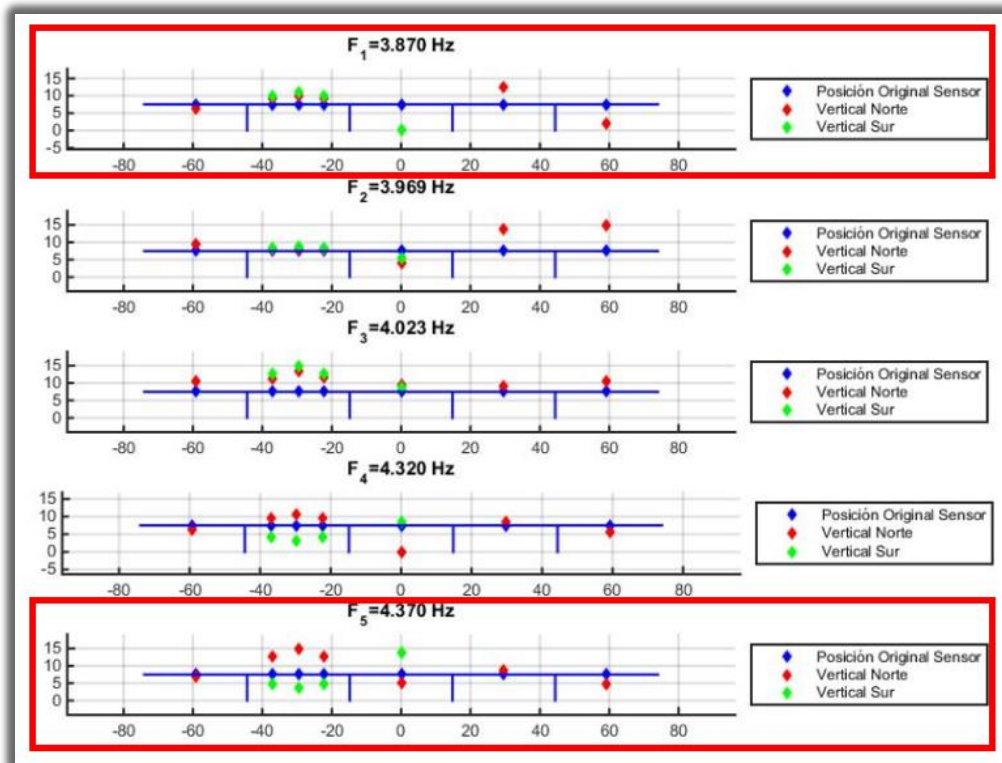


Figura 8-23: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 7

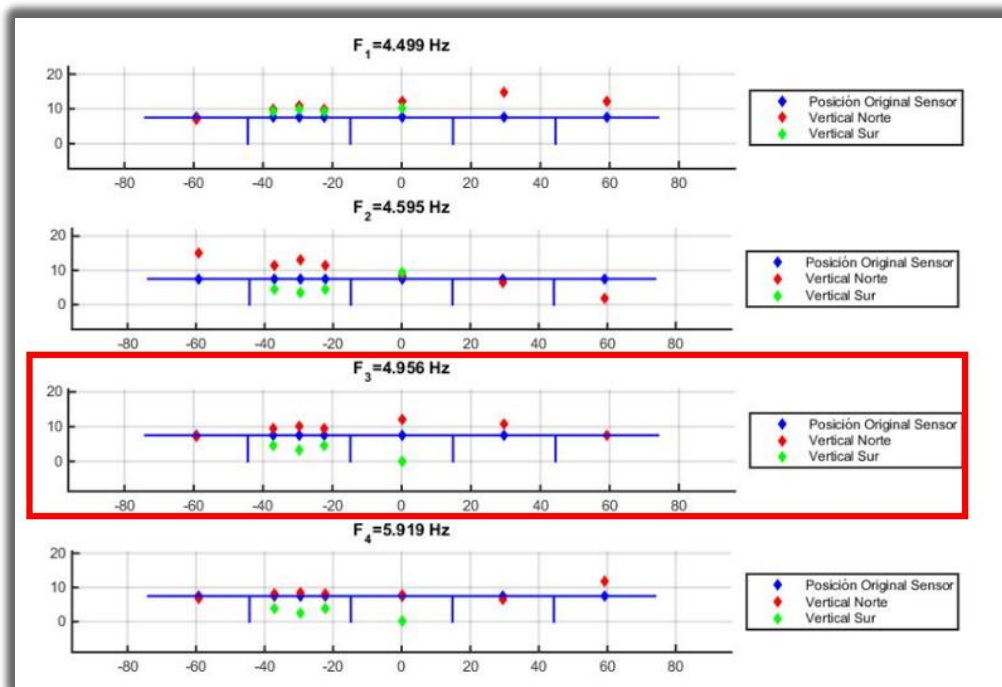


Figura 8-24: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 7

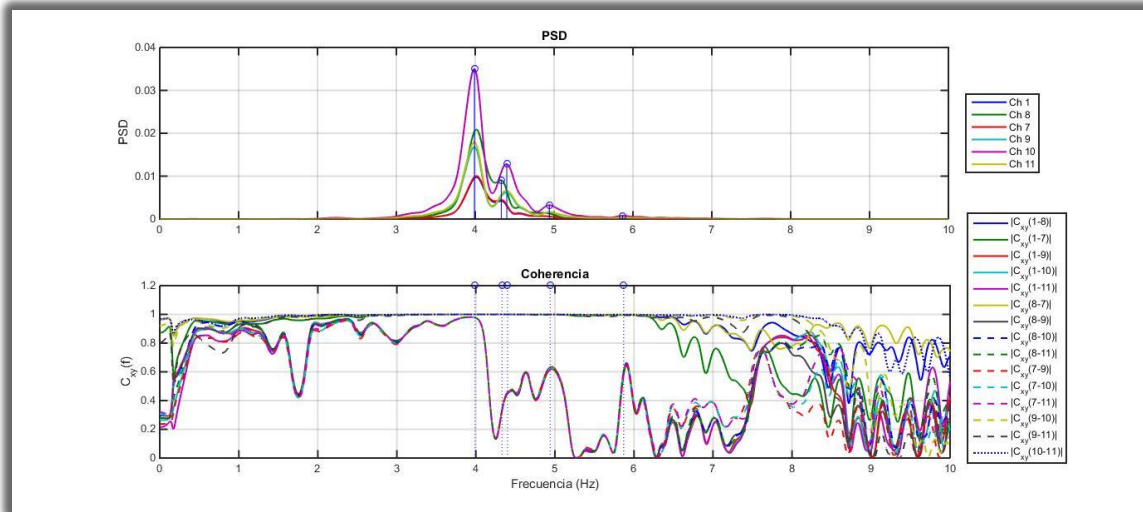


Figura 8-25: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 2, correspondiente a la medición Águila 7

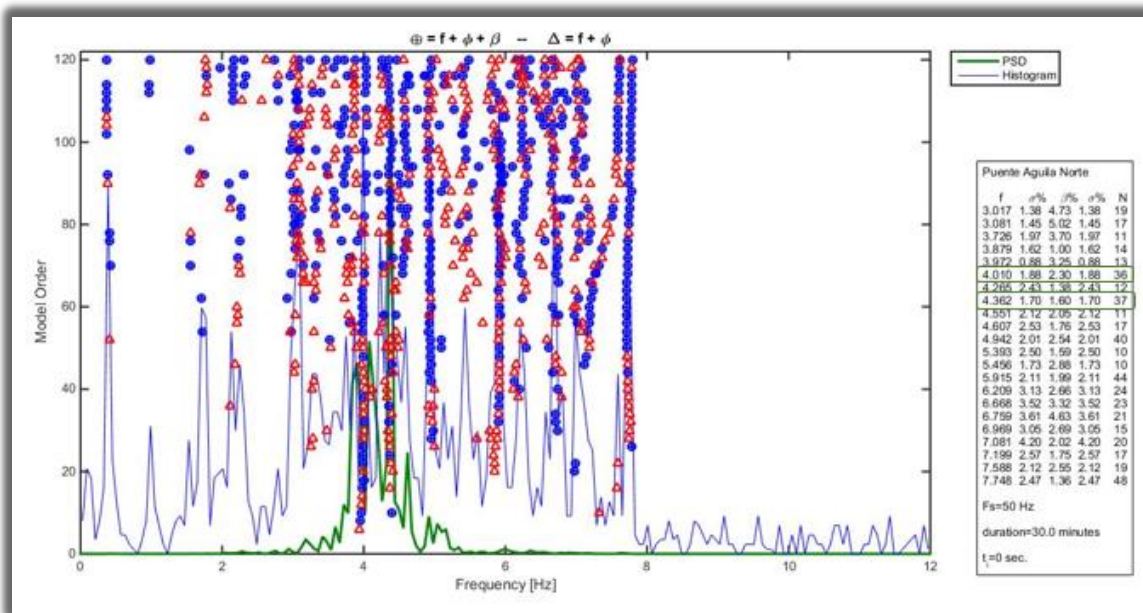


Figura 8-26: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 2, correspondiente a la medición Águila 7

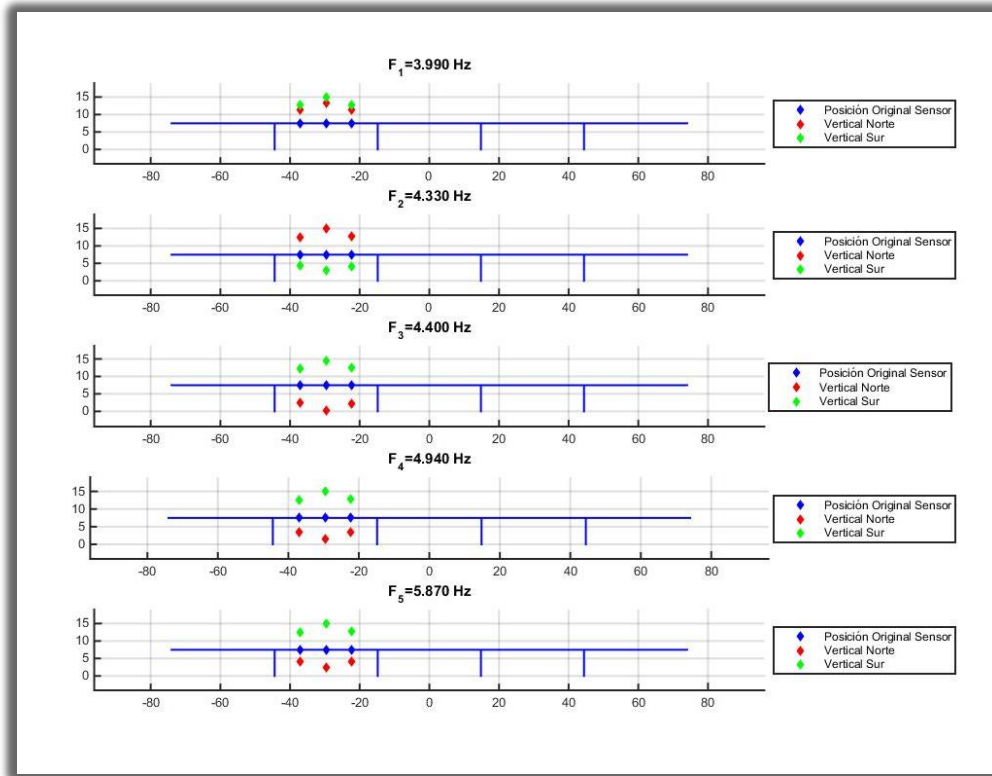


Figura 8-27: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 2, correspondientes a la medición Águila 7

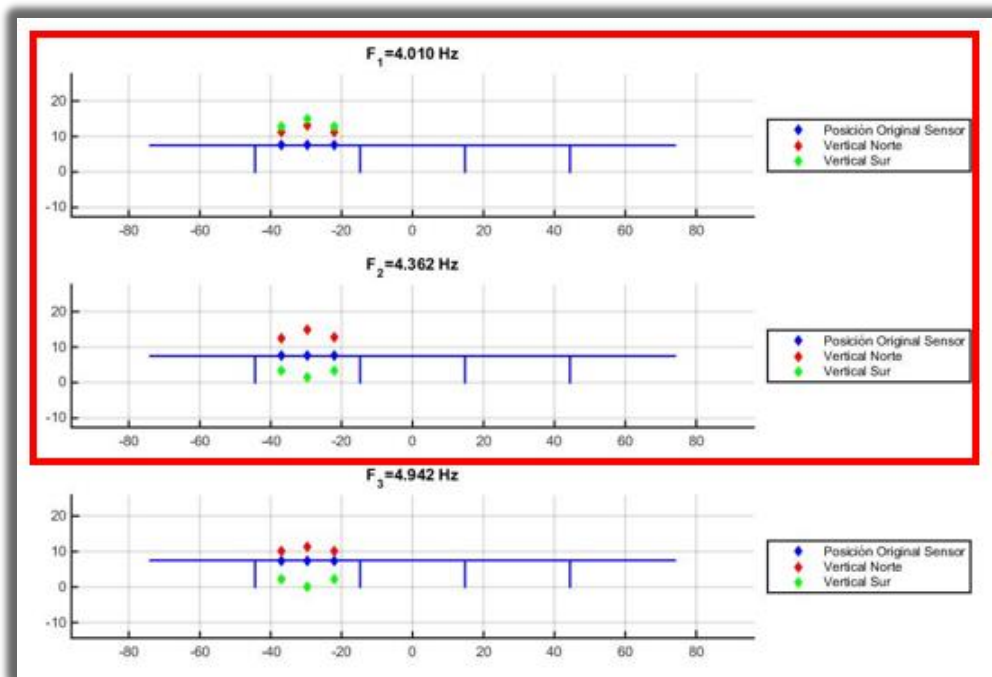


Figura 8-28: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 2, correspondientes a la medición Águila 7

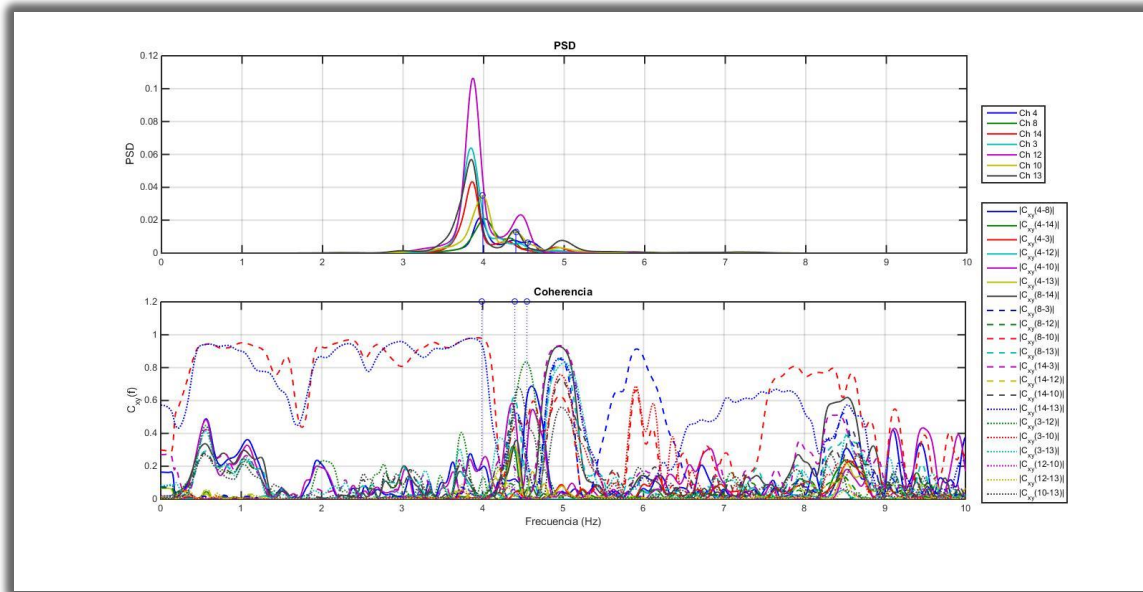


Figura 8-29: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 7

Medición Águila 8

Al obtener el espectro de densidad de potencia, con todos los canales utilizados en la medición (Figura 8-30), se observan varios puntos altos de energía, asociados a frecuencias entre 3.89 y 4.02 [Hz], a la vez se observan “peaks” secundarios en frecuencias cercanas a 2.83, 3.60, 4.31, 4.36, 4.49, 4.64 y 4.99 [Hz]. Estos resultados se conllevan con lo mostrado por el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico (Figura 8-31), el cual muestra frecuencias similares, las que son resaltadas en la tabla de resumen del diagrama de estabilidad.

Las formas modales obtenidas, para el caso con todos los canales dispuestos en la medición (Figura 8-32), indican la presencia de tres formas globales, identificadas en 3.876, 4.339 y 5.029 [Hz], resaltadas en la figura. Vale recalcar que, en el diagrama se aprecian un número mayor de modos que corresponderían a modos secundarios y a posibles artificios asociados a objetos que vibrarían en la estructura. Además, las formas modales obtenidas, resultan consistentes con las formas modales obtenidas en las mediciones águila 2 y águila 4.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 8-33), bajo el caso de análisis de sensores ubicados en los diversos centros de vano (canales 4, 10, 13, 8, 14, 3 y 12), se aprecia una baja coherencia entre los canales ubicados en el centro de distintos vanos, y una alta coherencia entre sensores ubicados en el mismo vano, lo

que indica un grado de independencia de la respuesta vertical de cada vano. A excepción de lo indicado anteriormente, las frecuencias 4.5 y 4.97 [Hz], no presentan la tendencia resaltada, ya que se mantienen con una alta coherencia a pesar de ser obtenidas a través de registros de sensores posicionados en diferentes vanos.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 8-35), bajo el caso de análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 3 (canales 1, 14, 7, 9, 13 y 11), se distingue una alta coherencia para los canales ubicados en el vano, observando la presencia de modos en las frecuencias 2.6, 3.25, 3.86, 4.34 y 5.0 [Hz]. Igualmente, las frecuencias anteriores, son identificadas por el diagrama de estabilidad (Figura 8-34) correspondiente al análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 3, resaltándose estas frecuencias en la tabla resumen del diagrama de estabilidad.

Las frecuencias 2.6 y 3.25 [Hz] pueden ser frecuencias transversales que son detectadas en la medición, debido al ángulo de instalación de los equipos o pueden ser causadas por algún objeto vibrando y/o algún artificio de la medición.

Al contrastar las formas modales asociadas al espectro de potencia (Figura 8-37) y al diagrama de estabilidad (Figura 8-36), de los canales ubicados exclusivamente en el vano 3, se nota que se obtienen las mismas formas modales, corroborando el análisis realizado. También, se observa que las frecuencias 3.852 y 4.39 [Hz] (resaltadas en la figura), corresponden a frecuencias características del vano 3, siendo la primera asociada a un movimiento vertical y la segunda a un movimiento de torsión.

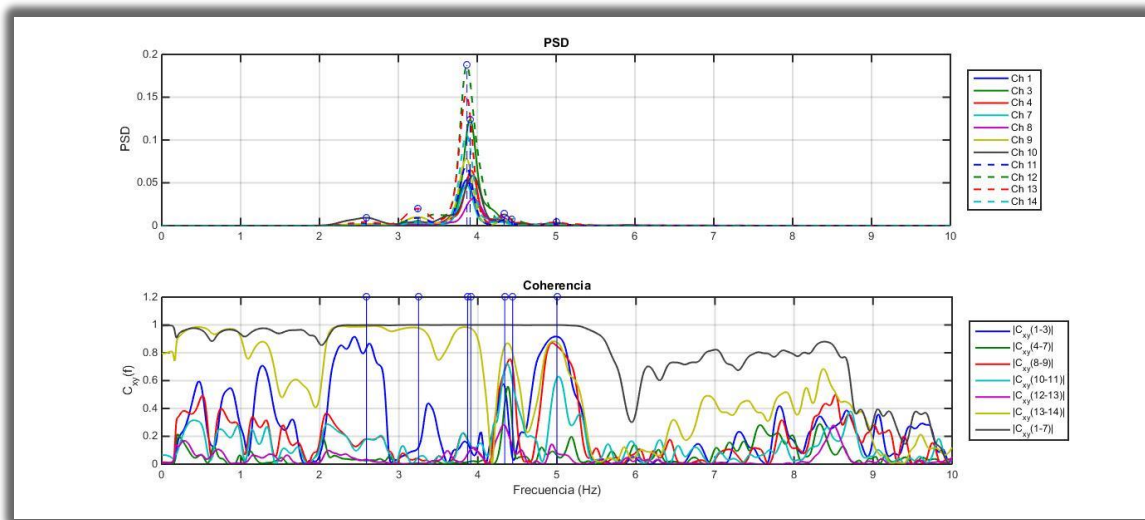


Figura 8-30: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 8

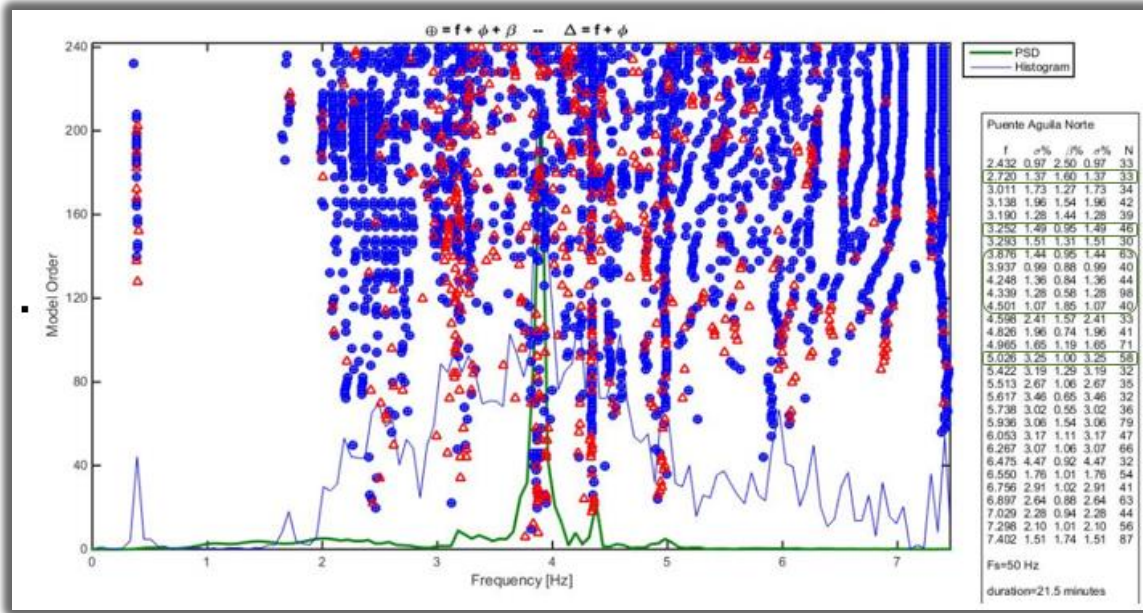


Figura 8-31: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila 8

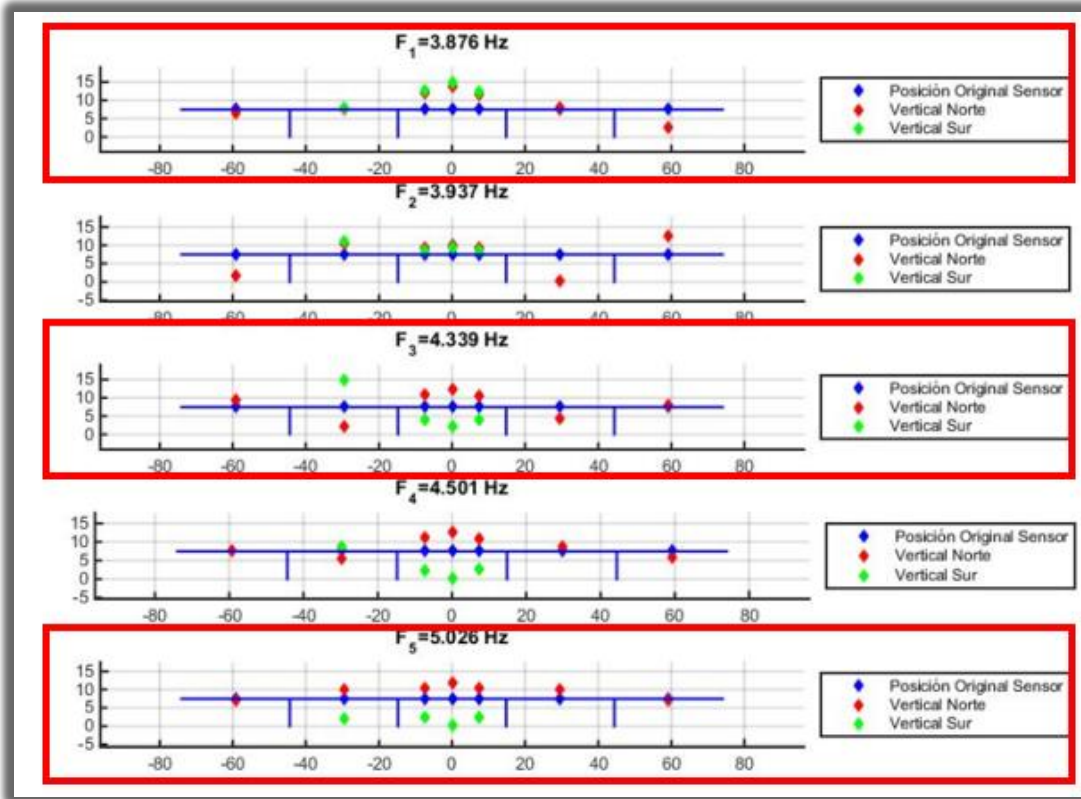


Figura 8-32: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 8

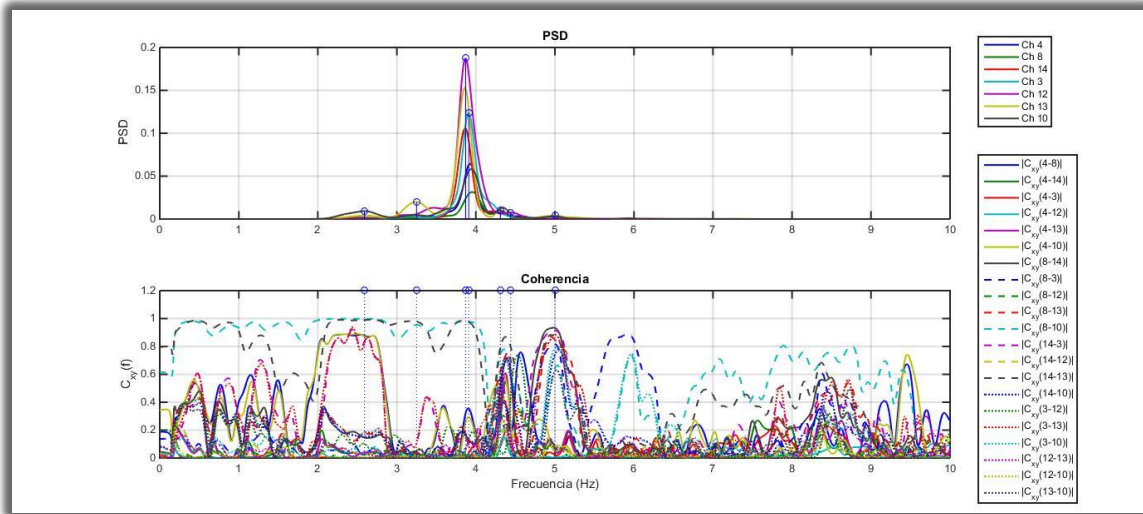


Figura 8-33: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 8

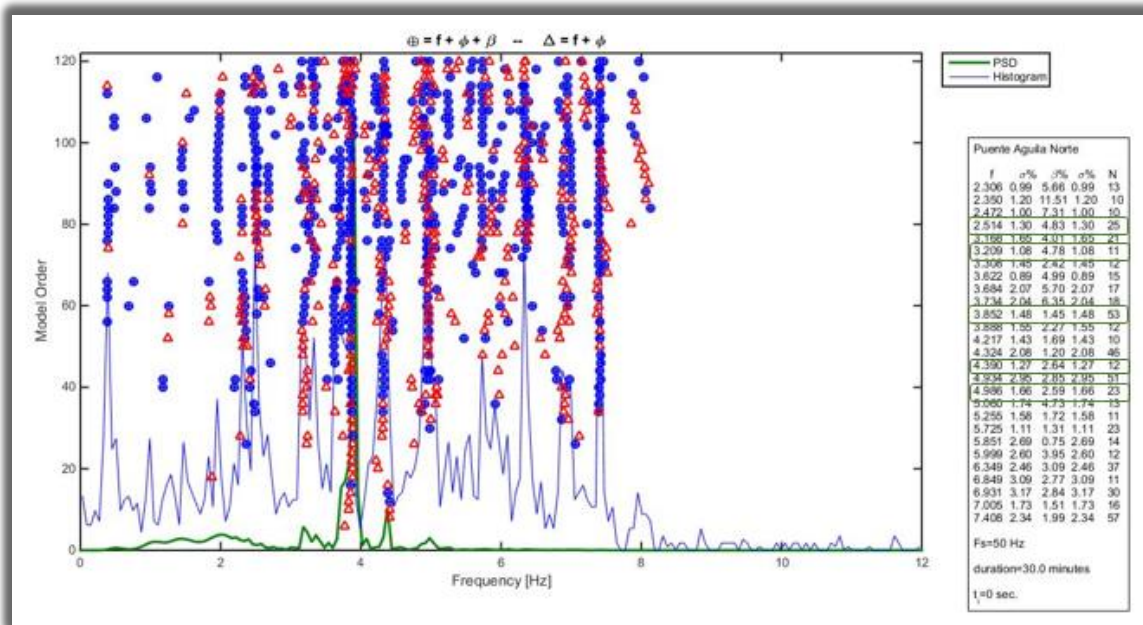


Figura 8-34: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 3, correspondiente a la medición Águila 8

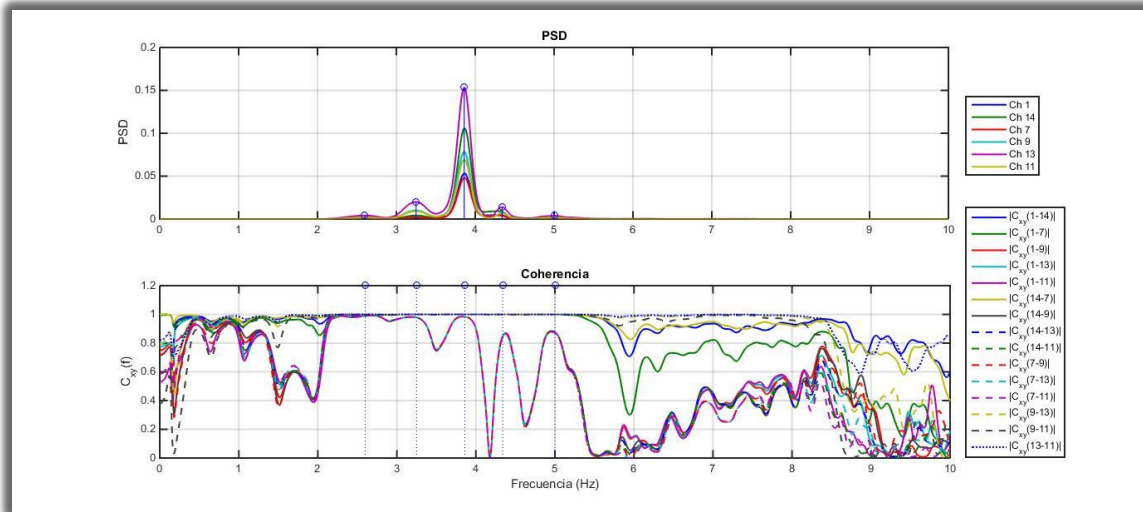


Figura 8-35: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 3, correspondiente a la medición Águila 8

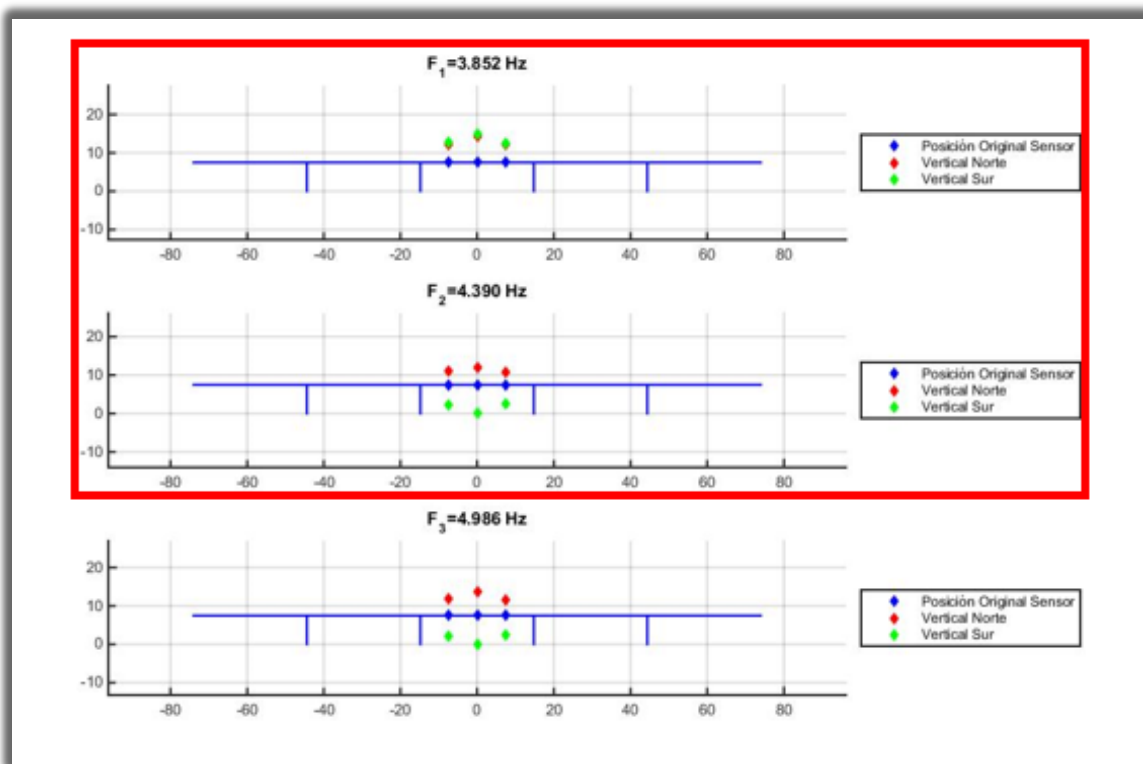


Figura 8-36: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 3, correspondientes a la medición Águila 8

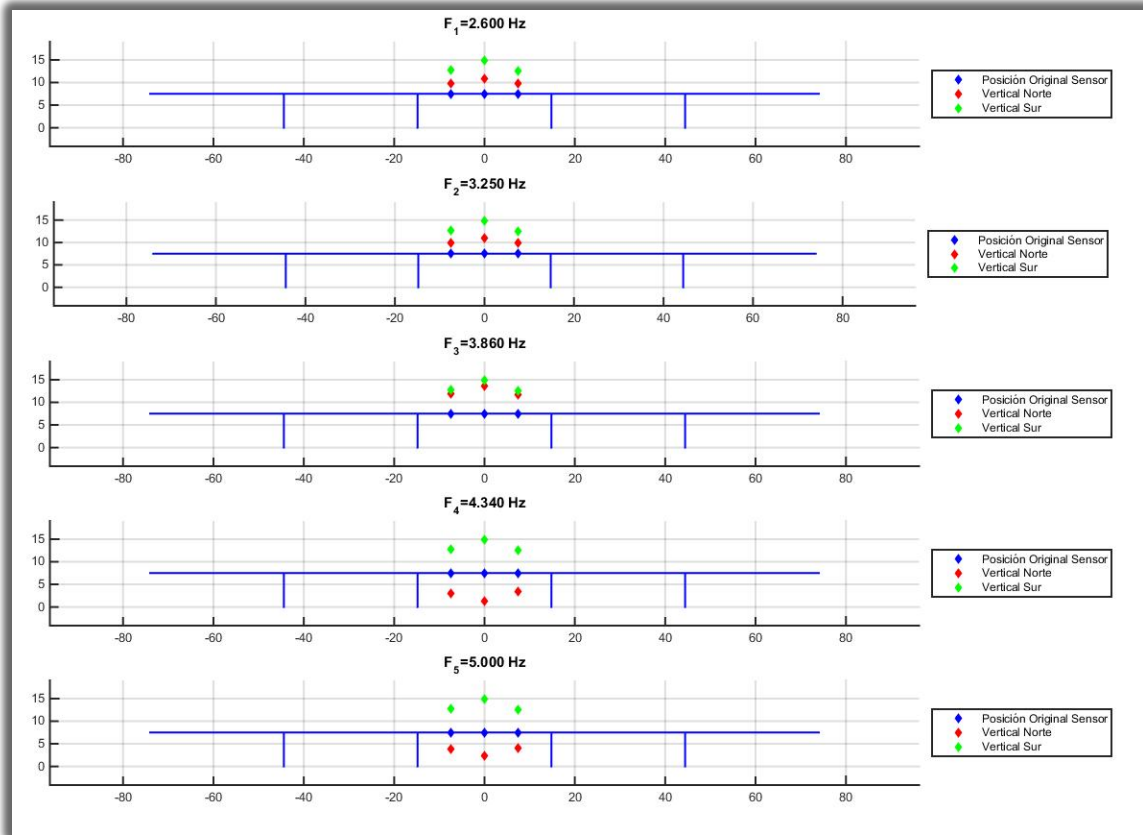


Figura 8-37: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 3, correspondientes a la medición Águila 8

Medición Águila 10

Al obtener el espectro de densidad de potencia, con todos los canales utilizados en la medición (Figura 8-39), se observan varios puntos altos de energía, asociados a frecuencias entre 3.85 y 3.97 [Hz], a la vez se observan “peaks” secundarios en frecuencias cercanas a 3.29, 4.28, 4.49, 4.99, 5.44 y 5.98 [Hz]. Estos resultados se conllevan con lo mostrado por el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico (Figura 8-38), el cual muestra frecuencias similares, las que son resaltadas en la tabla resumen del diagrama de estabilidad.

Las formas modales obtenidas, para el caso con todos los canales dispuestos en la medición (Figura 8-40 y Figura 8-41), indican la presencia de tres formas globales, identificadas en 3.939, 4.348 y 4.957 [Hz], resaltadas en la figura. Vale recalcar que, en el diagrama se aprecian un número mayor de modos que corresponderían a modos secundarios y a posibles artificios asociados a objetos que vibrarían en la estructura. Además, las formas modales obtenidas, resultan consistentes con las formas modales obtenidas en las mediciones águila 2 y águila 4.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 8-44), bajo el caso de análisis de sensores ubicados en los diversos centros de vano (canales 4, 8, 14, 3, 13, 10 y 12), se aprecia una baja coherencia entre los canales ubicados en el centro de distintos vanos, y una alta coherencia entre sensores ubicados en el mismo vano, lo que indica un grado de independencia de la respuesta vertical de cada vano. A excepción de lo indicado anteriormente, las frecuencias 4.49 y 4.96 [Hz], no presentan la tendencia resaltada, ya que se mantienen con una alta coherencia a pesar de ser obtenidas a través de registros de sensores posicionados en diferentes vanos.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 8-42), bajo el caso de análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 4 (canales 1, 3, 7, 9, 10 y 11), se distingue una alta coherencia para los canales ubicados en el vano, observando la presencia de modos en las frecuencias 3.9, 4.26, 4.41, 4.98, 5.44 y 5.98 [Hz]. Igualmente, las frecuencias anteriores, son identificadas por el diagrama de estabilidad (Figura 8-43) correspondiente al análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 4, resaltándose estas frecuencias en la tabla resumen del diagrama de estabilidad.

Al contrastar las formas modales asociadas al espectro de potencia (Figura 8-46 y Figura 8-47) y al diagrama de estabilidad (Figura 8-45), de los canales ubicados exclusivamente en el vano 4, se nota que se obtienen las mismas formas modales, corroborando el análisis realizado. También se observa que las frecuencias 3.897 y 4.551 [Hz] (resaltadas en la figura), corresponden a frecuencias características del vano 4, siendo la primera asociada a un movimiento vertical y la segunda a un movimiento de torsión.

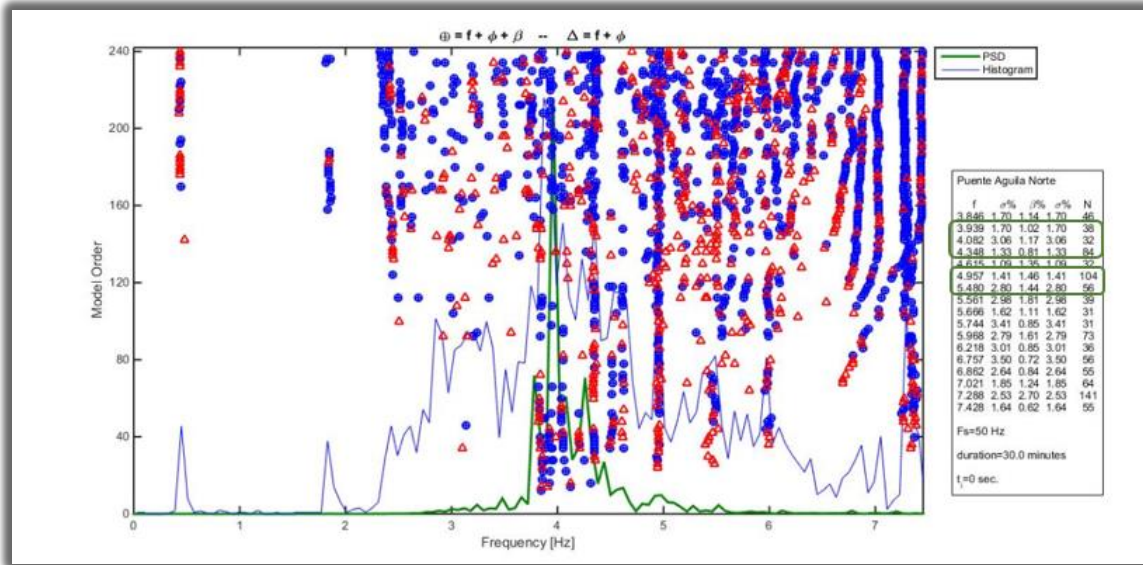


Figura 8-38: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila 10

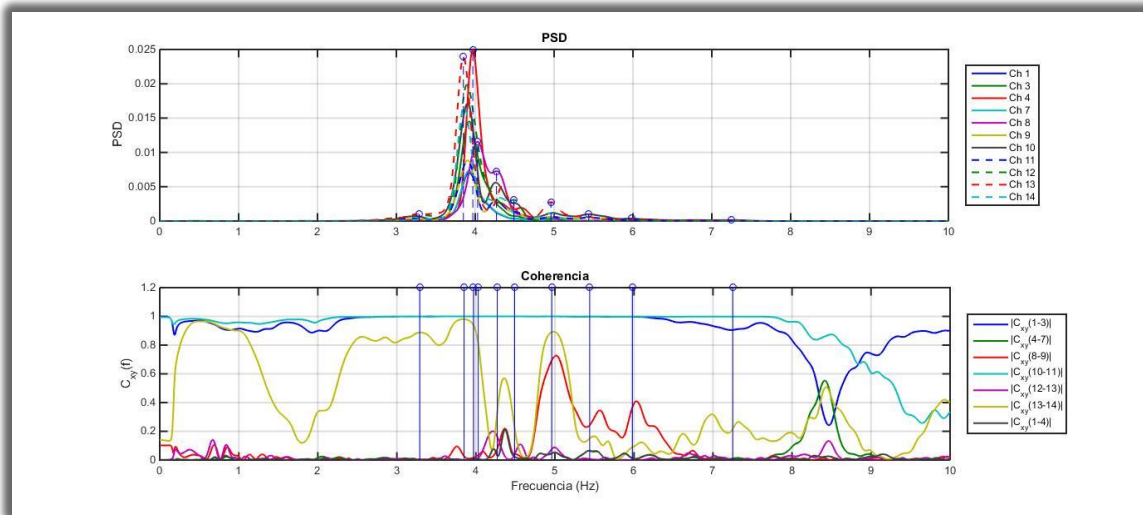


Figura 8-39: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 10

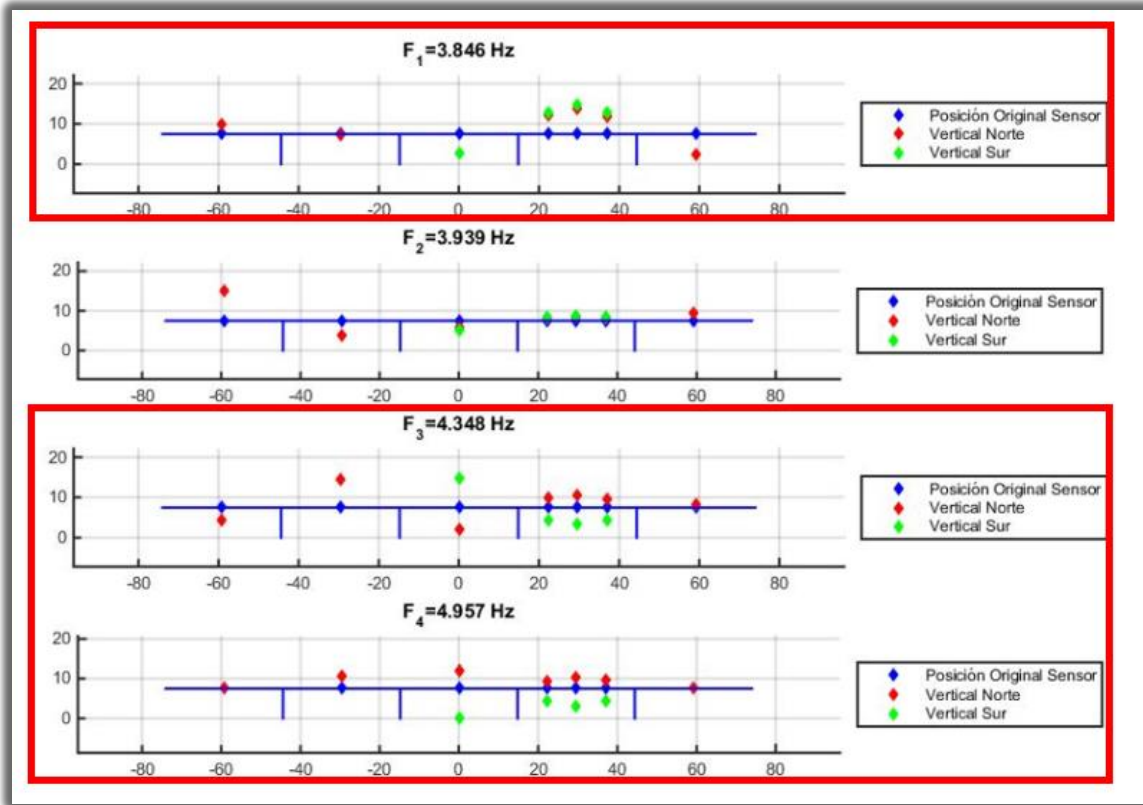


Figura 8-40: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 10

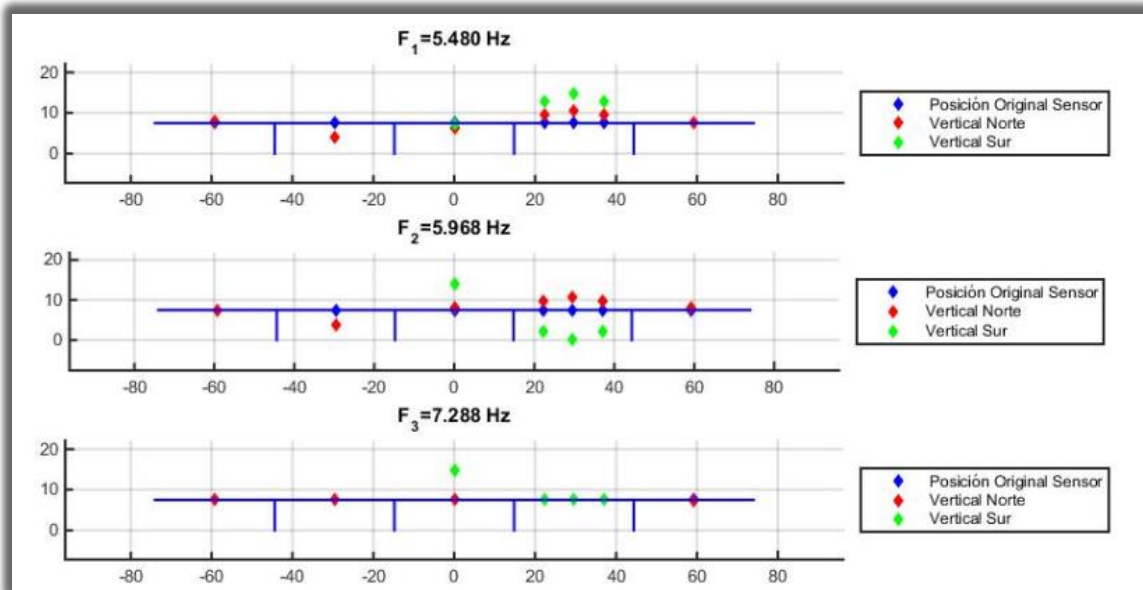


Figura 8-41: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 10

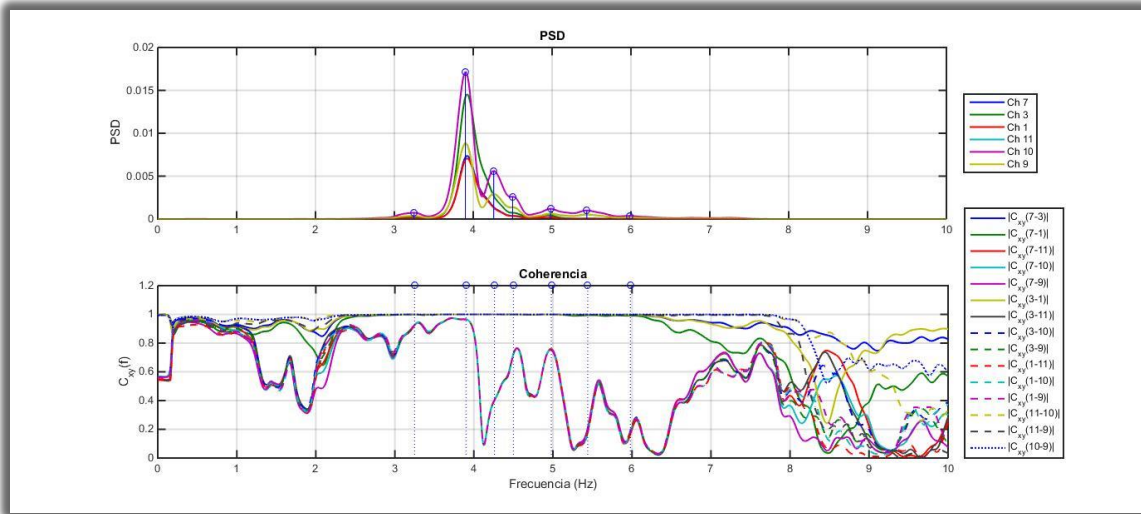


Figura 8-42: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 4, correspondiente a la medición Águila 10

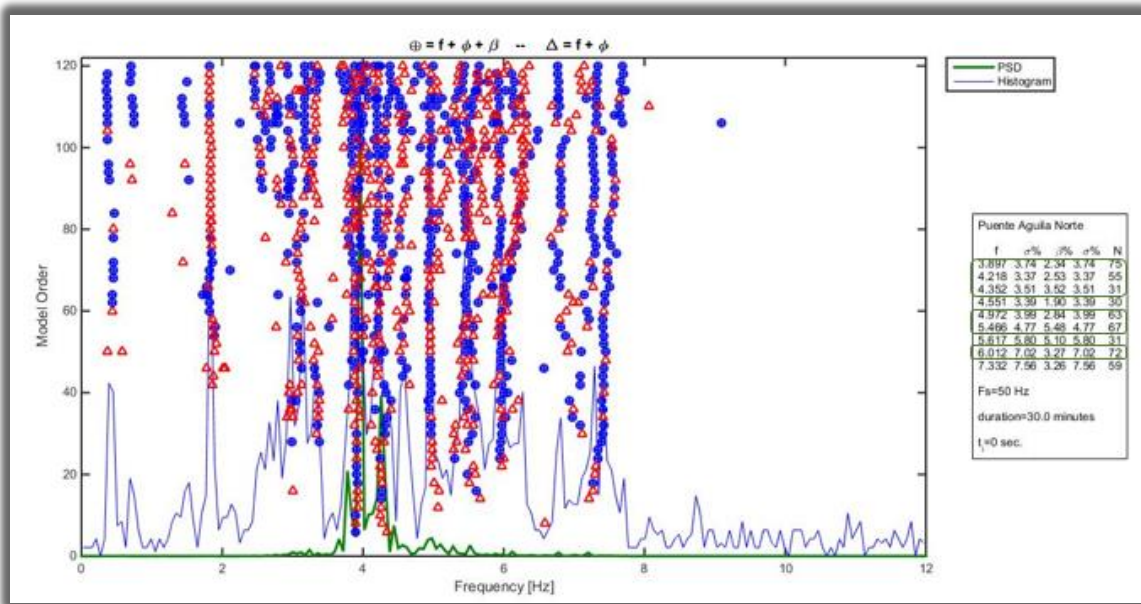


Figura 8-43: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 4, correspondiente a la medición Águila 10

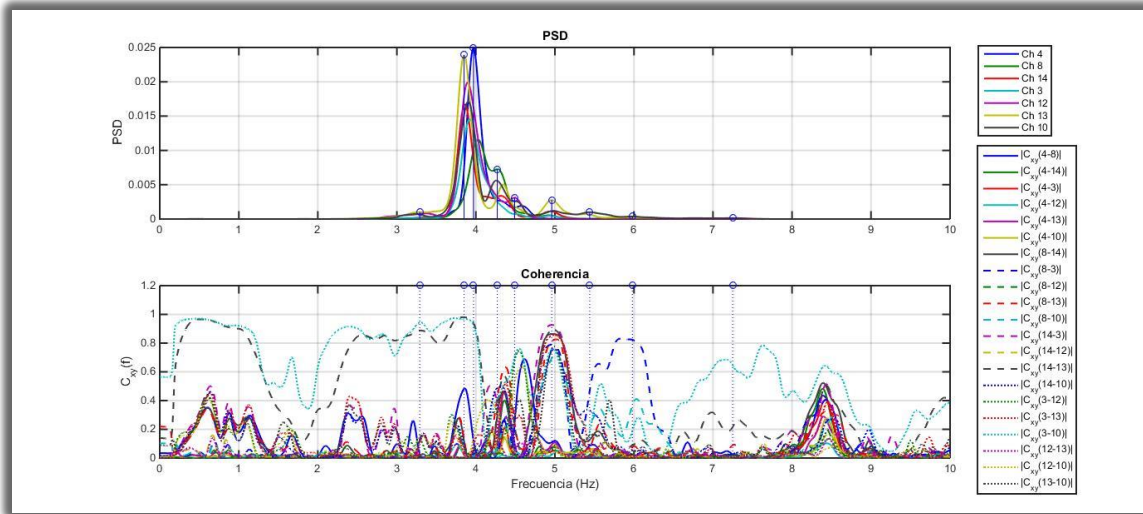


Figura 8-44: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 10

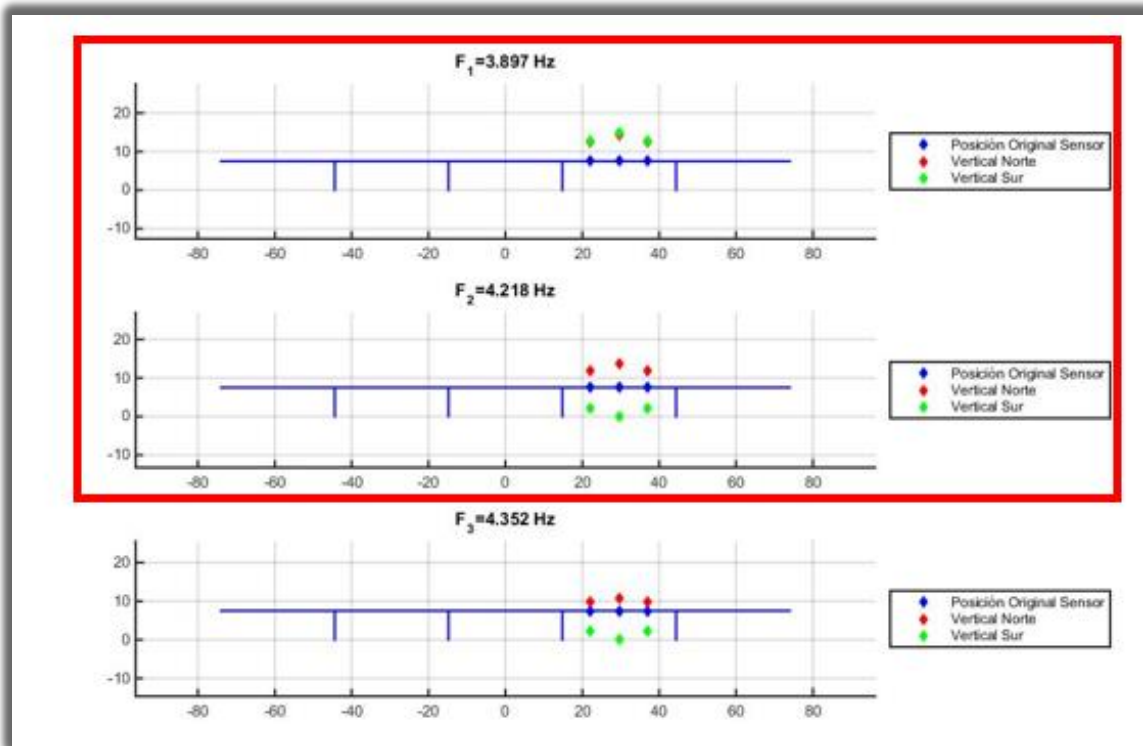


Figura 8-45: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 4, correspondientes a la medición Águila 10

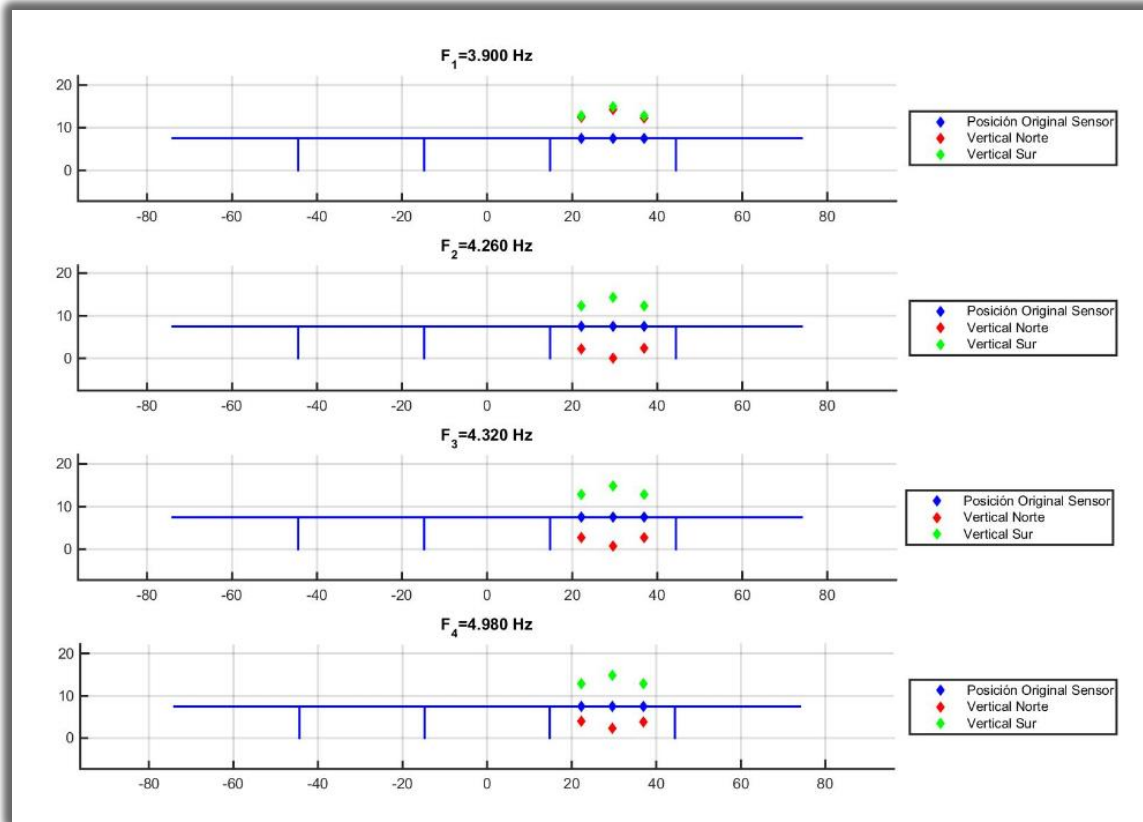


Figura 8-46: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 4, correspondientes a la medición Águila 10

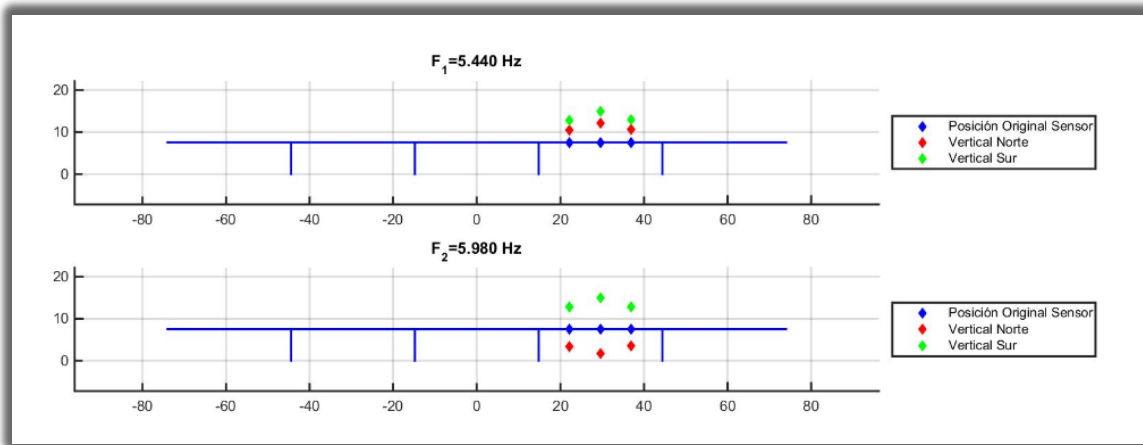


Figura 8-47: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 4, correspondientes a la medición Águila 10

Medición Águila 11

Al obtener el espectro de densidad de potencia, con todos los canales utilizados en la medición (Figura 8-48), se observan varios puntos altos de energía, asociados a frecuencias entre 3.86 y 4.08 [Hz], a la vez se observan “peaks” secundarios en frecuencias cercanas a 4.24, 4.51, 4.97, 6.3 y 7.19 [Hz]. Estos resultados se conllevan con lo mostrado por el diagrama de estabilidad del método del subespacio estocástico (Figura 8-49), el cual muestra frecuencias similares, las que son resaltadas en la tabla resumen del diagrama de estabilidad.

Las formas modales obtenidas, para el caso con todos los canales dispuestos en la medición (Figura 8-50 y Figura 8-51), indican la presencia de tres formas globales, identificadas en 4.018, 4.356 y 4.894 [Hz], resaltadas en las figuras. Vale recalcar que, en el diagrama se aprecian un número mayor de modos que corresponderían a modos secundarios y a posibles artificios asociados a objetos que vibrarían en la estructura. Además, las formas modales obtenidas, resultan consistentes con las formas modales obtenidas en las mediciones águila 2 y águila 4.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 8-52), bajo el caso de análisis de sensores ubicados en los diversos centros de vano (canales 4, 13, 10, 8, 14, 3 y 12), se aprecia una baja coherencia entre los canales ubicados en el centro de distintos vanos, y una alta coherencia entre sensores ubicados en el mismo vano, lo que indica un grado de independencia de la respuesta vertical de cada vano. A excepción de los indicado anteriormente, las frecuencias 4.51 y 4.97 [Hz], no presentan la tendencia resaltada, ya que se mantienen con una alta coherencia a pesar de ser obtenidas a través de registros de sensores posicionados en diferentes vanos.

Al calcular el espectro de densidad de potencia (Figura 8-54), bajo el caso de análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 5 (canales 1, 4, 7, 9, 10 y 11), se distingue una alta coherencia para los canales ubicados en el vano, observando la presencia de modos en las frecuencias 3.95, 4.23, 4.51, 6.03 y 7.19 [Hz]. Igualmente, las frecuencias anteriores, son identificadas por el diagrama de estabilidad (Figura 8-53) correspondiente al análisis de sensores ubicados exclusivamente en el vano 5, resaltándose estas frecuencias en la tabla resumen del diagrama de estabilidad.

Al contrastar las formas modales asociadas al espectro de potencia (Figura 8-55) y al diagrama de estabilidad (Figura 8-56), de los canales ubicados exclusivamente en el vano 5, se nota que se obtienen las mismas formas modales, corroborando el análisis realizado. También, se advierte que los canales ubicados en el vano sur tienen un mayor brazo de palanca y se observa que las frecuencias de 3.845 y 4.504 [Hz] (resaltadas en la figura) corresponden a frecuencias características del vano 5, siendo

la primera asociada a un movimiento vertical y la segunda a un movimiento de torsión.

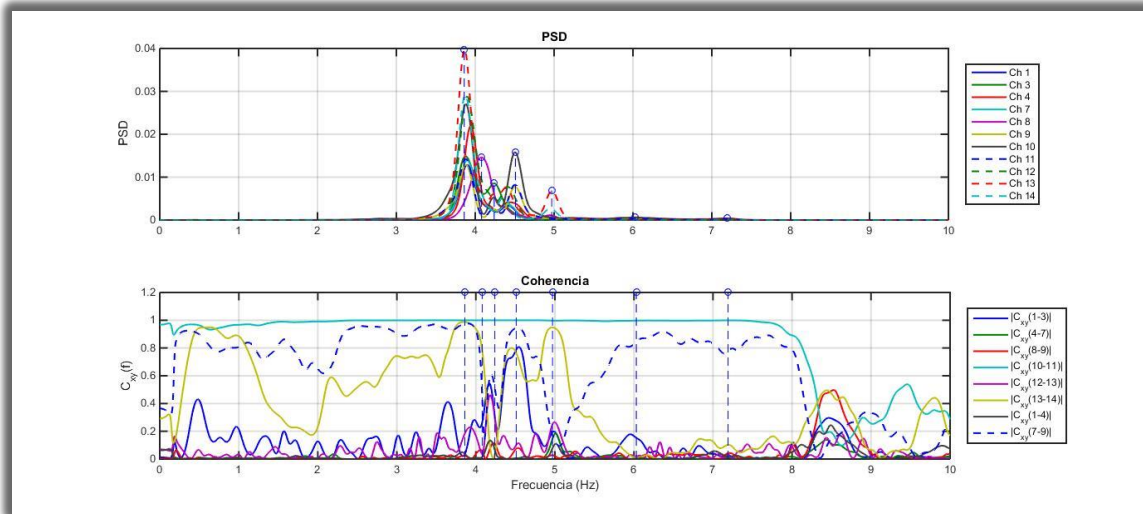


Figura 8-48: Espectro de potencia y función coherencia de todos los canales, correspondiente a la medición Águila 11

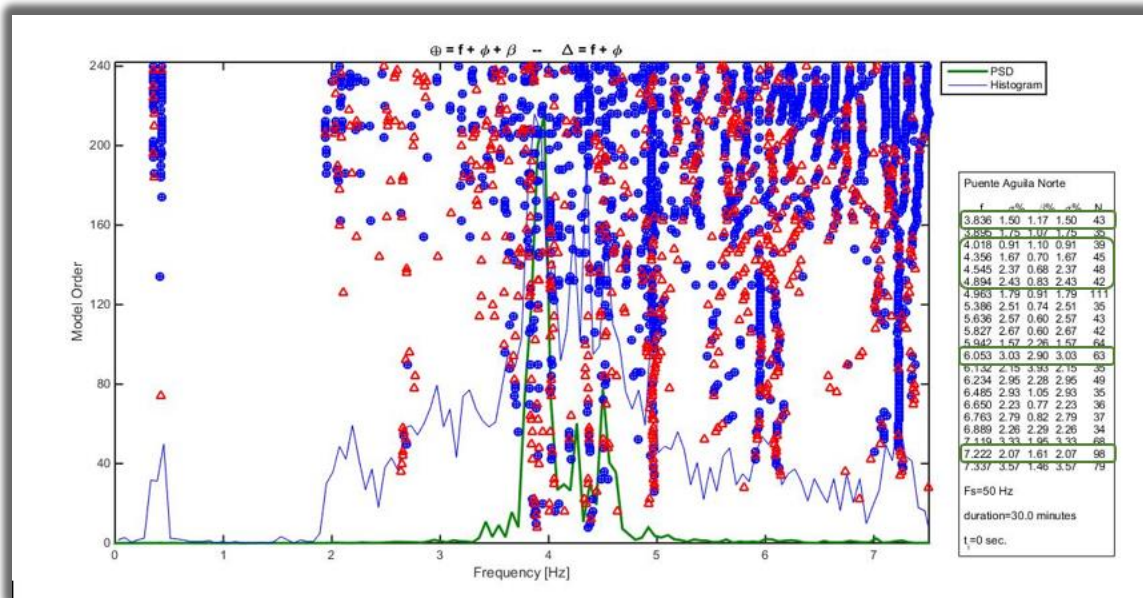


Figura 8-49: Diagrama de estabilidad, con todos los canales, correspondiente a la medición Águila

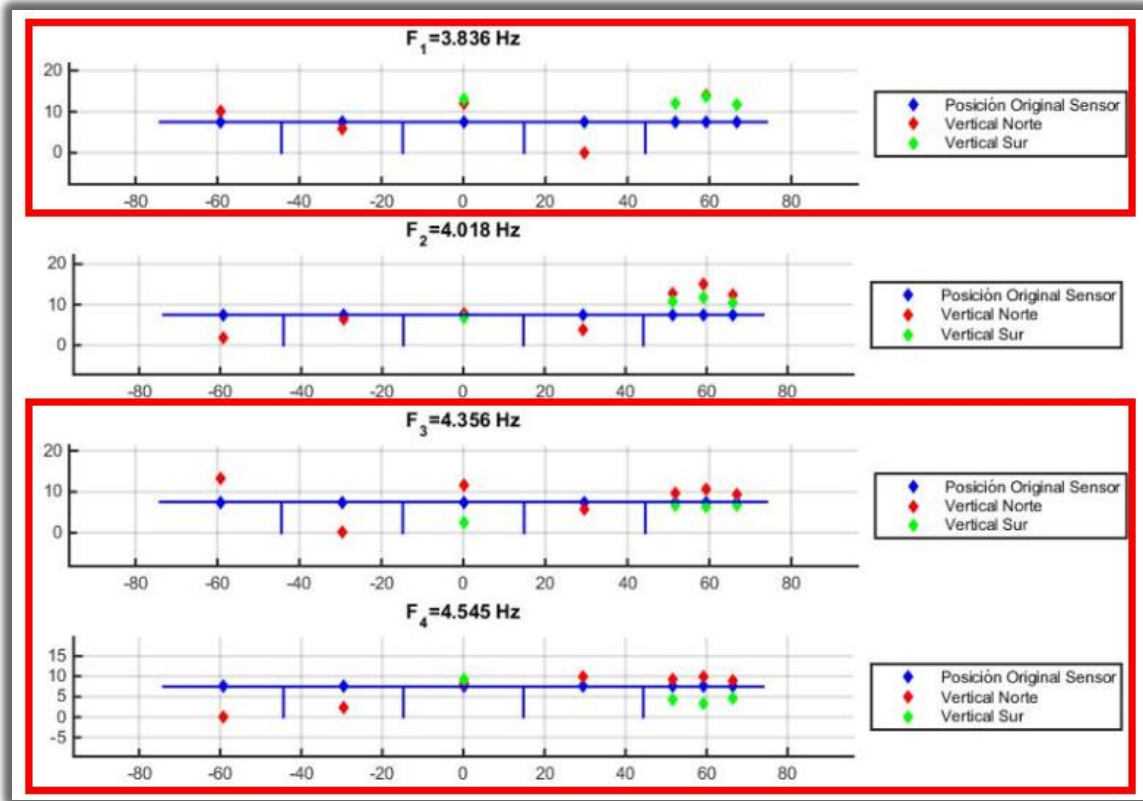


Figura 8-50: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 11

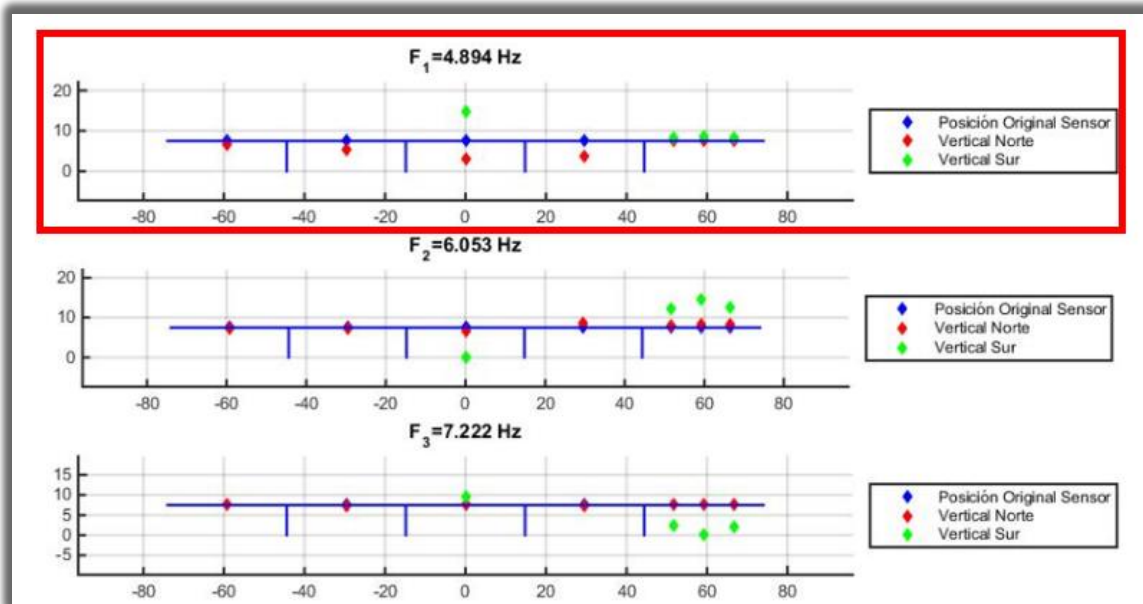


Figura 8-51: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con todos los canales, correspondientes a la medición Águila 11

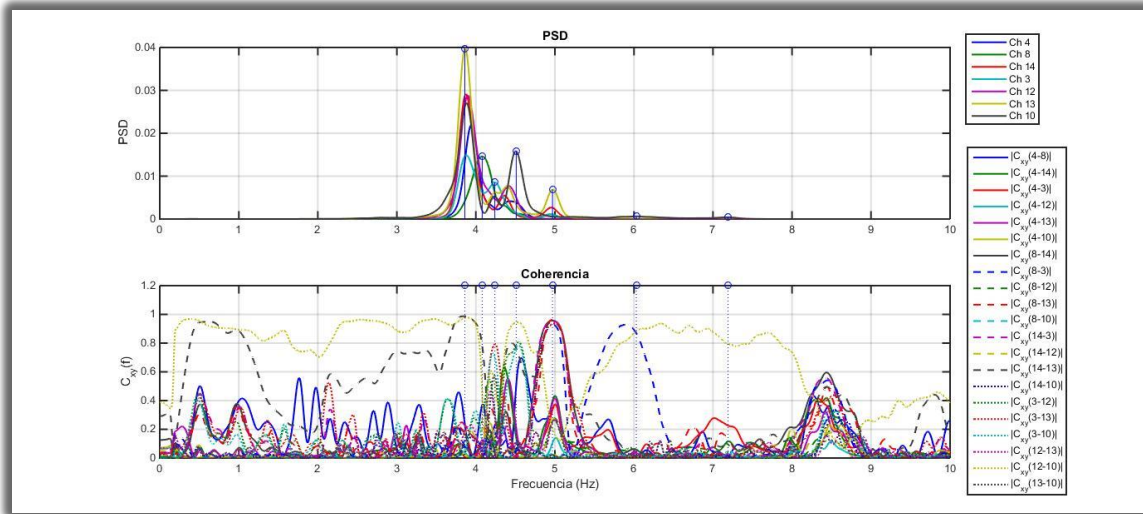


Figura 8-52: Espectro de potencia y función coherencia de los canales centrales, correspondiente a la medición Águila 11

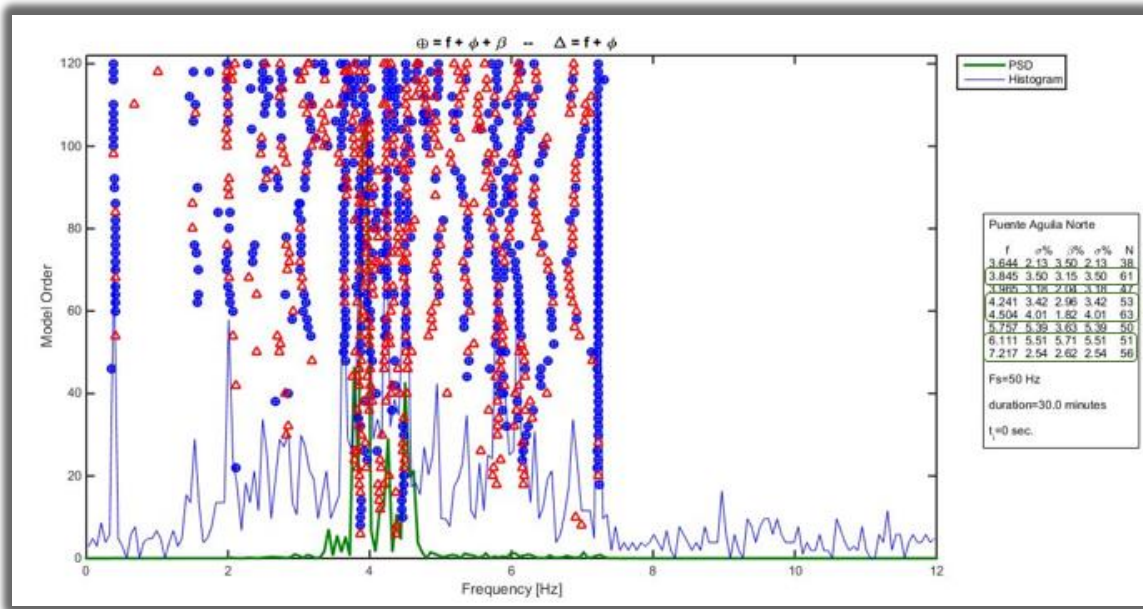


Figura 8-53: Diagrama de estabilidad, con los canales del vano 5, correspondiente a la medición Águila 11

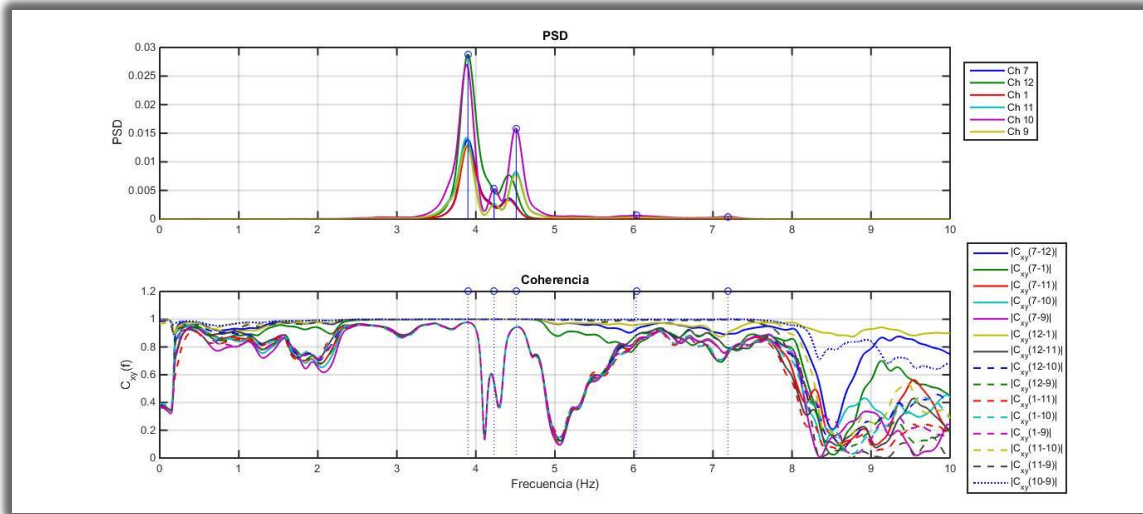


Figura 8-54: Espectro de potencia y función coherencia de los canales del vano 5, correspondiente a la medición Águila 11

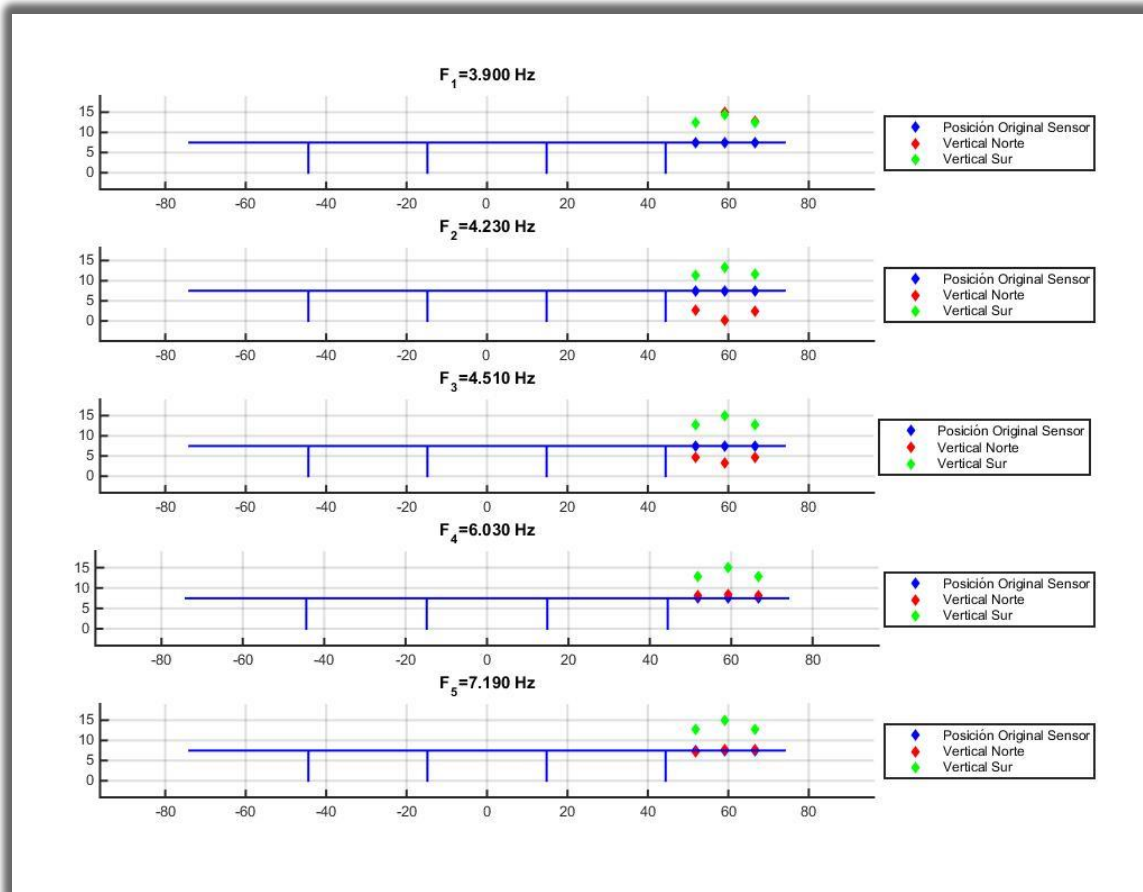


Figura 8-55: Formas modales asociadas al espectro de potencia de los canales del vano 5, correspondientes a la medición Águila 11

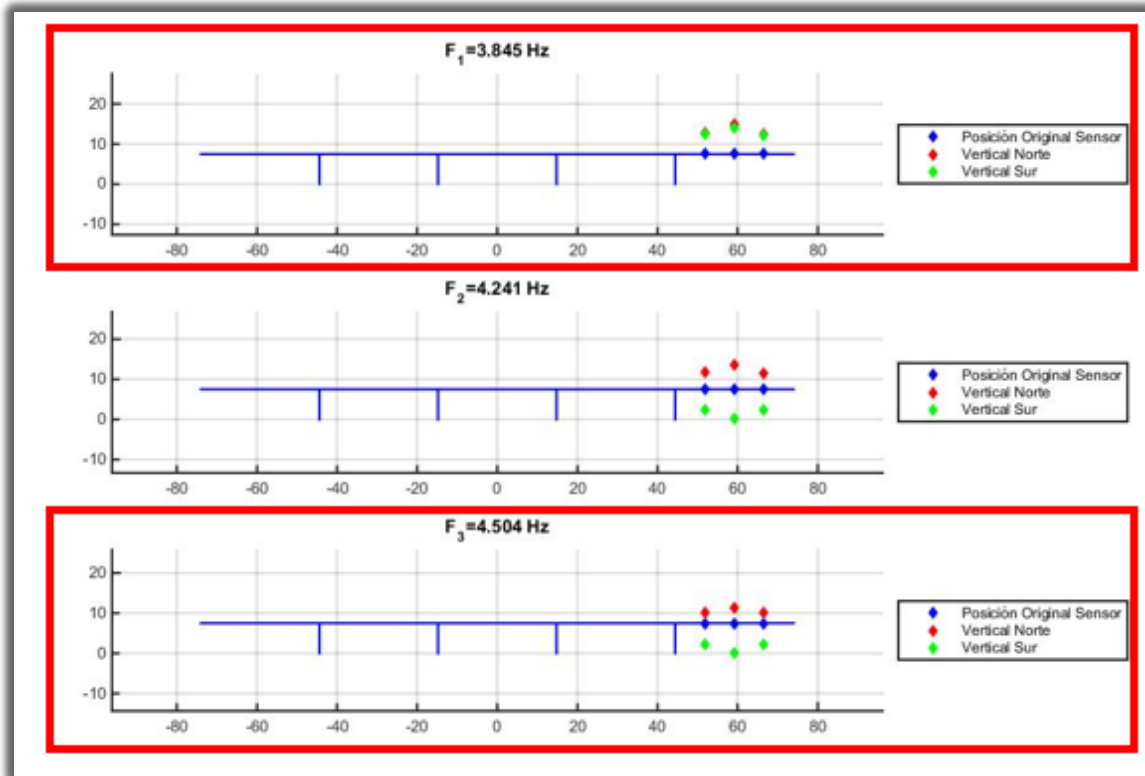


Figura 8-56: Formas modales asociadas al diagrama de estabilidad con los canales del vano 5, correspondientes a la medición Águila 11

Resultados tercera campaña de mediciones

Medición Águila 13

En la medición Águila 13, se obtienen datos del comportamiento longitudinal y transversal de la primera cepa del puente, los cuales se analizan mediante el método de análisis de frecuencias, obteniendo los espectros de densidad de potencia y función coherencia, asimismo, se obtienen las formas modales asociadas al espectro de densidad de potencia. Además, con el fin de observar la torsión en la cepa 1, es que se realiza un análisis diferencial entre los canales longitudinales, calculando el espectro de densidad de potencia de la diferencia entre ambos acelerógrafos.

Al analizar los espectros de densidad de potencia del comportamiento longitudinal (Figura 8-57) y transversal (Figura 8-60) del puente, se observan “peaks” asociados a la cepa 1 en frecuencias cercanas a 4.11 y 4.8 [Hz] respectivamente. Por otro lado,

no se observa el efecto de torsión asociado a la frecuencia 5.8 [Hz] observado en campañas previas.

Al calcular el espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales ubicados en los extremos de la cepa (Figura 8-59), se observan “peaks” en 4.53, 5.07 y 8 [Hz], los que corresponderían a las frecuencias de torsión de la cepa 1.

Igualmente, se observan que los “peaks” fundamentales del comportamiento longitudinal (1.98 [Hz]) y del comportamiento transversal (2.39 [Hz]), se identifican en frecuencias levemente superiores (2.4 [Hz] y 2.6 [Hz] respectivamente), lo que se condice con lo observado en las calibraciones.

Los análisis realizados se obtienen filtrando la señal entre 0.3 y 10 [Hz], mediante un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto del tipo “Butterworth” de orden 8. Asimismo, para calcular los espectros de densidad de potencia y función coherencia, se utilizan ventanas del tipo “Hanning” de 10 [s] de duración.

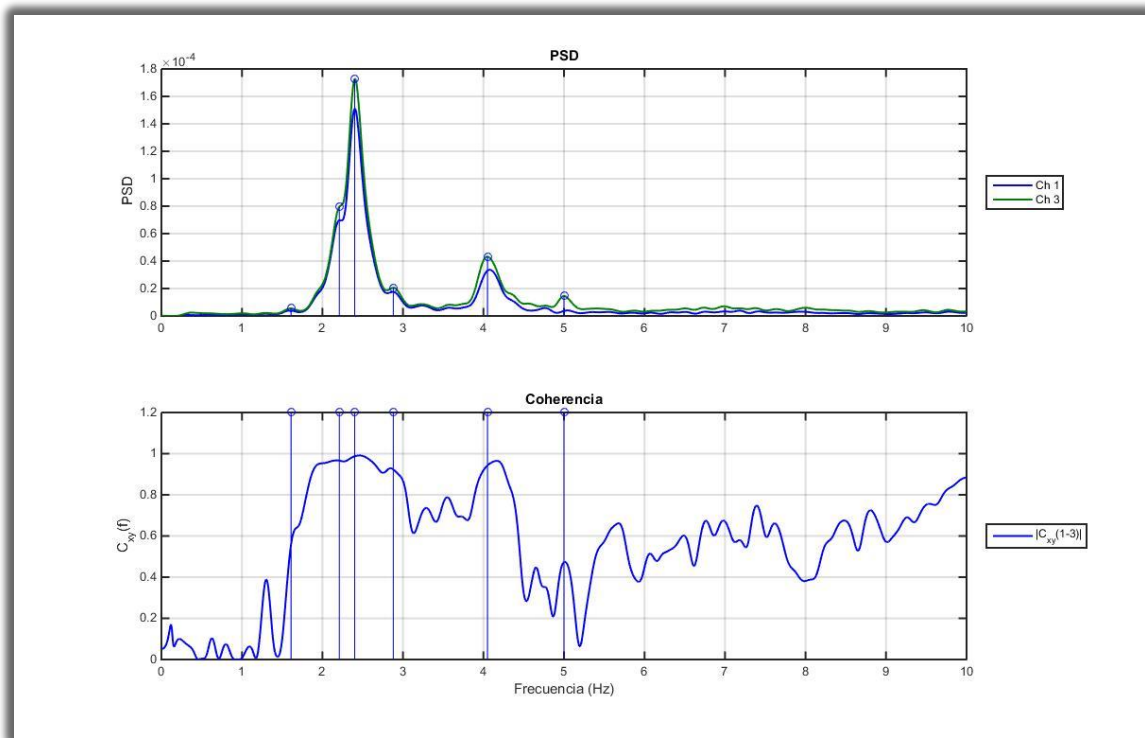


Figura 8-57: Espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición águila 13

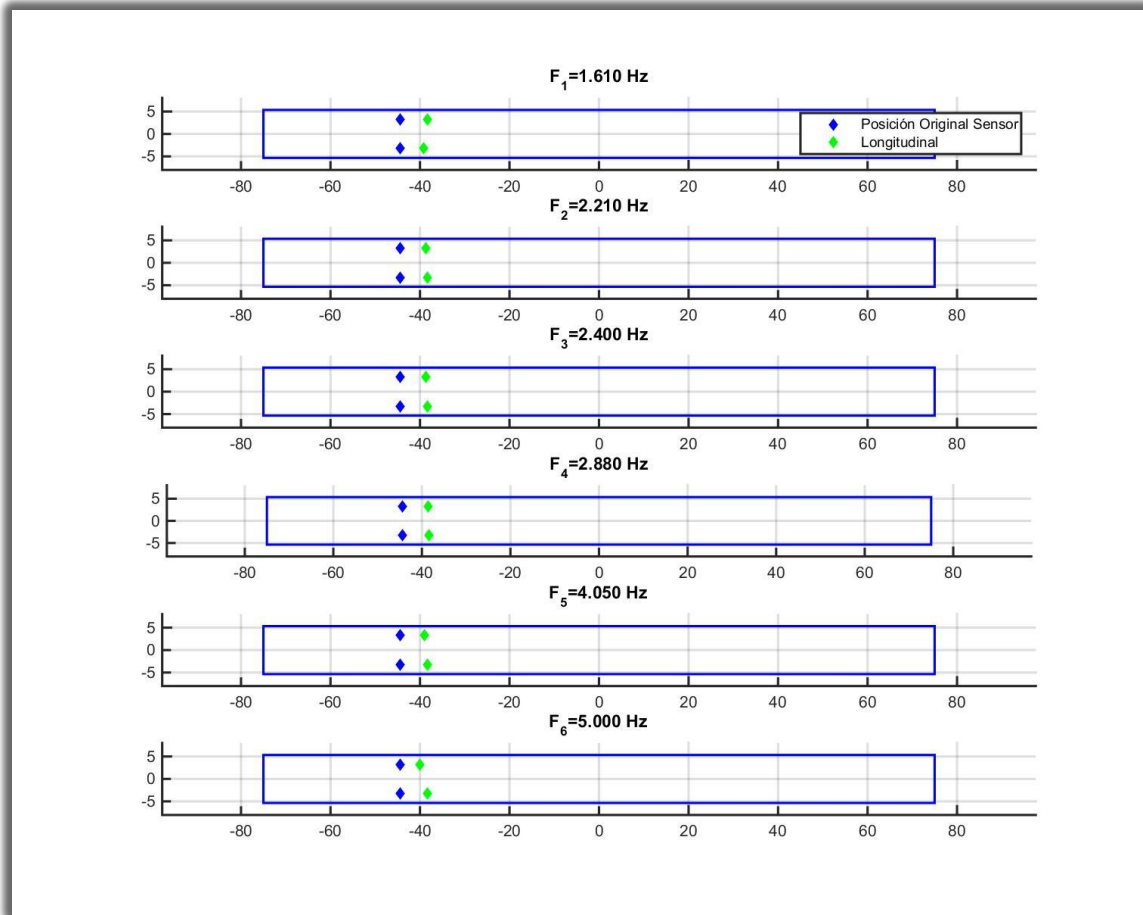


Figura 8-58: Formas modales del comportamiento longitudinal de la cepa 1

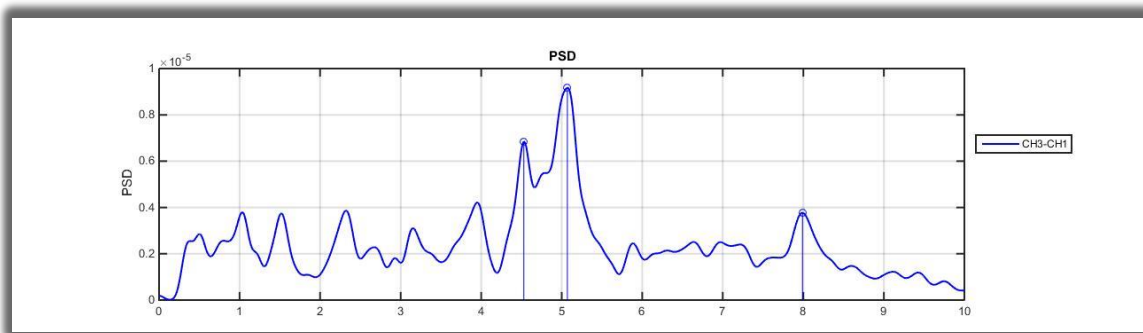


Figura 8-59: Espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales ubicados en la cepa 1

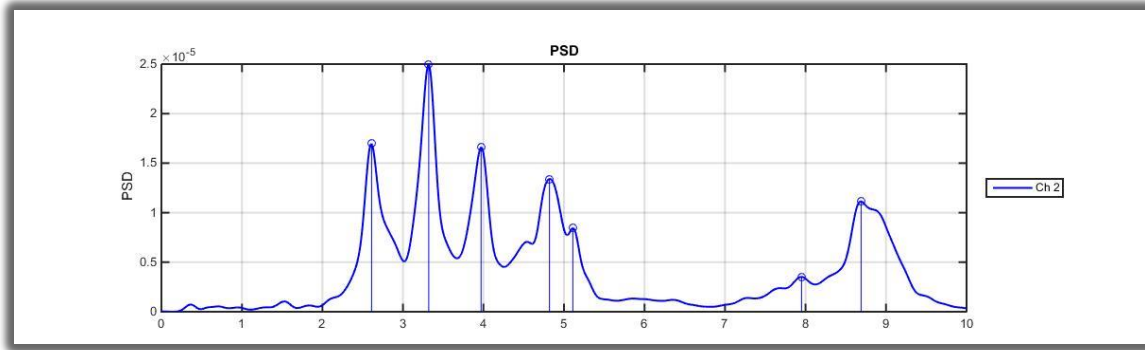


Figura 8-60: Espectro de densidad de potencia del comportamiento Transversal de la medición águila 13

Medición Águila 14

La medición águila 14 consta del registro de vibraciones de la cepa 1 y 2 en conjunto, catastrando datos del comportamiento transversal y longitudinal de la estructura. Los registros son analizados mediante el método de análisis de frecuencias, obteniendo los espectros de densidad de potencia y función coherencia, asimismo, se obtienen las formas modales asociadas al espectro de densidad de potencia. Además, con el fin de observar la torsión en la cepa 2, es que se realiza un análisis diferencial entre los canales longitudinales ubicados exclusivamente en la cepa 2, calculando el espectro de densidad de potencia de la diferencia entre ambos acelerógrafos.

Al analizar los espectros de densidad de potencia del comportamiento longitudinal (Figura 8-61), se observan “peaks” asociados a la cepa 1 y 2 en frecuencias cercanas a 4.11 y 3.95 [Hz] respectivamente. Por otra parte, al analizar el comportamiento transversal (Figura 8-62), se asocia a la cepa 1 una frecuencia de 4.81 [Hz] y a la cepa 2 una frecuencia de 4.46 [Hz].

Al calcular el espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales ubicados en los extremos de la cepa (Figura 8-64), se observan “peaks” en 4.53 y 8.93 [Hz], los que corresponderían a las frecuencias de torsión de la cepa 2.

Los análisis realizados se obtienen filtrando la señal entre 0.3 y 10 [Hz], mediante un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto del tipo “Butterworth” de orden 8. Asimismo, para calcular los espectros de densidad de potencia y función coherencia, se utilizan ventanas del tipo “Hanning” de 10 [s] de duración.

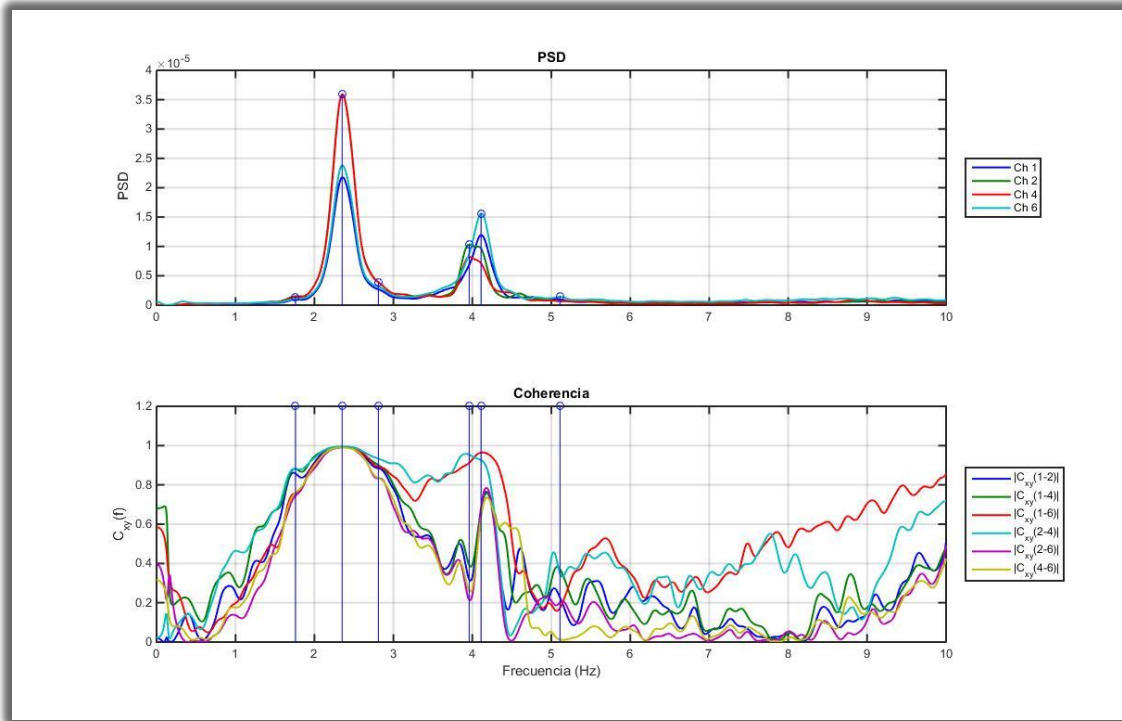


Figura 8-61: Espectro de densidad de potencia del comportamiento longitudinal de la medición águila 14

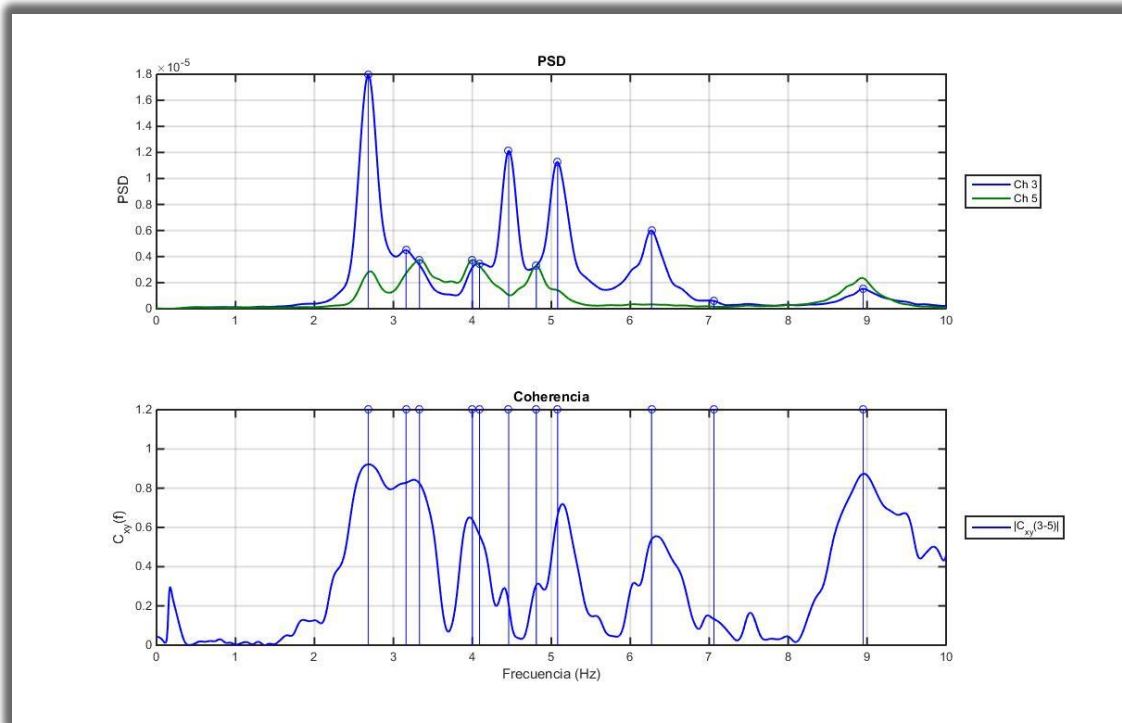


Figura 8-62: Espectro de densidad de potencia del comportamiento transversal de la medición águila 14

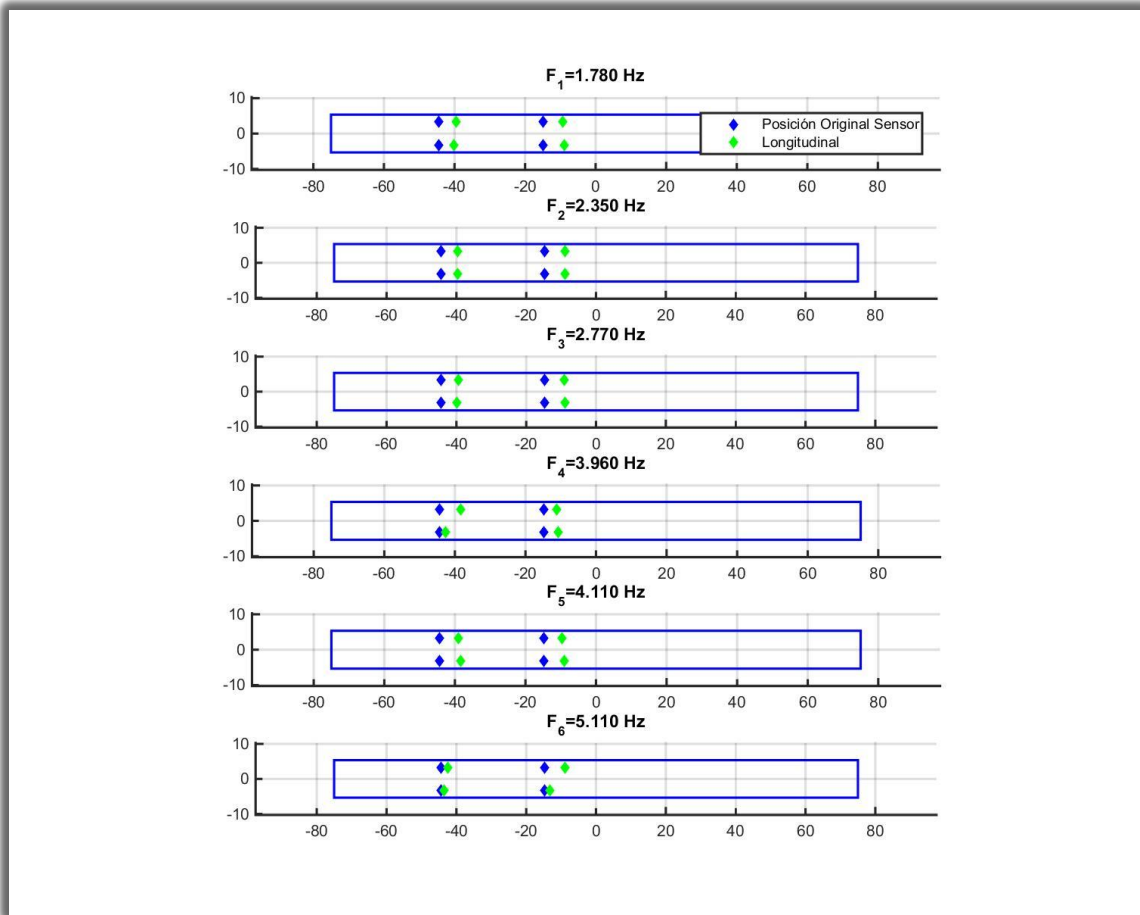


Figura 8-63: Formas modales del comportamiento longitudinal de la cepa 1 y 2

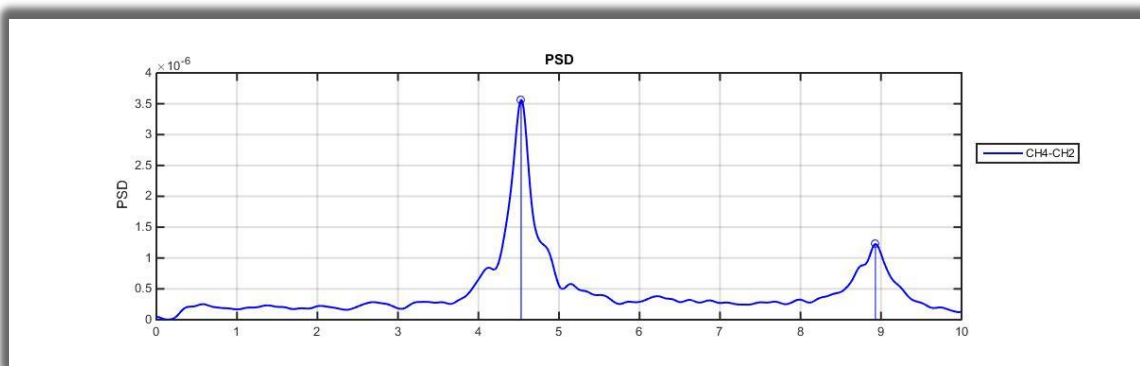


Figura 8-64: Espectro de densidad de potencia de la diferencia entre los canales ubicados en la cepa 2

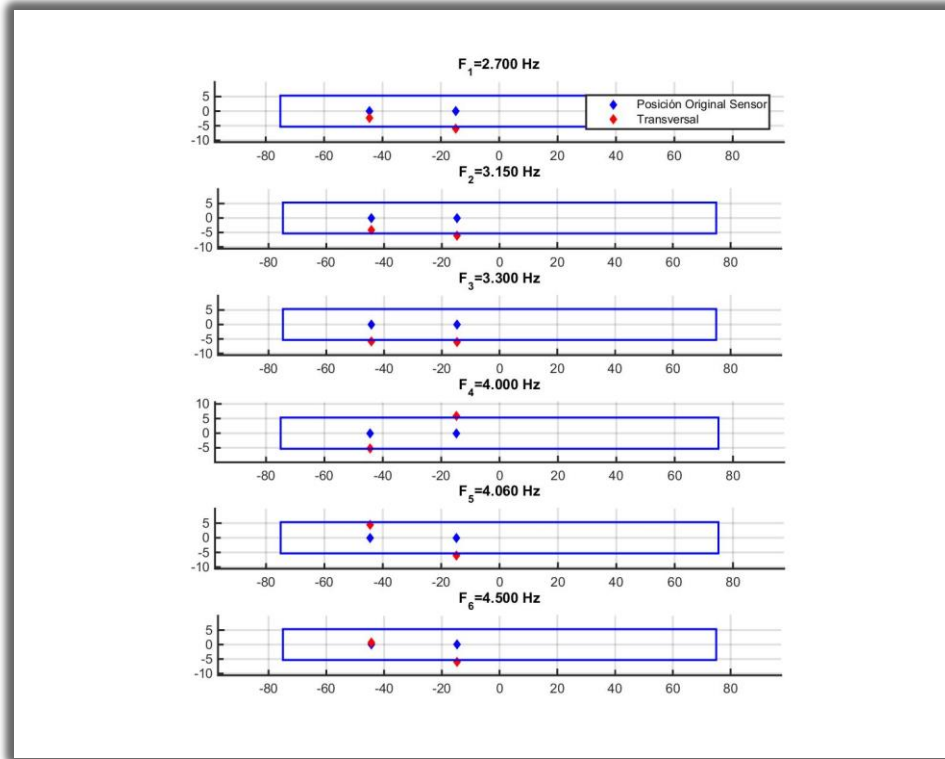


Figura 8-65: Formas modales del comportamiento transversal de la cepa 1 y 2

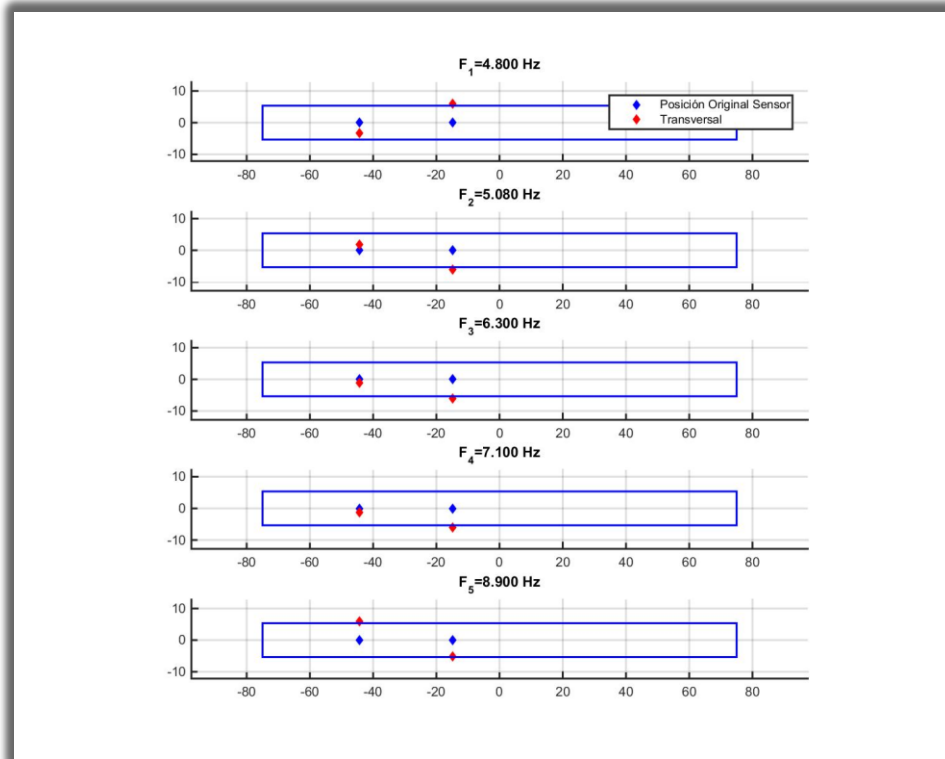


Figura 8-66: Formas modales del comportamiento transversal de la cepa 1 y 2

Anexo B

Contenido carpeta de resultados

A continuación, se entrega la descripción de las carpetas que componen los resultados previos de la plataforma del viaducto El Salto.

- Carpeta “Aceleraciones”: Carpeta que almacena los registros sísmicos analizados, en extensión *.mat.
- Carpeta “DSI (general)”: Carpeta donde se guardan los archivos que se generan al realizar un análisis mediante el método DSI en su primer caso general. De cada DSI en su primer caso general, se almacena la tabla resumen de frecuencias, amortiguamiento y formas modales obtenidas (en formato *.mat.), se guardan los resultados entregados por la rutina “ident_identsystem_VM_MIMO_R” (en formato *.mat.) para el método DSI, y se archiva el diagrama de estabilidad del método DSI (en formato *.jpg).
- Carpeta “DSI (general2)”: Carpeta donde se guardan los archivos que se generan al realizar un análisis mediante el método DSI en su segundo caso general. De cada DSI en su segundo caso general, se almacena la tabla resumen de frecuencias, amortiguamiento y formas modales obtenidas (en formato *.mat.) se guardan los resultados entregados por la rutina “ident_identsystem_VM_MIMO_R” (en formato *.mat.) para el método DSI, y se archiva el diagrama de estabilidad del método DSI (en formato *.jpg).
- Carpeta “DSI (Longitudinal)”: Carpeta donde se guardan los archivos que se generan al realizar un análisis mediante el método DSI en su primer caso Longitudinal. De cada DSI en su primer caso Longitudinal, se almacena la tabla resumen de frecuencias, amortiguamiento y formas modales obtenidas (en formato *.mat), se guardan los resultados entregados por la rutina “ident_identsystem_VM_MIMO_R” (en formato *.mat) para el método DSI, y se archiva el diagrama de estabilidad del método DSI (en formato *.jpg).
- Carpeta “DSI (Longitudinal2)”: Carpeta donde se guardan los archivos que se generan al realizar un análisis mediante el método DSI en su segundo caso Longitudinal. De cada DSI en su segundo caso Longitudinal, se almacena la tabla resumen de frecuencias, amortiguamiento y formas modales obtenidas

(en formato *.mat), se guardan los resultados entregados por la rutina “ident_identsystem_VM_MIMO_R” (en formato *.mat) para el método DSI, y se archiva el diagrama de estabilidad del método DSI (en formato *.jpg).

- Carpeta “DSI (Transversal)”: Carpeta donde se guardan los archivos que se generan al realizar un análisis mediante el método DSI en su primer caso Transversal. De cada DSI en su primer caso Transversal, se almacena la tabla resumen de frecuencias, amortiguamiento y formas modales obtenidas (en formato *.mat), se guardan los resultados entregados por la rutina “ident_identsystem_VM_MIMO_R” (en formato *.mat) para el método DSI, y se archiva el diagrama de estabilidad del método DSI (en formato *.jpg).
- Carpeta “DSI (Transversal2)”: Carpeta donde se guardan los archivos que se generan al realizar un análisis mediante el método DSI en su segundo caso Transversal. De cada DSI en su segundo caso Transversal, se almacena la tabla resumen de frecuencias, amortiguamiento y formas modales obtenidas (en formato *.mat), se guardan los resultados entregados por la rutina “ident_identsystem_VM_MIMO_R” (en formato *.mat) para el método DSI, y se archiva el diagrama de estabilidad del método DSI (en formato *.jpg).
- Carpeta “DSIPV”: Carpeta dentro de la cual se almacenan los resultados de los diferentes métodos DSI por pequeñas ventanas. Los resultados guardados son dos archivos, una imagen en extensión *.jpg que contiene el gráfico de frecuencia en función del tiempo, y un archivo en extensión *.mat, que contiene la información sobre el análisis DSI.
- Carpeta “Espectrogramas”: Carpeta en donde se almacenan en formato .jpg, los gráficos generados en MATLAB de los espectros de densidad de potencia, por pequeñas ventanas de tiempo, de los diversos sismos analizados.
- Carpeta “Espectro”: Carpeta en donde se almacenan en formato *.jpg, los gráficos generados en MATLAB de los espectros de potencia de los diversos sismos analizados.
- Carpeta “FH”: Carpeta en donde se almacenan en formato *.jpg, los gráficos generados en MATLAB de las funciones de transferencia, coherencia y fase, de los diversos sismos analizados.

- Carpeta “Formas_Modales”: Carpeta en donde se almacenan en formato *.jpg, los gráficos generados en MATLAB de las formas modales asociadas al método DSI, de los diversos sismos analizados.
- Carpeta “Funcion_transferencia_PV”: Carpeta en donde se almacenan en formato *.jpg, los gráficos generados en MATLAB de la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo, de los diversos sismos analizados.
- Carpeta “PSD”: Carpeta en donde se almacenan en formato *.jpg, los gráficos generados en MATLAB de los espectros de densidad de potencia, de los diversos sismos analizados.
- Carpeta “Registros”: Carpeta en donde se almacenan en formato *.jpg, los gráficos generados en MATLAB del desplazamiento en función del tiempo, de los diversos sismos analizados.

Contenido informe base

A continuación, se entrega la descripción de los archivos que componen los informes base de la plataforma del viaducto El Salto.

- Archivo “FCFM.jpg”: Imagen que contiene el logo de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile, que se ocupa como encabezado del informe base.
- Archivo “Informe Base Marga Marga.tex”: Archivo que contiene el código en LATEX, sobre el cual se genera el informe final. Este informe base es usado por la plataforma en los análisis de registros posteriores a julio del 2018.
- Archivo “Informe Base Marga Margaold.tex”: Archivo que contiene el código en LATEX, sobre el cual se genera el informe final. Este informe base es usado por la plataforma en los análisis de registros previos a julio del 2018.
- Archivo “Renadic.jpg”: Imagen que contiene el logo de RENADIC, que se ocupa como encabezado del informe.
- Archivo “Sensores.jpg”: Imagen que contiene la disposición posterior a julio del 2018, de sensores en el viaducto, y que es usada en el informe a manera de apoyo.
- Archivo “Sensoresold.jpg”: Imagen que contiene la disposición previa a julio del 2018, de sensores en el viaducto, y que es usada en el informe a manera de apoyo.

- Archivo “Viaducto.jpg”: Imagen del viaducto El salto, y que es usada en la portada del informe.

Variables de selección de métodos

Las variables que definen que métodos serán añadidos al informe, son las siguientes:

- Variable “si_registros”: Al seleccionarse, la plataforma calcula los registros de aceleraciones de todos los canales instrumentados en el puente, y los añade al informe como 2 gráficos, donde cada uno entrega el registro de 10 canales.
- Variable “si_espectro”: Al seleccionarse, la plataforma calcula los espectros elásticos de todos los canales instrumentados en el puente, y los añade al informe como 2 gráficos, donde cada uno entrega el espectro elástico de 10 canales.
- Variable “si_PSD”: Al seleccionarse, la plataforma calcula los espectros de densidad de potencia de todos los canales instrumentados en el puente, y los añade al informe como 2 gráficos, uno para los canales ubicados en dirección longitudinal, y otro para los canales ubicados en dirección transversal. Este método se puede configurar según las necesidades del usuario, en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2).
- Variable “si_FH”: Al seleccionarse, la plataforma calcula la función de transferencia entre los pares de canales seleccionados en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2), y los añade al informe como 2 gráficos, uno para los pares de canales ubicados en dirección longitudinal, y otro para los pares de canales ubicados en dirección transversal.
- Variable “si_DSIL”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta longitudinal, mediante el método DSI según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI, la plataforma añade al informe un gráfico con un diagrama de estabilidad y una tabla resumen con las propiedades dinámicas identificadas. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando al canal 4 como entrada y a los canales 7,12 y 20 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.

- Variable “si_FML”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las formas modales de la estructura, a partir de los resultados del método DSI asociado, y las añade al informe mediante un gráfico que contiene las formas modales identificadas.
- Variable “si_DSIL2”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta longitudinal, mediante el método DSI según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI, la plataforma añade al informe un gráfico con un diagrama de estabilidad y una tabla resumen con las propiedades dinámicas identificadas. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando a los canales 4 y 10 como entradas y a los canales 7,12 y 20 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “si_FML2”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las formas modales de la estructura, a partir de los resultados del método DSI asociado, y las añade al informe mediante un gráfico que contiene las formas modales identificadas.
- Variable “si_DSIT”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta transversal, mediante el método DSI según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI, la plataforma añade al informe un gráfico con un diagrama de estabilidad y una tabla resumen con las propiedades dinámicas identificadas. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando al canal 18 como entrada y a los canales 3, 6, 9, 11, 13 y 19 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “si_FMT”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las formas modales de la estructura, a partir de los resultados del método DSI asociado, y las añade al informe mediante un gráfico que contiene las formas modales identificadas.
- Variable “si_DSIT2”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta transversal, mediante el método DSI según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI, la plataforma añade al informe un gráfico con un diagrama de estabilidad y una tabla resumen con las propiedades

dinámicas identificadas. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando al canal 6 como entrada y a los canales 9, 11, 13 y 19 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.

- Variable “si_FMT2”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las formas modales de la estructura, a partir de los resultados del método DSI asociado, y las añade al informe mediante un gráfico que contiene las formas modales identificadas.
- Variable “si_DSIG”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta general, mediante el método DSI según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI, la plataforma añade al informe un gráfico con un diagrama de estabilidad y una tabla resumen con las propiedades dinámicas identificadas. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando a los canales 4, 6 y 10 como entradas y a los canales 7, 9, 11, 12, 13, 19 y 20 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “si_DSIG2”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta general, mediante el método DSI según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI, la plataforma añade al informe un gráfico con un diagrama de estabilidad y una tabla resumen con las propiedades dinámicas identificadas. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando a los canales 16, 18 y 10 como entradas y a los canales 1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 19 y 20 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “si_CSN”: Al seleccionarse, la plataforma añade al informe la información disponible en la página web del centro sismológico nacional sobre el sismo, siempre y cuando esta se encuentre en la respectiva carpeta del registro sísmico.
- Variable “si_PSDPV”: Al seleccionarse, la plataforma calcula y añade al informe los espectros de densidad de potencia por pequeñas ventanas de 4

canales a elección orientados en el sentido longitudinal, 4 canales orientados en el sentido transversal y 4 canales en el sentido vertical.

- Variable “si_ PSDPVH”: Al seleccionarse, la plataforma calcula la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo, entre los pares de canales seleccionados en la zona de configuración de métodos, y los añade al informe como 4 gráficos, 2 para los pares de canales ubicados en dirección longitudinal y 2 para los pares de canales ubicados en dirección transversal.
- Variable “si_ DSIPV”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta longitudinal, mediante el método DSI por pequeñas ventanas de tiempo según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI por pequeñas ventanas, la plataforma añade al informe un gráfico de la variación de las frecuencias naturales de la estructura, versus el tiempo. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando al canal 4 como entrada y a los canales 7, 12 y 20 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “si_ DSIPV2”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta longitudinal, mediante el método DSI por pequeñas ventanas de tiempo, según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI por pequeñas ventanas, la plataforma añade al informe un gráfico de la variación de las frecuencias naturales de la estructura, versus el tiempo. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando a los canales 4 y 10 como entrada y a los canales 7, 12 y 20 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “si_ DSIPV3”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta transversal, mediante el método DSI por pequeñas ventanas de tiempo según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI por pequeñas ventanas, la plataforma añade al informe un gráfico de la variación de las frecuencias naturales de la estructura, versus el tiempo. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando al canal 18 como entrada y a los canales 3, 6, 9, 11,

13 y 19 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.

- Variable “si_ DSIPV4”: Al seleccionarse, la plataforma calcula las propiedades dinámicas de la estructura en su respuesta transversal, mediante el método DSI por pequeñas ventanas de tiempo según la configuración especificada en la zona de configuración de métodos (capítulo 5.2.2). Para el método DSI por pequeñas ventanas, la plataforma añade al informe un gráfico de la variación de las frecuencias naturales de la estructura, versus el tiempo. La interfaz se encuentra configurada para que, al activar la variable, se calcule el método DSI tomando al canal 6 como entrada y a los canales 9, 11, 13 y 19 como salidas, siendo esta numeración la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.

Variables de configuración de métodos

Parámetros generales

- Variable “ubicación_M_M”: Variable que define la ubicación del viaducto El Salto en formato latitud y longitud.
- Variable “Fs”: Variable que define la frecuencia de muestreo de los acelerómetros instrumentados en la estructura.
- Variable “N”: Variable que define el orden del filtro “Butterworth” a utilizar, para filtrar la señal de los registros.
- Variable “Wn”: Variable que define la frecuencia del filtro pasa bajo a utilizar, para filtrar la señal de los registros.
- Variable “CoordenadasM_M”: Variable que define las coordenadas de los acelerómetros instrumentados en la estructura, tomando como origen el sensor 1 y su magnitud expresada en metros. Siendo la disposición de los instrumentos, la correspondiente a la posterior al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “CoordenadasM_Mold”: Variable que define las coordenadas de los acelerómetros instrumentados en la estructura, tomando como origen el sensor 1 y su magnitud expresada en metros. Siendo la disposición de los instrumentos, la correspondiente a la anterior al cambio realizado en el julio del 2018.

Parámetros de los PSD y Funciones de transferencia

- Variable “ParesLold”: Variable que define los pares de canales longitudinales a analizar mediante la función de transferencia. En esta variable se enumeran los pares según la disposición previa al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “ParesTold”: Variable que define los pares de canales transversales a analizar mediante la función de transferencia. En esta variable se enumeran los pares según la disposición previa al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “ParesL”: Variable que define los pares de canales longitudinales a analizar mediante la función de transferencia. En esta variable se enumeran los pares según la disposición posterior al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “ParesT”: Variable que define los pares de canales transversales a analizar mediante la función de transferencia. En esta variable se enumeran los pares según la disposición posterior al cambio realizado en julio del 2018.
- Variable “Tesp”: Variable que define en segundos el paso de tiempo para el uso de las ventanas.
- Variable “Windows”: Variable que define el tipo de ventana a utilizar para obtener los espectros de densidad de potencia. Por configuración, la plataforma utiliza ventanas del tipo “Hanning”.
- Variable “freq_vector”: Variable que define el vector de frecuencia a utilizar para obtener los espectros de densidad de potencia.
- Variable “freqiden”: Variable que define las frecuencias “peaks” a buscar en el espectro de densidad de potencia.

Parámetros espectrogramas

- Variable “flim”: Variable que define el rango de frecuencia a analizar, mientras que el resto del registro será cortado para este método.
- Variable “canalesPSDPVLold”: Variable que contiene la numeración previa a julio del 2018, de 4 canales longitudinales a ser graficados como espectrogramas.
- Variable “canalesPSDPVLnew”: Variable que contiene la numeración posterior a julio del 2018, de 4 canales longitudinales a ser graficados como espectrogramas.

- Variable “canalesPSDPVTold”: Variable que contiene la numeración previa a julio del 2018, de 4 canales transversales a ser graficados como espectrogramas.
- Variable “canalesPSDPVTnew”: Variable que contiene la numeración posterior a julio del 2018, de 4 canales transversales a ser graficados como espectrogramas.
- Variable “canalesPSDPVVold”: Variable que contiene la numeración previa a julio del 2018, de 4 canales verticales a ser graficados como espectrogramas.
- Variable “canalesPSDPVVnew”: Variable que contiene la numeración posterior a julio del 2018, de 4 canales verticales a ser graficados como espectrogramas.
- Variable” TespPSD”: Variable que define en segundos el paso de tiempo para el uso de las ventanas.

Parámetros función de transferencia por pequeñas ventanas

- Variable “flimFHPV”: Variable que define el rango de frecuencia a analizar, mientras que el resto del registro será cortado para este método.
- Variable “ParesL1oldFHPV”: Variable que define los primeros 4 pares longitudinales a comparar, mediante la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo. En esta variable se enumeran los pares según la disposición anterior a julio de 2018.
- Variable “ParesL2oldFHPV”: Variable que define los segundos 4 pares longitudinales a comparar, mediante la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo. En esta variable se enumeran los pares según la disposición anterior a julio de 2018.
- Variable “ParesT1oldFHPV”: Variable que define los primeros 4 pares transversales a comparar, mediante la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo. En esta variable se enumeran los pares según la disposición anterior a julio de 2018.
- Variable “ParesT2oldFHPV”: Variable que define los segundos 4 pares transversales a comparar, mediante la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo. En esta variable se enumeran los pares según la disposición anterior a julio de 2018.
- Variable “ParesL1FHPV”: Variable que define los primeros 4 pares longitudinales a comparar, mediante la función de transferencia por pequeñas

ventanas de tiempo. En esta variable se enumeran los pares según la disposición posterior a julio de 2018.

- Variable “ParesL2FHPV”: Variable que define los segundos 4 pares longitudinales a comparar, mediante la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo. En esta variable se enumeran los pares según la disposición posterior a julio de 2018.
- Variable “ParesT1FHPV”: Variable que define los primeros 4 pares transversales a comparar, mediante la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo. En esta variable se enumeran los pares según la disposición posterior a julio de 2018.
- Variable “ParesT2FHPV”: Variable que define los segundos 4 pares transversales a comparar, mediante la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo. En esta variable se enumeran los pares según la disposición posterior a julio de 2018.
- Variable “TespPSD”: Variable que define en segundos el paso de tiempo para el uso de las ventanas.

Parámetros método de identificación DSI

- Variable “nFsi”: Variable que configura el factor de re-muestreo de la señal a ser analizada bajo los métodos de identificación DSI.
- Variable “validación”: Variable que determina que porcentaje de minuto no es identificado y es predicho por el método de identificación DSI.
- Variable “tolfi”: Variable que determina la tolerancia para identificar la propiedad dinámica de las formas modales, en la tabla resumen asociada al método de identificación DSI.

Para describir cómo es la configuración de los parámetros particulares de cada uno de los 6 métodos de identificación DSI, se procede a describir los parámetros que configuran uno de los métodos DSI, de tal forma que sirva como ejemplo para los demás métodos DSI, ya que los 6 métodos se configuran de la misma forma.

- Variable “ch_output”: Variable que define los canales de salida del método DSI MIMO, indicando el número del canal en su enumeración posterior a julio 2018.

- Variable “ch_input”: Variable que define los canales de entrada del método DSI MIMO, indicando el número del canal en su enumeración posterior a julio 2018.
- Variable “ch_outputold”: Variable que define los canales de salida del método DSI MIMO, indicando el número del canal en su enumeración anterior a julio 2018.
- Variable “ch_inputold”: Variable que define los canales de entrada del método DSI MIMO, indicando el número del canal en su enumeración anterior a julio 2018.
- Variable “GDL1”: Variable que define el número de grados de libertad a utilizar en el análisis del método de identificación DSI.
- Variable “tolerancia”: Variable que define la tolerancia utilizada para identificar propiedades dinámicas en el diagrama de estabilidad del método DSI, siendo el primer número asociado a la tolerancia de la frecuencia, el segundo asociado a la tolerancia del amortiguamiento y el tercero a la tolerancia entre las formas modales.
- Variable “tolFF1”: Variable que define la tolerancia para identificar la frecuencia en la tabla resumen de resultados del método DSI.
- Variable “Ncoincidencias”: Variable que define el número mínimo de coincidencias dentro del diagrama de estabilidad, para que la frecuencia aparezca en la tabla resumen de resultados del método DSI.
- Variable “dir_canL1”: Variable que define en un vector la orientación de los canales graficados en las formas modales, asignando un valor de 1 al canal, si este está orientado en la dirección longitudinal y 2, si está orientado en la dirección transversal.
- Variable “fbusc”: Variable que define en un vector las frecuencias que se buscan identificar para graficar en las formas modales, si se asigna un valor cero a la variable, se calcularán las 4 primeras formas modales de la tabla resumen del método DSI.
- Variable “nantes1”: Variable que define la cantidad de datos previos, dentro de los que se busca la frecuencia a graficar en el diagrama de estabilidad.
- Variable “GDLantes1”: Variable que define la cantidad de grados de libertad previos, dentro de los que se busca la frecuencia a graficar dentro del diagrama de estabilidad.

- Variable “Tol1”: Variable que define la tolerancia aceptable entre los datos del diagrama de estabilidad a graficar en las formas modales, siendo el primer número asociado a la tolerancia de la frecuencia, el segundo asociado a la tolerancia del amortiguamiento y el tercero a la tolerancia entre las formas modales.
- Variable “Tolfb1”: Variable que define la tolerancia entre la diferencia de la frecuencia identificada en las formas modales, y la identificada en la tabla resumen asociada al diagrama de estabilidad.
- Variable “ajusteL1”: Variable que define la escala a utilizar en los gráficos de formas modales.

Parámetros método DSI por pequeñas ventanas

- Variable “GDLDSIPV”: Variable que define el número de grados de libertad a utilizar en el análisis del método de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo.
- Variable “TDSIvent”: Variable que define el tiempo en segundos de la ventana a utilizar para el DSI por pequeñas ventanas.
- Variable “FsDSIPV”: Variable que define la frecuencia de muestreo del registro original.
- Variable “mereseempleo”: Variable que cuando su valor es 1, la plataforma realiza un re-muestreo de la señal, por otra parte, si el valor es 0, no realiza el re-muestreo.
- Variable “Fsnew”: Variable que define la frecuencia en la que se re-muestrea el registro.
- Variable “validacionDSIPV”: Variable que define el porcentaje de minuto que no se identifica y se predice durante el análisis.

Para describir cómo es la configuración de los parámetros particulares de cada uno de los 6 métodos de identificación DSI por pequeñas ventanas, se procede a describir los parámetros que configuran uno de los métodos DSI por pequeñas ventanas, de tal forma que sirva como ejemplo para los demás métodos, ya que estos se configuran de la misma forma.

- Variable “translapof1”: Variable que define el traslapo entre las ventanas de tiempo utilizadas.

- Variable “entradas1”: Variable que define los canales de entrada del método DSI MIMO por pequeñas ventanas, indicando el número del canal en su enumeración posterior a julio del 2018.
- Variable “entradas1V”: Variable que define los canales de entrada del método DSI MIMO por pequeñas ventanas, indicando el número del canal en su enumeración anterior a julio del 2018.
- Variable “salidas1”: Variable que define los canales de salida del método DSI MIMO por pequeñas ventanas, indicando el número del canal en su enumeración posterior a julio del 2018.
- Variable “salidas1V”: Variable que define los canales de salida del método DSI MIMO por pequeñas ventanas, indicando el número del canal en su enumeración anterior a julio del 2018.
- Variable “cff”: Variable que define el criterio de similitud de frecuencias, en la identificación de frecuencias, para el método DSI MIMO por pequeñas ventanas.
- Variable “cmac”: Variable que define el criterio de similitud de criterio MAC (Frecuencias y formas modales), en identificación de frecuencias, para el método DSI MIMO por pequeñas ventanas.
- Variable “cmacs”: Variable que define el criterio de similitud de criterio súper MAC (Frecuencias, razón de amortiguamiento y formas modales) en identificación de frecuencias, para el método DSI MIMO por pequeñas ventanas.
- Variable “y11”: Variable que define el límite inferior del eje y del gráfico de frecuencias en función de tiempo, calculado por el método DSI MIMO por pequeñas ventanas de tiempo.
- Variable “y21”: Variable que define el límite superior del eje y del gráfico de frecuencias en función de tiempo, calculado por el método DSI MIMO por pequeñas ventanas de tiempo.
- Variable “nFsDSIPV1”: Variable que define el factor de re-muestreo a utilizar en el análisis.

Calibración método de identificación DSI

La subrutina de Matlab que se encarga de la calibración de los resultados generados por el método de identificación DSI, se encuentra en la carpeta de funciones Matlab de la plataforma (Figura 8-67). Para poder ocupar esta función, es necesario que los resultados generados por la función “ident_identsystem_VM_MIMO_R” (que es ocupada por la plataforma), se encuentren en su respectiva carpeta de resultados previos, por el contrario, el diagrama de estabilidad y tabla resumen del diagrama de estabilidad no son requeridos.

A partir de los resultados de la función “ident_identsystem_VM_MIMO_R”, la subrutina permite generar nuevos diagramas de estabilidad y tablas resumen de resultados, para esto se debe activar los métodos DSI a calibrar mediante su respectiva variable en el programa, y se debe seleccionar la nueva calibración (Figura 8-68). A continuación, se explica cómo seleccionar y calibrar uno de los resultados de los métodos DSI, recalando que los otros métodos DSI se calibran de la misma forma.

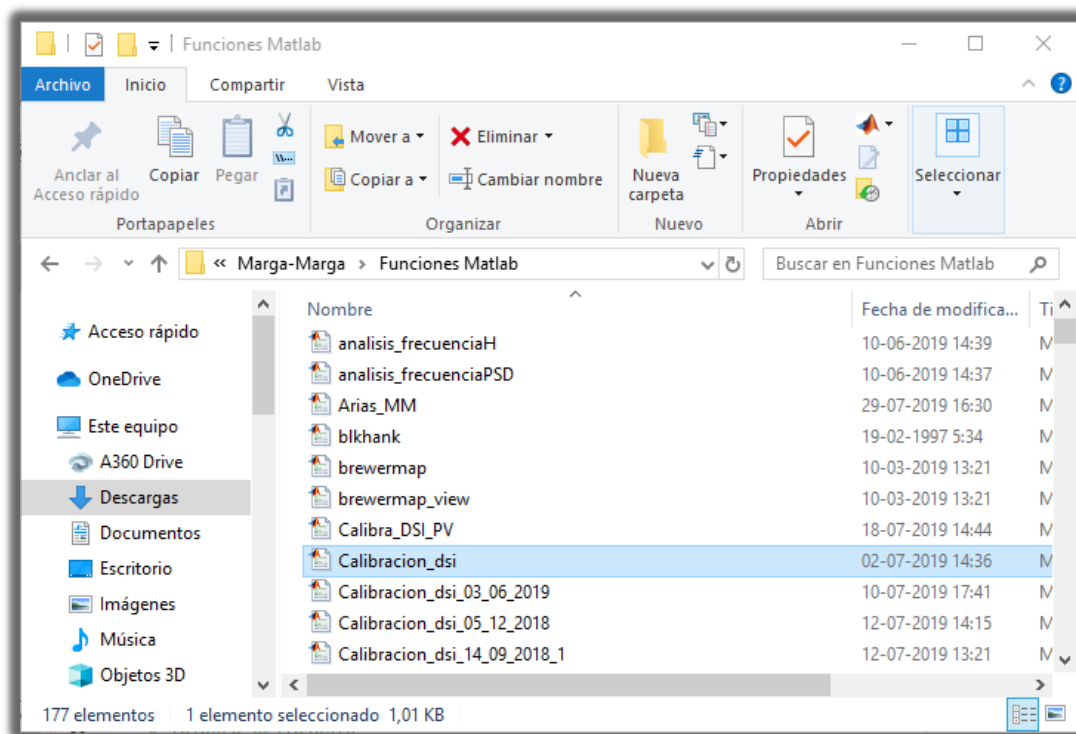


Figura 8-67: Ubicación rutina de calibración del método DSI

El código del calibrador presenta una primera zona orientada al usuario, en donde se seleccionan los resultados a calibrar y los nuevos valores de calibración. Estas variables son descritas a continuación para especificar como configurarlas.

- Variable “Carpeta”: Variable en la cual se debe colocar el nombre de la carpeta en “”...\Registros marga-marga\sismos”, del sismo al cual se quiere calibrar los resultados.
- Variable “tolfi1”: Variable que determina la tolerancia para identificar la propiedad dinámica de formas modales, en la tabla resumen asociada al método de identificación DSI.
- Variable “tolerancia1”: Variable que define la tolerancia utilizada para identificar propiedades dinámicas en el diagrama de estabilidad del método DSI, siendo el primer número asociado a la tolerancia de la frecuencia, el segundo asociado a la tolerancia del amortiguamiento y el tercero a la tolerancia entre las formas modales.
- Variable “tolF1”: Variable que define la tolerancia para identificar la frecuencia, en la tabla resumen de resultados del método DSI.
- Variable “Ncoincidencias1”: Variable que define el número mínimo de coincidencias dentro del diagrama de estabilidad, para que la frecuencia aparezca en la tabla resumen de resultados del método DSI.

```
%% Zona del usuario

carpeta='1906031';
|
si_longitudinal1=1;
    tolerancia1=[5,5,5];
    tolF1=3.5/100;
    tolfi1=5/100;
    Ncoincidencias1=5;

si_longitudinal2=0;
    tolerancia2=[3.5,5,5];
    tolF2=3.5/100;
    tolfi2=5/100;
    Ncoincidencias2=7;

si_transversal1=0;
    tolerancia3=[3,5,5];
    tolF3=2.5/100;
    tolfi3=5/100;
    Ncoincidencias3=7;
```

Figura 8-68: Variables para calibrar los resultados del método DSI

Calibración método de identificación DSI por pequeñas ventanas

La subrutina de Matlab que se encarga de la calibración de los resultados generados por el método de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo, se encuentra en la carpeta de funciones Matlab de la plataforma (Figura 8-69). Para poder ocupar esta función, es necesario que los resultados generados por la función “ident_identsystem_VM_MIMO_R_PUNTUAL2” (que es ocupada por la plataforma), se encuentren en su respectiva carpeta de resultados previos y que la tabla de resumen de resultados se encuentre en la carpeta de resultados previos “DSIPV”.

A partir de los resultados de la función “ident_identsystem_VM_MIMO_R_PUNTUAL2”, la subrutina permite generar un nuevo gráfico de frecuencia en función del tiempo, para esto se debe activar los métodos DSI a calibrar mediante su respectiva variable en el programa y se debe seleccionar la nueva calibración. A continuación, se explica cómo seleccionar y calibrar uno de los resultados de los métodos DSI por pequeñas ventanas, recalcando que los otros métodos se calibran de la misma forma.

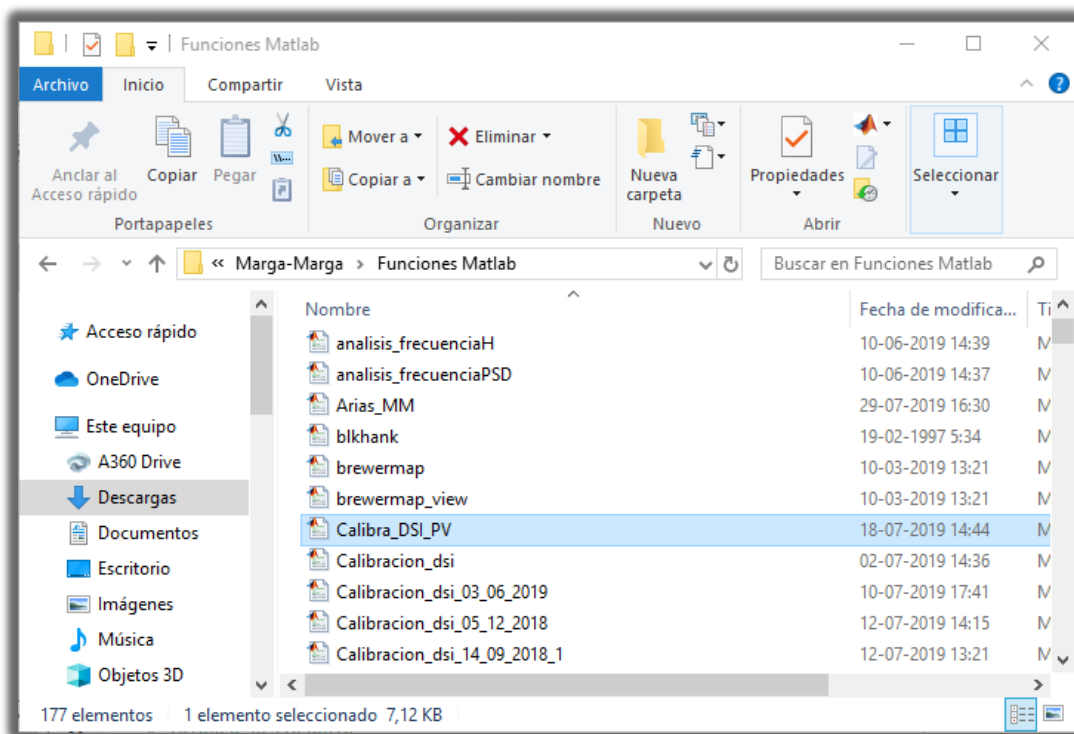


Figura 8-69: Ubicación rutina de calibración del método DSI por pequeñas ventanas

El código del calibrador presenta una primera zona orientada al usuario, en donde se seleccionan los resultados a calibrar, y los nuevos valores de calibración. Estas variables son descritas a continuación para especificar como configurarlas.

- Variable “Carpeta”: Variable en la cual se debe colocar el nombre de la carpeta en “” ...\- Variable “GDLDSIPV1”: Variable que define el número de grados de libertad a utilizar en el análisis del método de identificación DSI por pequeñas ventanas de tiempo.
- Variable “frec_ident1”: Variable que define las frecuencias a identificar en el gráfico de frecuencia en función del tiempo.
- Variable cff1”: Variable que define el criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias, para el método DSI MIMO por pequeñas ventanas.
- Variable “cmacl”: Variable que define el criterio de similitud de criterio MAC (Frecuencias y formas modales), en identificación de frecuencias, para el método DSI MIMO por pequeñas ventanas.
- Variable “cmacl”: Variable que define el criterio de similitud de criterio MAC (Frecuencias y formas modales), en identificación de frecuencias, para el método DSI MIMO por pequeñas ventanas.
- Variable “cmacl”: Variable que define el criterio de similitud de criterio MAC (Frecuencias y formas modales), en identificación de frecuencias, para el método DSI MIMO por pequeñas ventanas.
- Variable “cmacl”: Variable que define el criterio de similitud de criterio MAC (Frecuencias y formas modales), en identificación de frecuencias, para el método DSI MIMO por pequeñas ventanas.
- Variable “guarda_DSIPV”: Variable que define si el gráfico de frecuencia en función del tiempo es sobre guardado en la carpeta de resultados previos de método DSI por pequeñas ventanas de tiempo.

```

%% Zona del usuario

carpeta='1904091ns';

%% Configuración de métodos
si_DSIPV=1;
GDLDSIPV1=120; %Número de grados de libertad
frec_ident1=[1.83,1.92,2.74]; %Frecuencias buscada al inicio
cff1=[0.005,0.005,0.01,0.2,0.2,0.2,0.2]; %Criterio de similitud de frec
cmacl=[0.9,0.9,0.9]; %Criterio de similitud de MAC
cmacl=[0.9,0.9,0.9]; %Criterio de similitud de Sup
guarda_DSIPV=1;

```

Figura 8-70: Variables para calibrar los resultados del método DSI por pequeñas ventanas de tiempo

Anexo C

PSD del viaducto El Salto

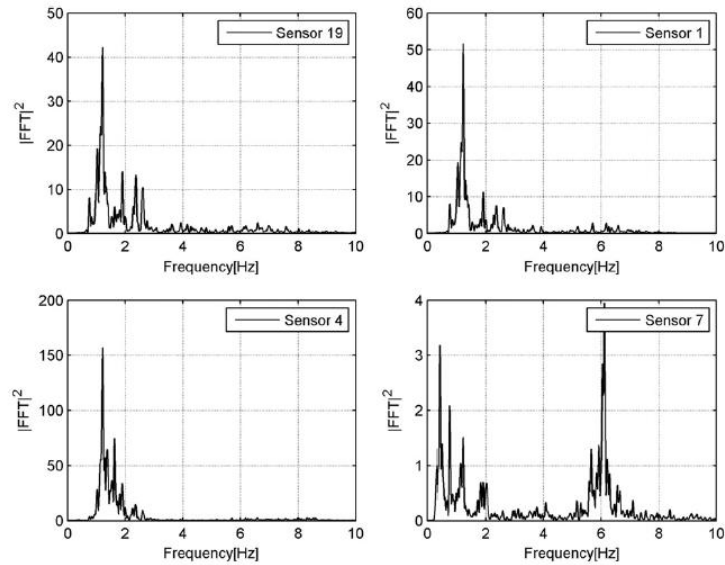


Figura 8-71: Espectro de densidad de potencia longitudinal, terremoto del Maule (Sarrazín, Moroni, Neira, & Venegas, 2012)

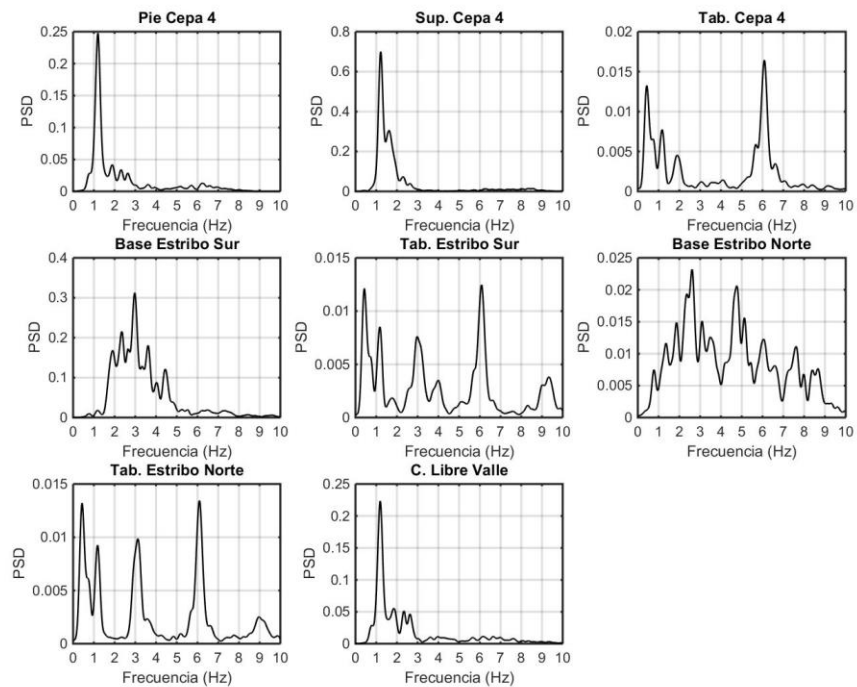


Figura 8-72: Espectro de densidad de potencia Longitudinal, terremoto del Maule

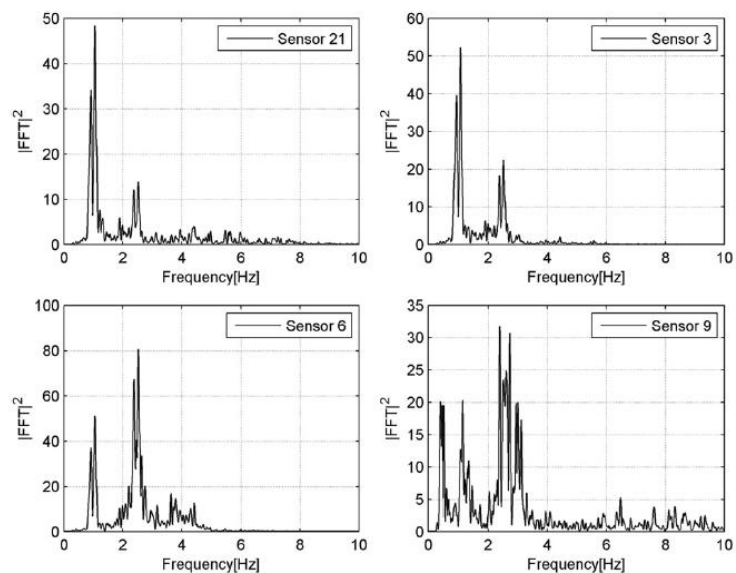


Figura 8-73: Espectro de densidad de potencia transversal, terremoto del Maule (Sarrazín, Moroni, Neira, & Venegas, 2012)

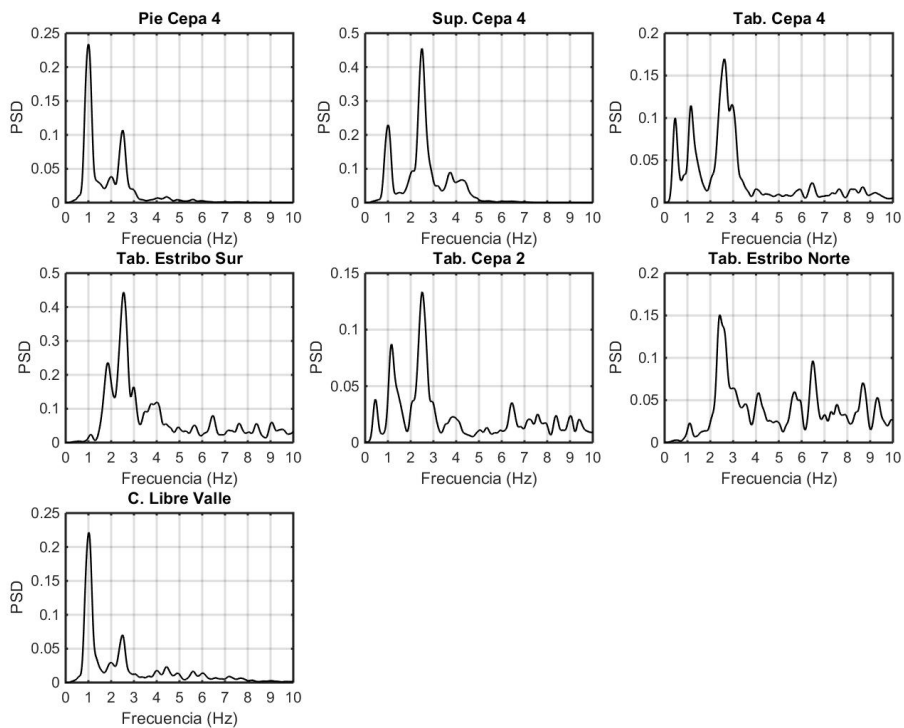


Figura 8-74: Espectro de densidad de potencia transversal, terremoto del Maule

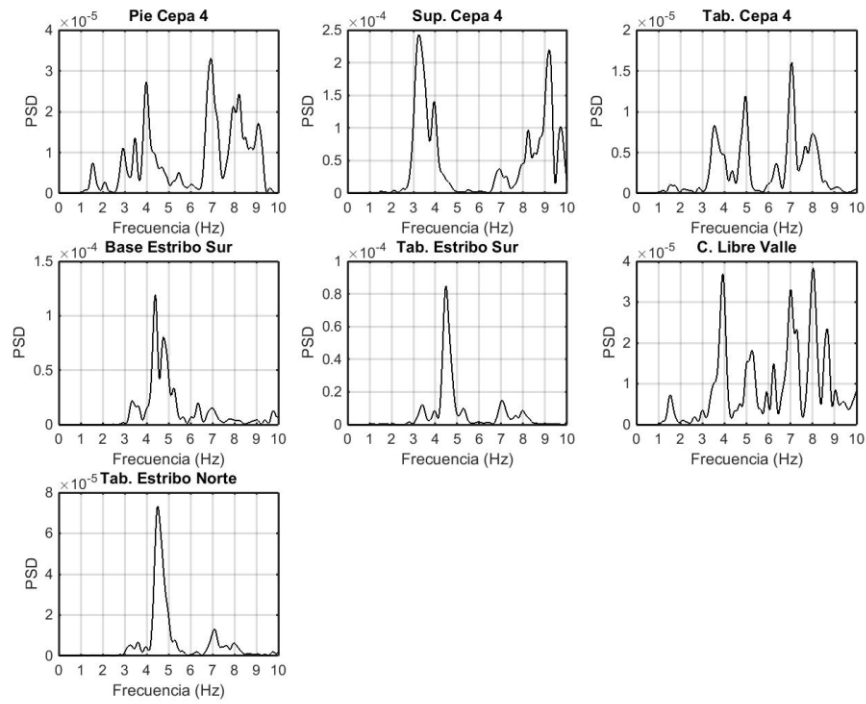


Figura 8-75: Espectro de densidad de potencia longitudinal, sismo del 16/07/2018

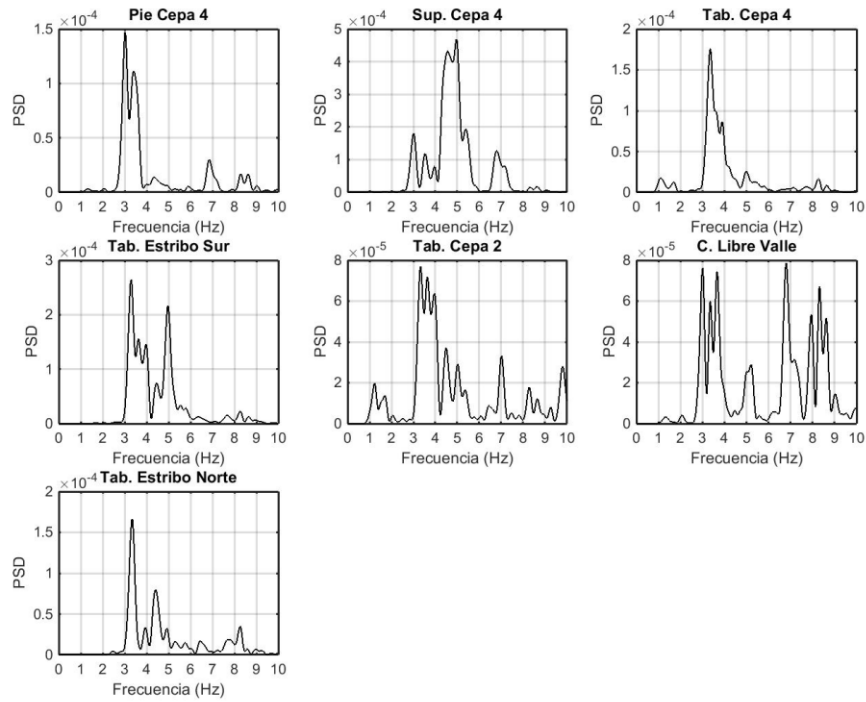


Figura 8-76: Espectro de densidad de potencia transversal, sismo del 16/07/2018

Tabla 8-7: Amplificación sísmica eventos del 16/07/2018 al 14/09/2018 y evento del 27/02/2010

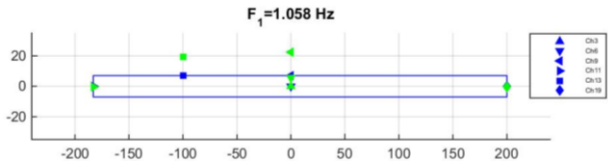
Registro	27/02/2010	16/07/2018	30/08/2018	14/09/2018	14/09/2018
Aceleración máxima del suelo (g)	0.353	0.013	0.049	0.015	0.016
Aceleración Máxima de la superestructura	1.976	0.017	0.076	0.016	0.024
Tablero Estribo Sur/Base Estribo Sur (Ch-12/Ch-10)	0.302	0.526	0.281	0.359	0.728
Tablero Estribo Norte/Base Estribo Norte (Ch-18/Ch-16)	0.662	-	-	-	-
Tablero Cepa 4/Cepa 4(Superior) (Ch-7/Ch-4)	0.496	0.209	0.131	0.226	0.269
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-4/Ch-1)	1.641	2.565	2.551	3.154	1.846
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-7/Ch-16 o Ch-19)	0.800	0.569	0.144	0.254	0.525
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-1/Ch-16 o Ch-19)	0.983	1.061	0.430	0.344	1.056
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-9/Ch-6)	1.215	0.671	0.823	0.449	0.563
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-6/Ch-3)	1.407	1.476	1.791	4.000	1.833
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-9/Ch-18 o Ch-21)	1.895	0.810	0.832	0.922	0.600
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-3/Ch-18 o Ch-21)	1.108	0.817	0.564	0.513	0.582
Tablero Cepa 4 Borde Oriente/Tablero Cepa 4 Borde Poniente (Ch-14/Ch-8)	0.807	0.594	1.042	0.738	0.739
Promedio Tablero cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-14+Ch-8) /(2*Ch-5)	1.717	1.866	3.159	1.825	2.275
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-5/Ch-2)	1.124	1.139	1.090	1.277	1.176
Tablero Cepa 6/Campo Libre Valle (Ch-15/Ch-17 o Ch-20)	2.239	1.868	2.651	1.764	2.416
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-2/Ch-17 o Ch-20)	0.606	0.396	0.479	0.653	0.505

Tabla 8-8: Amplificación sísmica eventos del 05/12/2018 al 03/06/2019

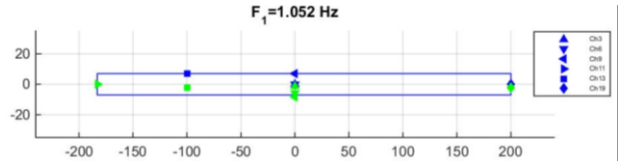
Registro	05/12/2018	19/01/2019	09/04/2019	20/05/2019	03/06/2019
Aceleración máxima del suelo (g)	0.124	0.033	0.013	0.013	0.091
Aceleración Máxima de la superestructura	0.574	0.058	0.034	0.068	0.240
Tablero Estribo Sur/Base Estribo Sur (Ch-12/Ch-10)	0.237	0.447	0.812	0.838	0.536
Tablero Estribo Norte/Base Estribo Norte (Ch-18/Ch-16)	-	-	-	-	-
Tablero Cepa 4/Cepa 4(Superior) (Ch-7/Ch-4)	0.213	0.227	0.286	0.731	0.182
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-4/Ch-1)	1.591	2.365	1.960	2.663	2.082
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-7/Ch-16 o Ch-19)	0.355	0.483	0.441	1.920	0.140
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-1/Ch-16 o Ch-19)	1.048	0.900	0.787	0.987	0.371
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-9/Ch-6)	1.120	0.527	0.420	0.402	0.731
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-6/Ch-3)	1.587	1.798	2.419	2.402	1.639
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-9/Ch-18 o Ch-21)	1.268	0.957	0.851	0.689	0.659
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-3/Ch-18 o Ch-21)	0.713	1.010	0.838	0.713	0.550
Tablero Cepa 4 Borde Oriente/Tablero Cepa 4 Borde Poniente (Ch-14/Ch-8)	0.938	0.842	1.135	0.364	0.805
Promedio Tablero cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-14+Ch-8) /(2*Ch-5)	1.382	1.721	3.956	6.575	1.491
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-5/Ch-2)	1.029	1.222	1.360	1.178	1.459
Tablero Cepa 6/Campo Libre Valle (Ch-15/Ch-17 o Ch-20)	2.244	1.038	5.231	13.817	1.568
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-2/Ch-17 o Ch-20)	0.603	0.301	0.385	0.918	0.343

Formas modales viaducto El Salto

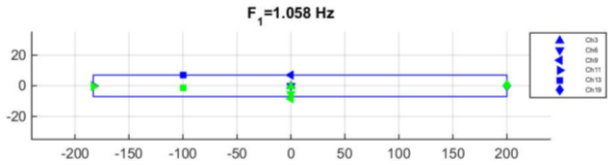
$I_a=0.065$ [cm/s]



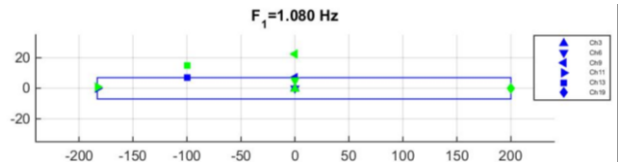
$I_a=0.17$ [cm/s]



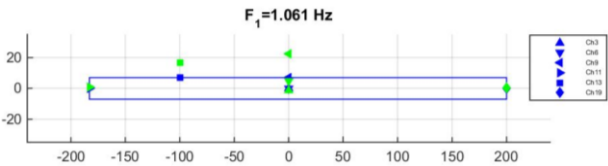
$I_a=0.179$ [cm/s]



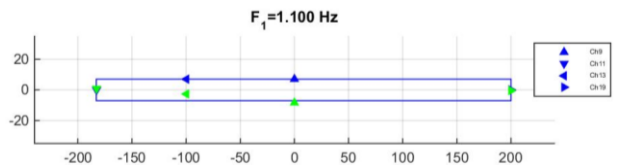
$I_a=0.382$ [cm/s]



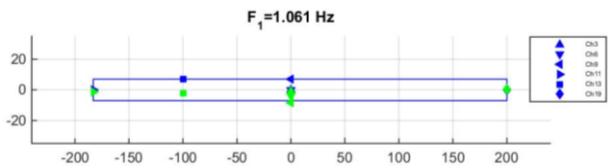
$I_a=1.653$ [cm/s]



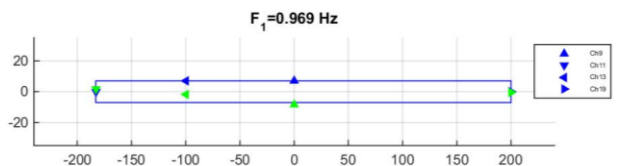
$I_a=3.919$ [cm/s]



$I_a=5.028$ [cm/s]



$I_a=14.122$ [cm/s]



$I_a=917.733$ [cm/s]

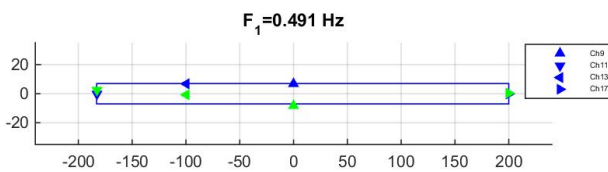
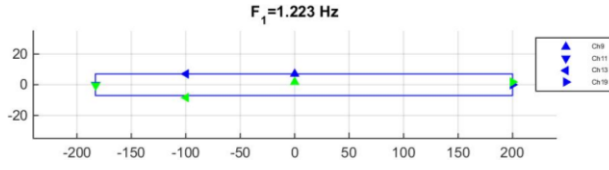
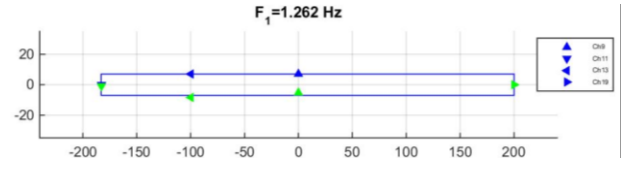


Figura 8-77: Formas modales frecuencia 1.035 [Hz]

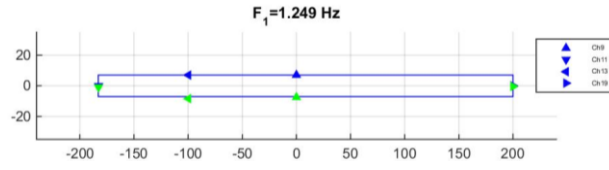
$I_a=0.065$ [cm/s]



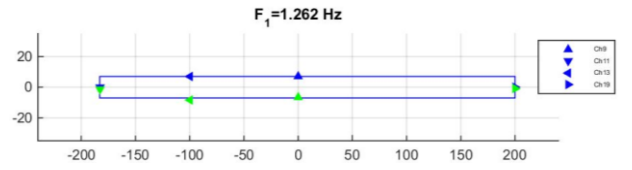
$I_a=0.17$ [cm/s]



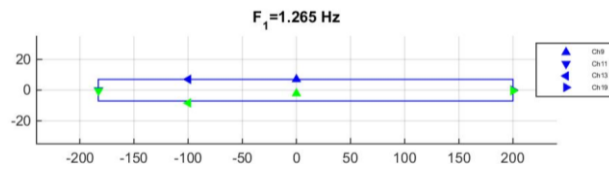
$I_a=0.179$ [cm/s]



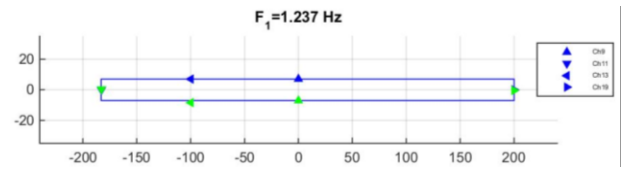
$I_a=0.231$ [cm/s]



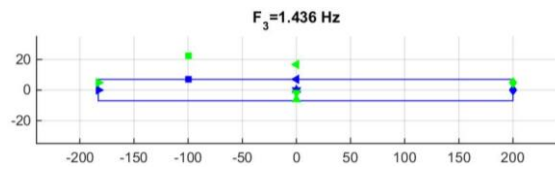
$I_a=0.382$ [cm/s]



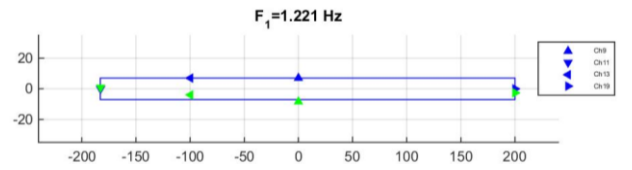
$I_a=1.653$ [cm/s]



$I_a=3.919$ [cm/s]



$I_a=5.028$ [cm/s]



$I_a=917.733$ [cm/s]

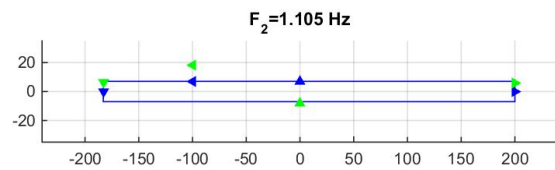
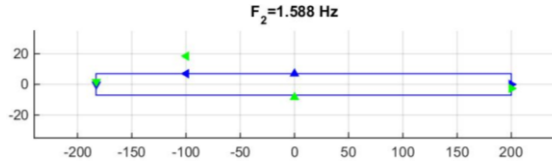
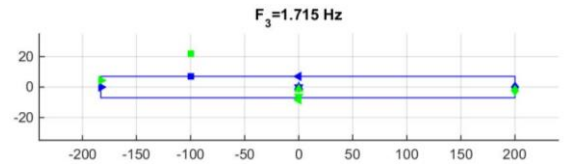


Figura 8-78: Formas modales frecuencia 1.195 [Hz]

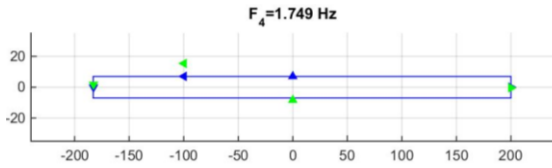
$I_a = 0.065$ [cm/s]



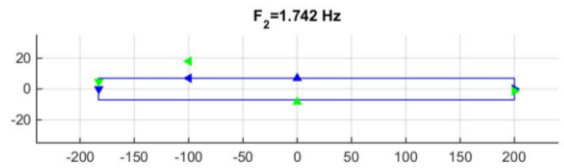
$I_a = 0.17$ [cm/s]



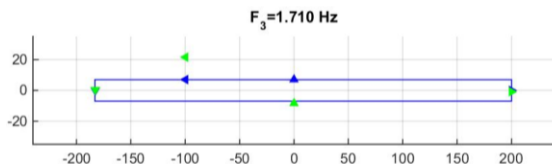
$I_a = 0.179$ [cm/s]



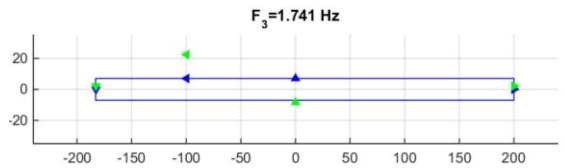
$I_a = 0.231$ [cm/s]



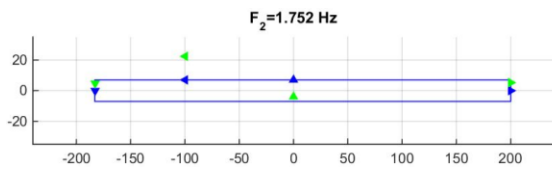
$I_a = 0.382$ [cm/s]



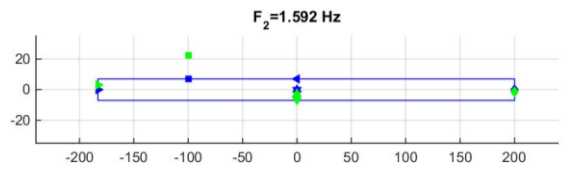
$I_a = 1.653$ [cm/s]



$I_a = 3.919$ [cm/s]



$I_a = 5.028$ [cm/s]



$I_a = 14.122$ [cm/s]

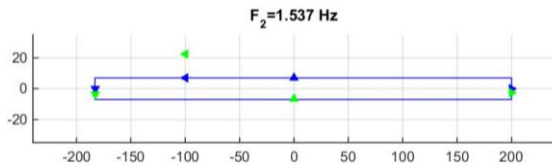
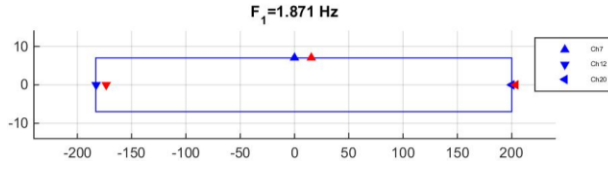
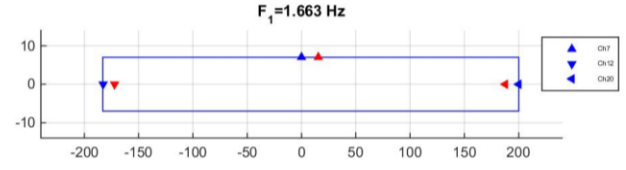


Figura 8-79: Formas modales frecuencia 1.625 [Hz]

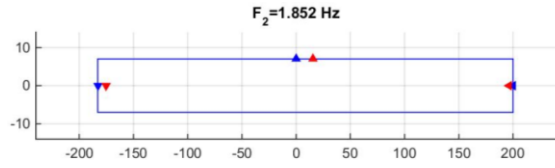
$I_a = 0.065$ [cm/s]



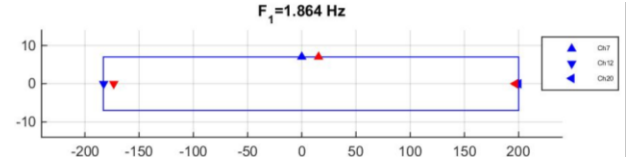
$I_a = 0.17$ [cm/s]



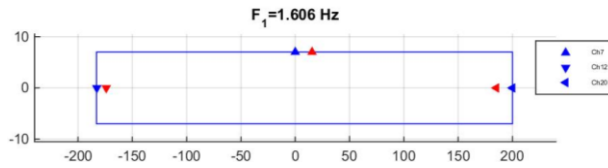
$I_a = 0.179$ [cm/s]



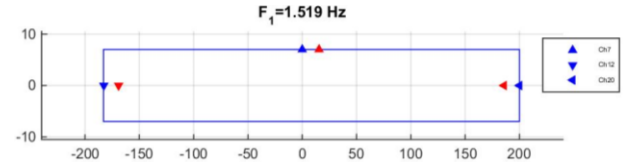
$I_a = 0.231$ [cm/s]



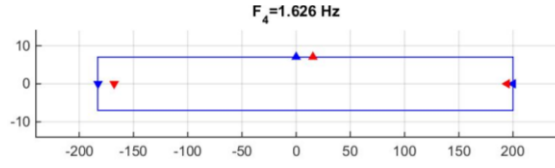
$I_a = 0.382$ [cm/s]



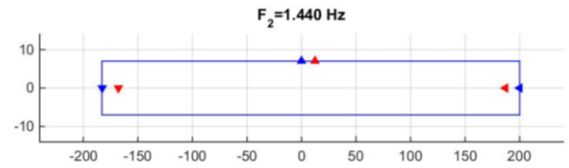
$I_a = 1.653$ [cm/s]



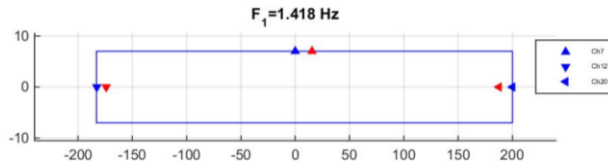
$I_a = 3.919$ [cm/s]



$I_a = 5.028$ [cm/s]



$I_a = 14.122$ [cm/s]



$I_a = 917.733$ [cm/s]

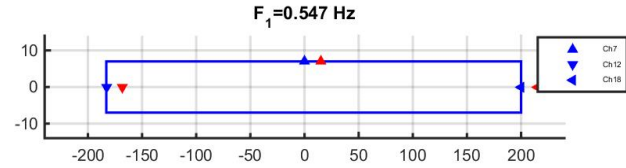
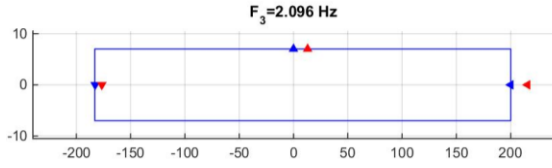
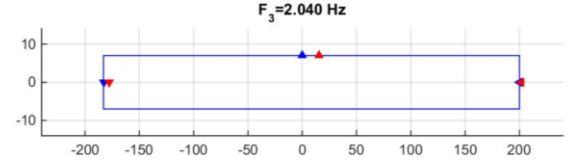


Figura 8-80: Formas modales frecuencia 2.051 [Hz]

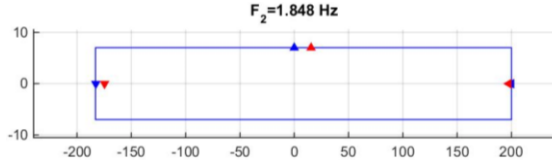
$I_a=0.065$ [cm/s]



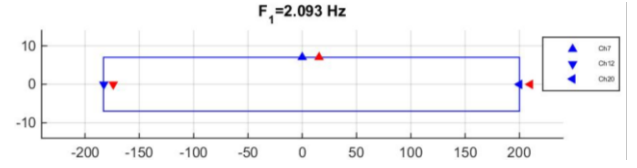
$I_a=0.17$ [cm/s]



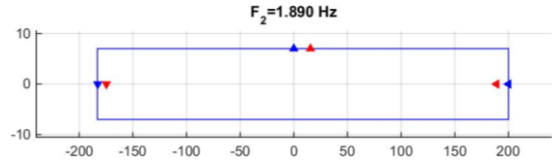
$I_a=0.179$ [cm/s]



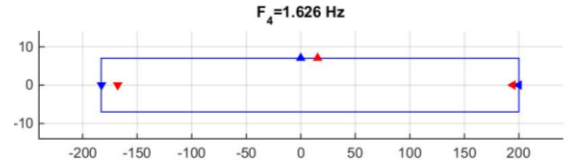
$I_a=0.382$ [cm/s]



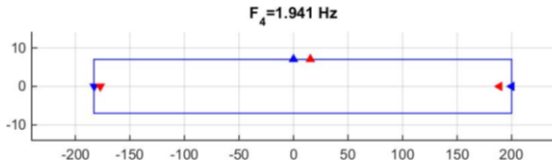
$I_a=1.653$ [cm/s]



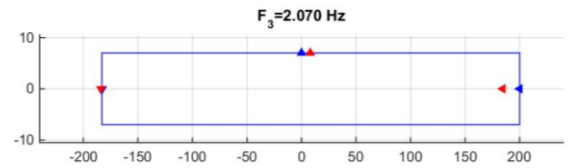
$I_a=3.919$ [cm/s]



$I_a=5.028$ [cm/s]



$I_a=14.122$ [cm/s]



$I_a=917.733$ [cm/s]

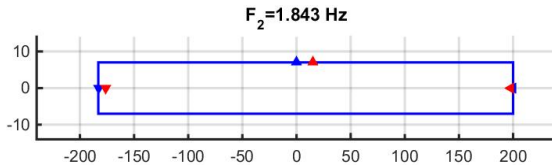


Figura 8-81: Formas modales frecuencia 2.151 [Hz]

Anexo D

A modo de ejemplo de los resultados que genera la plataforma, en el presente sub anexo se entrega un informe correspondiente al análisis del terremoto del Maule del 27 de febrero del 2010, informe que contiene todos los análisis que puede procesar la plataforma, a excepción del segundo caso general del método de identificación DSI.

VIADUCTO EL SALTO



20 de agosto de 2019

Índice

1. Instrumentación	1
2. Resumen de Registros durante 27-02-2010 al 27-02-2010	5
3. Resumen de Respuestas Máximas Medidas	6
4. Resumen de Resultados Evento del 27-02-2010	8
4.1. Resumen de Registros Sísmicos	8
4.2. Resumen de Espectros Elásticos	10
4.3. Resumen de Espectros de Potencias	12
4.4. Resumen de Espectrogramas	16
4.5. Resumen Funciones de transferencia en pequeñas ventanas	19
4.6. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)	23
4.7. Resumen DSI en pequeñas ventanas	32
5. Referencias	36

VIADUCTO EL SALTO

Reporte de registros entre 27-02-2010 al 27-02-2010

La Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (RENADIC) ha instalado un sistema para registrar movimientos sísmicos del viaducto El Salto (Ex. Marga-Marga) localizado en la Vía Las Palmas en la comuna de Viña del Mar (LAT 33.048S LONG 71.509 W). El sistema de monitoreo sísmico se constituye por 24 acelerómetros marca Kinematics ubicados en diversas posiciones de la estructura (según detalla la Figura 2) conectados a 3 estaciones de monitoreo, las cuales registran y almacenan la respuesta sísmica del Viaducto cuando la aceleración de alguno de los canales supera 0.01 [g] (ó 1 [m/seg²]).

Este reporte presenta los eventos registrados por el sistema durante el periodo comprendido entre el 27-02-2010 al 27-02-2010, los datos recopilados son utilizados para diversos estudios entre los cuales está evaluar el estado estructural del Viaducto y llevar a cabo análisis detallados de la respuesta sísmica de puentes emplazados en una zona de alta demanda sísmica (Zona III). En particular las cepas (2, 3, 4, 5 y 6) del Viaducto El Salto se encuentran emplazadas sobre un suelo de naturaleza arenosa, mientras que sus estribos se apoyan sobre roca, bajo esta configuración se ha observado que el movimiento sísmico en los estribos es significativamente distinto al movimiento observado en la cepas (lo cual se deduce a partir de los resultados medidos al pie de la cepa 4), esto debido al efecto de amplificación de suelo que se da en la zona.

Durante el período analizado (27-02-2010 al 27-02-2010) se registraron 1 eventos sensibles resumidos en la tabla 5. En esta tabla se indica la fecha de ocurrencia del evento sísmico y las características principales reportadas por el Centro Sismológico Nacional (Magnitud, Profundidad, epicentro, etc). Mayor información relacionada a cada evento sísmico puede ser revisada en mayor detalle en la página web del CSN (www.sismologia.cl).

La revisión preliminar de los eventos, revela que el evento de Magnitud Mw= 8.8 del 27-02-2010 generó aceleraciones máximas en la superestructura iguales a 0.317 [g] (NS) y 1.976 [g] (EO), mientras que la estación ubicada al pie de la cepa 4 en campo libre registró máximos iguales a 0.353 [g] (NS) y 0.338 [g] (EO), además los equipos ubicados en la parte superior de la cepa 4, registraron valores máximos iguales a 0.282 [g] (NS) y 0.640 [g] (EO), durante el periodo considerado en este informe. Aceleraciones que se encuentra dentro de los niveles esperados para un evento de esas características.

1. Instrumentación

El viaducto El Salto (Ex. Marga-Marga) se encuentra instrumentado con 24 acelerómetros del tipo fuerza balanceada marca Kinematics, modelos FBA-11 y FBA-23 con un rango

dinámico de 135 [dB] para frecuencias entre 0.01-50 [Hz] y rango dinámico de 145 [dB] para frecuencias entre 0.01-20 [Hz], respectivamente. La mayoría de los canales consta con un ancho de banda DC a 200 [Hz], a excepción de los sensores ubicados en el pozo del estribo sur, los cuales tienen un ancho de banda de 100 [Hz]. Los equipos se encuentran configurados para medir entre un rango de ± 2 [g] y registran la respuesta sísmica cuando alguno de los sensores sobrepasa el umbral de 0.01 [g].

Los acelerómetros se conectan a 3 estaciones de monitoreo que registran en forma independiente, estando la estación Mt. Whitney (Tabla 2) y estación ETNA (Tabla 3) funcionando sincronizadas en red, mientras que la estación QDR 754 (Tabla 4) se encuentra desconectada de la red local. Originalmente el canal 15 captaba registros en la dirección transversal al tablero, pero una modificación realizada el año 2003 modificó la orientación del sensor pasando a registrar señales en la dirección vertical al tablero.

Tabla 1: Característica de los acelerómetros Kinematics

Canal	fn [Hz]	β	sensibilidad (VDC/g)
1	51.0	0.70	1.250
2	50.5	0.70	1.250
3	52.4	0.70	1.258
4	51.0	0.70	1.252
5	50.3	0.70	1.254
6	50.5	0.70	1.255
7	54.3	0.70	1.254
8	52.6	0.70	1.250
9	51.8	0.70	1.254
10	51.3	0.70	1.256
11	52.1	0.70	1.253
12	51.0	0.70	1.254
13	50.3	0.70	1.251
14	52.1	0.70	1.253
15	208.3	0.70	1.251
16	50.5	0.70	1.247
17	50.5	0.70	1.252
18	54.3	0.70	1.254
ETNA 1	51.5	0.70	1.249
ETNA 2	52.1	0.70	1.252
ETNA 3	53.5	0.70	1.254
QDR 1	25.6	0.70	1.250
QDR 2	25.6	0.70	1.250
QDR 3	25.6	0.70	1.250

Tabla 2: Localización de equipos Estación MT. WHITNEY

CANAL	TIPO DE SENSOR	UBICACIÓN	N DE SERIE
1	FBA-23	Pie Cepa 4: Norte-Sur	46305
2	FBA-23	Pie Cepa 4: Vertical	46306
3	FBA-23	Pie Cepa 4: Este-Oeste	46307
4	FBA-23	Superior Cepa 4: Norte-Sur	46174
5	FBA-23	Superior Cepa 4: Vertical	46175
6	FBA-23	Superior Cepa 4: Este-Oeste	46176
7	FBA-23	Tablero Cepa 4 borde poniente: Norte-Sur	46116
8	FBA-23	Tablero Cepa 4 borde poniente: Vertical	46117
9	FBA-23	Tablero Cepa 4 borde poniente: Este-Oeste	46118
10	FBA-11	Base Estribo Sur:Norte-Sur	47277
11	FBA-11	Estribo Sur: Este-Oeste	46618
12	FBA-11	Estribo Sur: Norte-Sur	46620
13	FBA-11	Tablero Cepa 2: Este-Oeste	47275
14	FBA-11	Tablero Cepa 4 borde oriente: Vertical	46616
15	EPI	Tablero Cepa 6: Este-Oeste/Vertical (Julio 2003)	879
16	FBA-11	Base Estribo Norte: Norte-Sur	46617
17	FBA-11	Estribo Norte: Este-Oeste	46615
18	FBA-11	Estribo Norte: Norte-Sur	46619

Tabla 3: Localización de equipos Estación ETNA

CANAL	TIPO DE SENSOR	UBICACIÓN	N DE SERIE
1	FBA-23	Campo Libre Valle: Norte-Sur	46213
2	FBA-23	Campo Libre Valle: Vertical	46214
3	FBA-23	Campo Libre Valle: Este-Oeste	46215

Tabla 4: Localización de equipos Estación QDR 754

CANAL	TIPO DE SENSOR	UBICACIÓN
1	QDR	Campo Libre Estribo Sur: Este-Oeste
2	QDR	Campo Libre Estribo Sur: Norte-Sur
3	QDR	Campo Libre Estribo Sur: Vertical

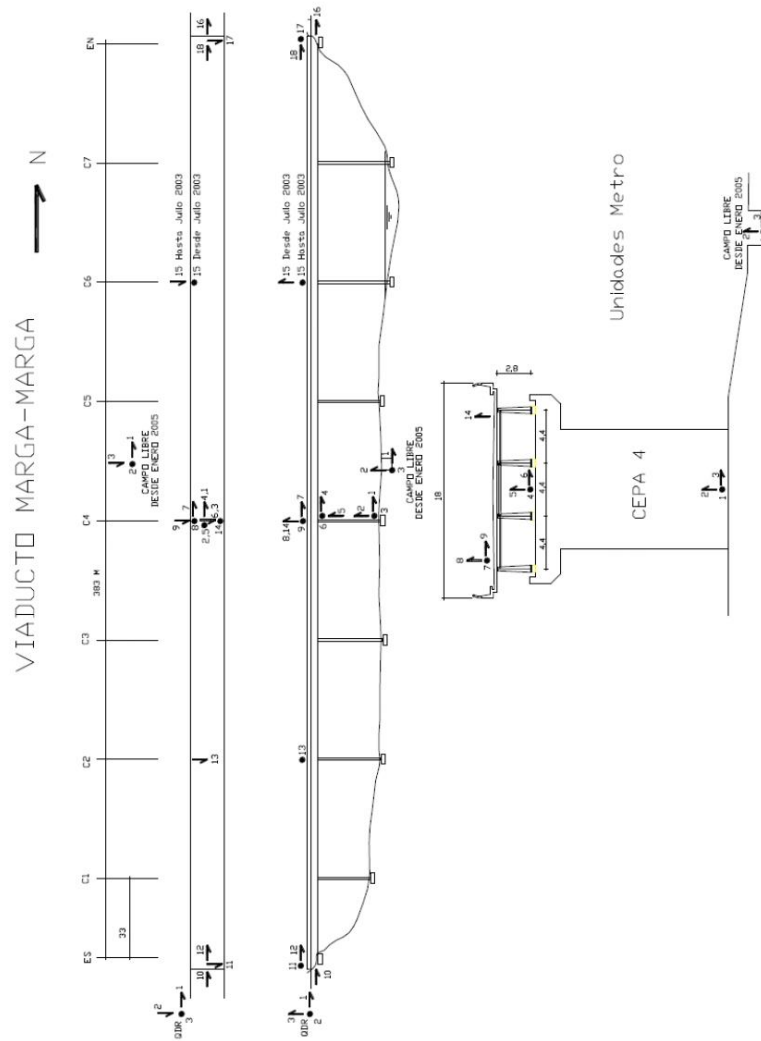


Figura 2: Ubicación de sensores

2. Resumen de Registros durante 27-02-2010 al 27-02-2010

Durante el periodo de estudio, se registran los eventos indicados en la tabla presentada a continuación, a estos eventos se les calcula la intensidad de Arias y Potencial destructivo, tomando en cuenta la suma de las componentes horizontales de los sensores ubicados en el campo libre al pie de la cepa. Asimismo, se calcula el PGA con el valor máximo entre las componentes horizontales de los equipos en campo libre.

Tabla 5: Características de Eventos sísmicos registrados

Fecha	Hora	M_w	Prof [km]	Lat	Lon	D_{epi} [km]	PGA [g]	I_a [cm/seg]	P_d [cm · seg]
27-02-2010	03:35:20	8.8	30.0	-36.170	-73.140	534.4	0.353	917.733	11.465

A modo de complemento, se entregan las fórmulas de intensidad de Arias y potencial destructivo.

1. Intensidad de Arias

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_{t_0}^{t_0+D} a(t)^2 \cdot dt \quad (1)$$

Donde:

- g: Aceleración de gravedad.
- t_0 : Tiempo inicial del registro de aceleraciones.
- D: Duración del registro de aceleraciones.
- a(t): Registro de aceleraciones.

2. Potencial destructivo

$$P_d = \frac{I_a}{v_0^2} \quad (2)$$

Donde:

- I_a : Intensidad de Arias.
- v_0 : Intensidad de cruces por cero.

3. Resumen de Respuestas Máximas Medidas

Se procesan los registros de los eventos mediante un filtro del tipo "Butterworth" de orden 8, entre un rango de frecuencias de 0 y 30 Hz, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 6: Aceleraciones máximas Evento del 27-02-2010 a las 03:35:20

Canal	Localización	Sentido	Amax(cm/seg^2)	Vmax(cm/s)	Dmax(cm)
1	Pie Cepa 4	NS	339.837	34.786	5.151
2	Pie Cepa 4	V	154.579	10.448	1.480
3	Pie Cepa 4	EW	367.174	42.100	6.208
4	Superior Cepa 4	NS	557.840	73.060	9.162
5	Superior Cepa 4	V	173.697	10.800	1.482
6	Superior Cepa 4	EW	516.556	48.796	6.052
7	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	NS	276.521	8.869	1.339
8	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	V	330.131	13.266	1.552
9	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	EW	627.814	33.099	3.816
10	Base Estribo Sur	NS	1030.346	48.351	3.340
11	Tablero Estribo Sur	EW	1936.469	47.384	4.352
12	Tablero Estribo Sur	NS	310.819	11.170	1.187
13	Tablero Cepa 2	EW	623.218	32.897	2.868
14	Tablero Cepa 4 Borde Oriente	V	266.322	14.287	1.641
15	Tablero Cepa 6	EW/V	571.360	15.975	1.233
16	Base Estribo Norte	NS	402.657	16.166	1.650
17	Tablero Estribo Norte	EW	1357.572	28.963	1.826
18	Tablero Estribo Norte	NS	266.423	8.828	1.293
19	Campo Libre valle	NS	345.693	36.313	4.971
20	Campo Libre valle	V	255.145	9.600	0.963
21	Campo Libre valle	EW	331.339	39.291	5.824

A partir de los datos mostrados en la tabla anterior, se utilizan las aceleraciones máximas de cada canal, con el fin de calcular las amplificaciones de registro entregadas en la tabla a continuación.

Tabla 7: Amplificaciones de registros, Evento del 27-02-2010 a las 03:35:20

Registro	Coficiente
Aceleración máxima del suelo (g)	0.353
Aceleración máxima en los canales ubicados en el tablero (g)	1.976
Longitudinal	
Tablero Estribo Sur/Base Estribo Sur (Ch-12/Ch-10)	0.302
Tablero Estribo Norte/Base Estribo Norte (Ch-18/Ch-16)	0.662
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-7/Ch-4)	0.496
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-4/Ch-1)	1.641
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-7/Ch-19)	0.800
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-1/Ch-19)	0.983
Transversal	
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-9/Ch-6)	1.215
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-6/Ch-3)	1.407
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-9/Ch-21)	1.895
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-3/Ch-21)	1.108
Vertical	
Tablero Cepa 4 Borde Oriente/Tablero Cepa 4 Borde Poniente (Ch-14/Ch-8)	0.807
Promedio Tablero cepa 4/Cepa 4(Superior) (Ch-14+Ch-8)/2*Ch-5)	1.717
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-5/Ch-2)	1.124
Tablero Cepa 6/Campo Libre Valle (Ch-15/Ch-20)	2.239
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-2/Ch-20)	0.606

4. Resumen de Resultados Evento del 27-02-2010

4.1. Resumen de Registros Sísmicos

Evento del 27-02-2010, canales 1-10.

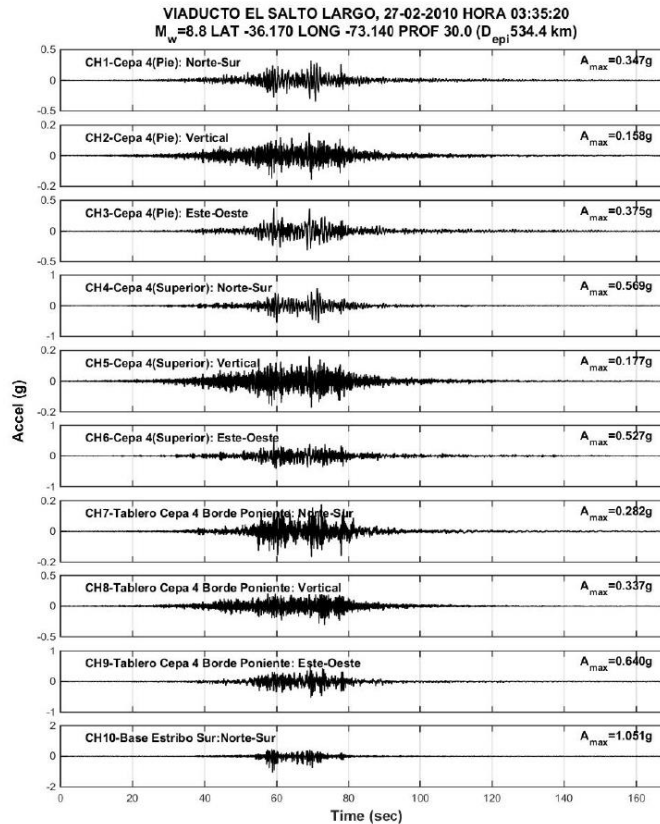


Figura 3: Registros del 27-02-2010

Evento del 27-02-2010, Canales 11-21.

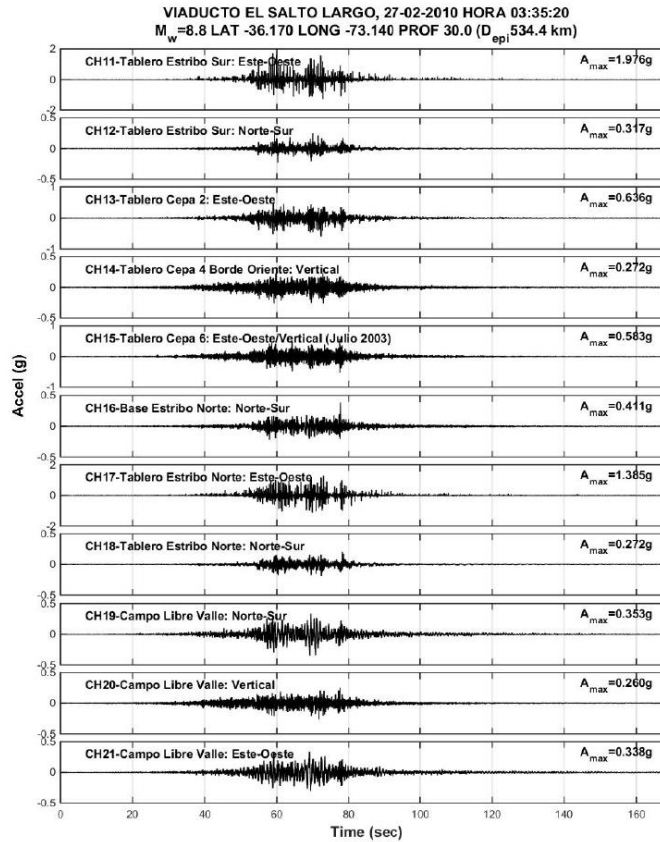


Figura 4: Registros del 27-02-2010

4.2. Resumen de Espectros Elásticos

Espectros elásticos de respuesta del evento del 27-02-2010, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5%, canales 1-10.

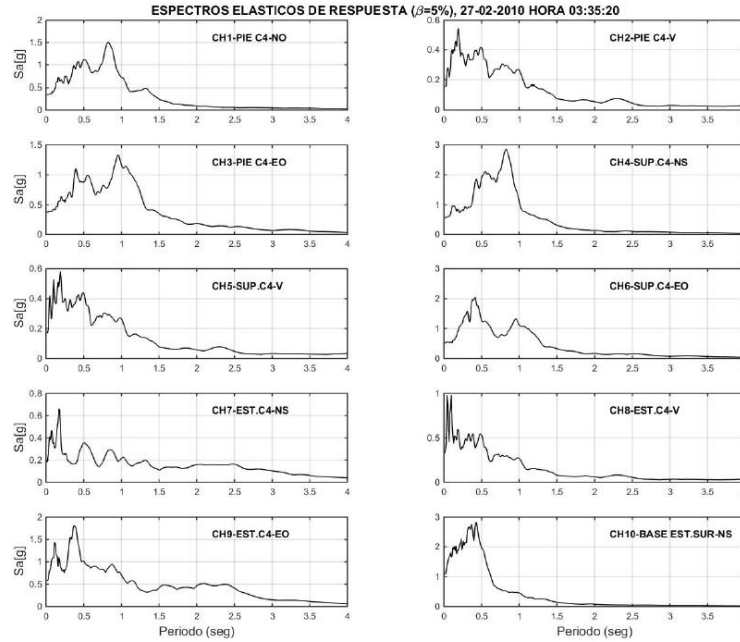


Figura 5: Espectro elástico asociado al evento del 27-02-2010

Espectros elásticos de respuesta del evento del 27-02-2010, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5%, canales 11-21.

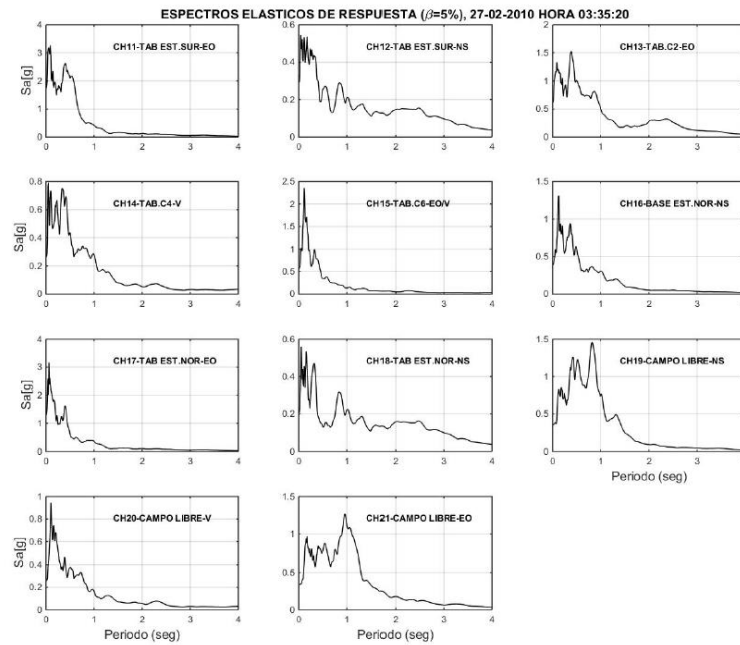


Figura 6: Espectro elástico asociado al evento del 27-02-2010

4.3. Resumen de Espectros de Potencias

Los espectros de Potencia Longitudinales (PSD) del evento del 27-02-2010, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

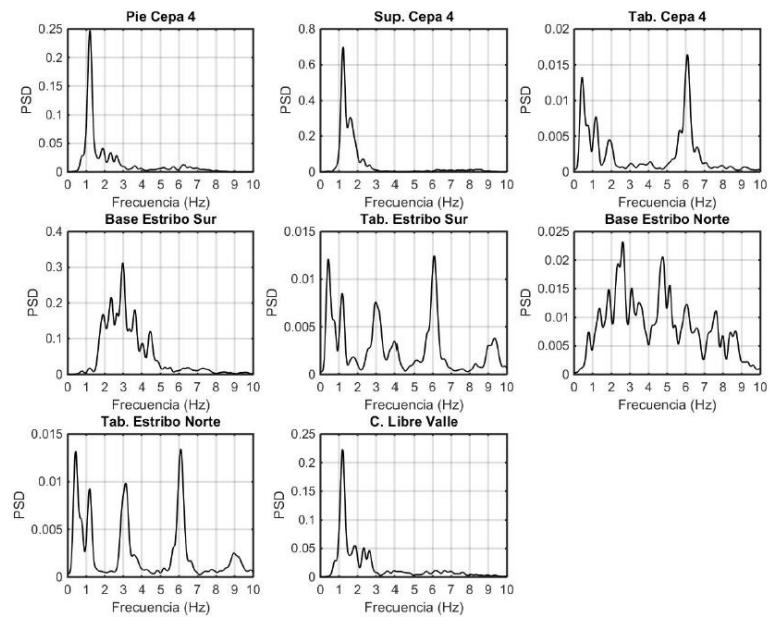


Figura 7: Espectro de Potencia asociado al evento del 27-02-2010(Longitudinal)

Las funciones de transferencia del evento del 27-02-2010, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg.

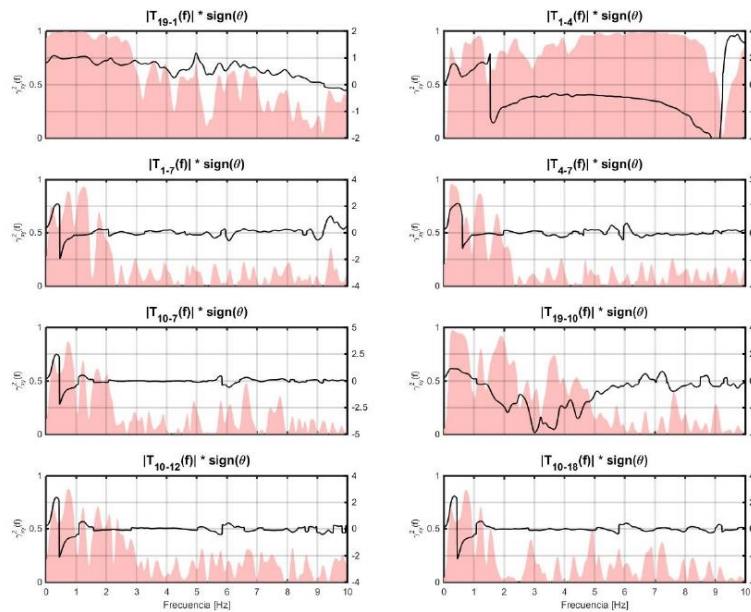


Figura 8: Función de Transferencia, Coherencia y Fase asociado al evento del 27-02-2010(Longitudinal)

Canales Longitudinales Analizados

- Canal 1:Pie Cepa 4.
- Canal 4:Superior Cepa 4.
- Canal 7:Tablero:Cepa 4 Borde Poniente.
- Canal 10:Base Estribo Sur.
- Canal 12:Estribo Sur.
- Canal 18:Estribo Norte.
- Canal 19:Campo Libre Valle.

Los espectros de Potencia Transversales (PSD) del evento del 27-02-2010, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

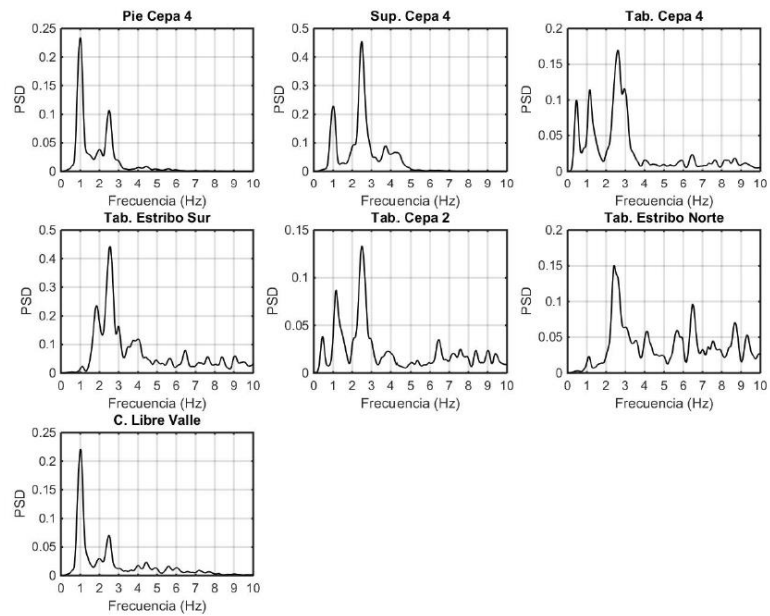


Figura 9: Espectro de Potencia asociado al evento del 27-02-2010(Transversal)

Las funciones de transferencia del evento del 27-02-2010, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg.

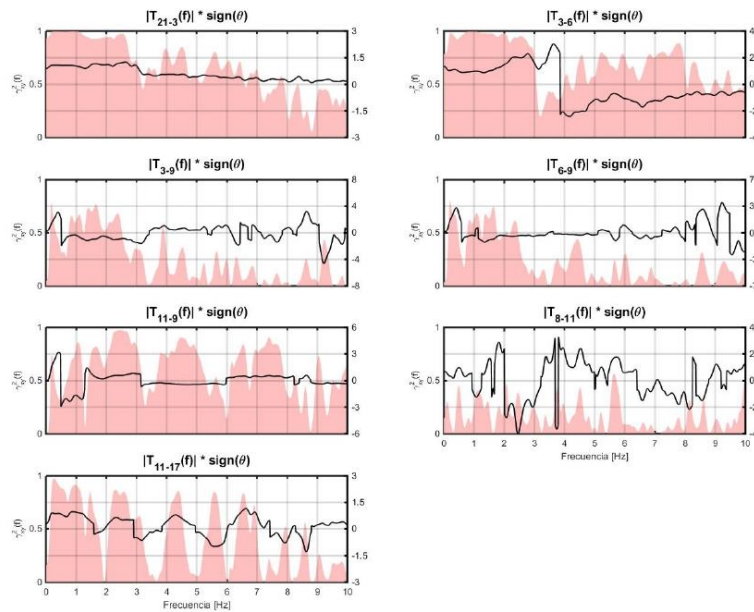


Figura 10: Función de Transferencia, Coherencia y Fase asociado al evento del 27-02-2010(Transversal)

Canales Transversales Analizados

- Canal 3:Pie Cepa 4.
- Canal 6:Superior Cepa 4.
- Canal 9:Tablero Cepa 4 Borde Poniente.
- Canal 11:Base Estribo Sur.
- Canal 17:Estribo Norte.
- Canal 21:Campo Libre Valle.

4.4. Resumen de Espectrogramas

Se calculan los espectros de densidad de potencia en pequeñas ventanas de tiempo del evento del 27-02-2010.

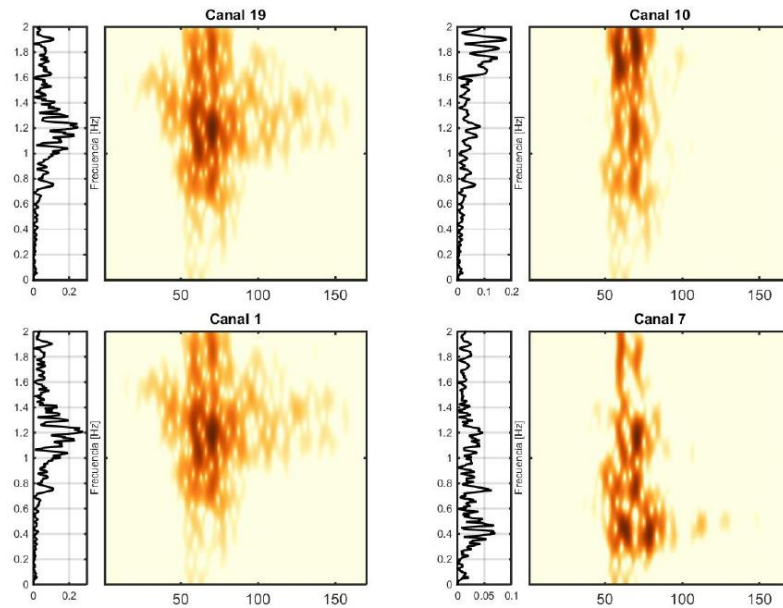


Figura 11: Espectrograma canales longitudinales asociados al evento del 27-02-2010

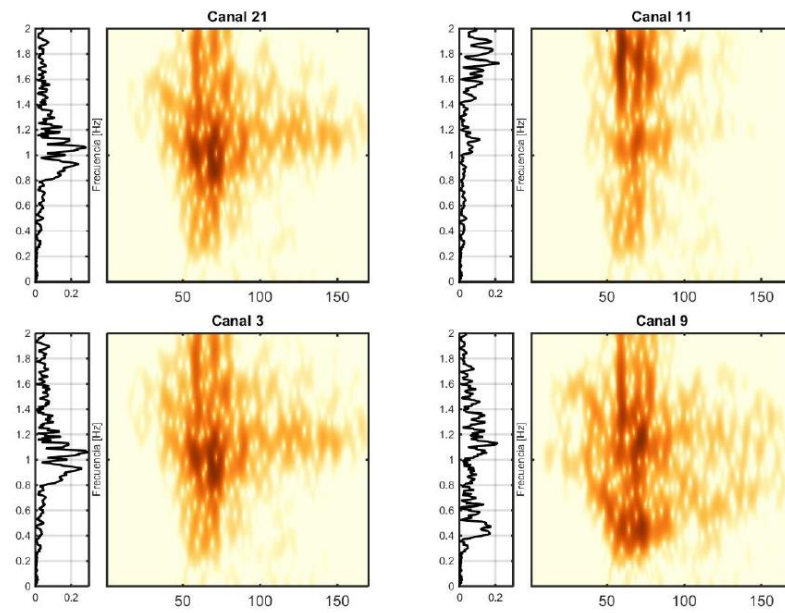


Figura 12: Espectrograma canales transversales asociados al evento del 27-02-2010

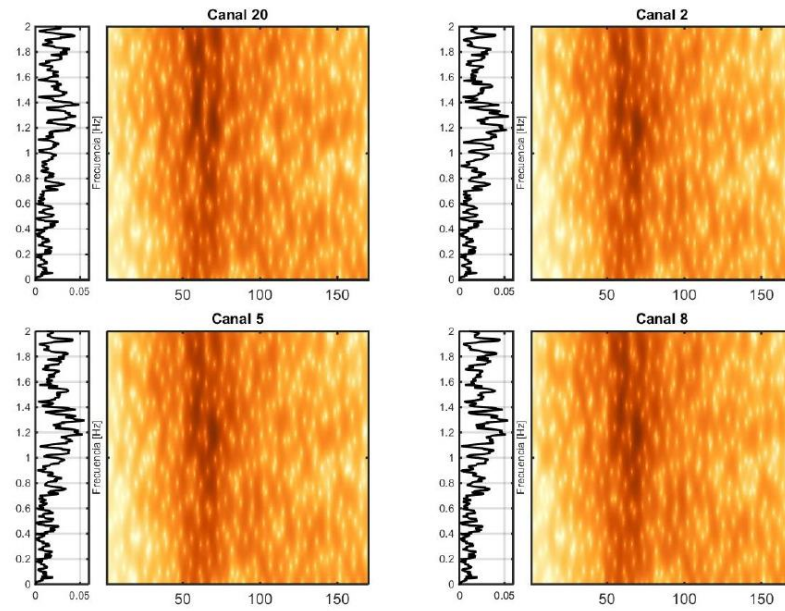


Figura 13: Espectrograma canales Verticales asociados al evento del 27-02-2010

4.5. Resumen Funciones de transferencia en pequeñas ventanas

Se calculan las funciones de transferencia en pequeñas ventanas de tiempo, mediante la relación espectro de densidad cruzada del canal de salida y entrada, y espectro de potencia del canal de salida. Los resultados corresponden a los obtenidos del evento del 27-02-2010.

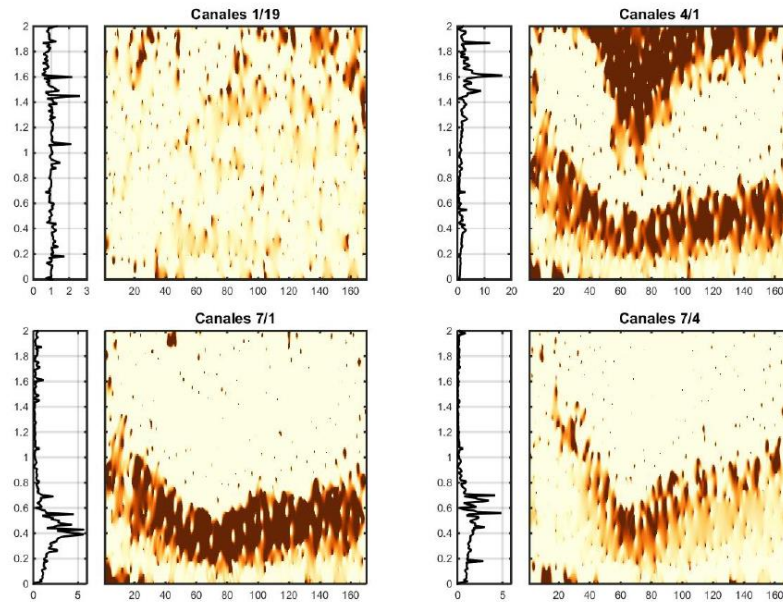


Figura 14: Función de Transferencia en ventanas de tiempo, asociada al evento del 27-02-2010

Canales Longitudinales Analizados

- Canal 1:Pie Cepa 4.
- Canal 4:Superior Cepa 4.
- Canal 7:Tablero:Cepa 4 Borde Poniente.
- Canal 10:Base Estribo Sur.
- Canal 12:Estribo Sur.
- Canal 18:Estribo Norte.
- Canal 19:Campo Libre Valle.

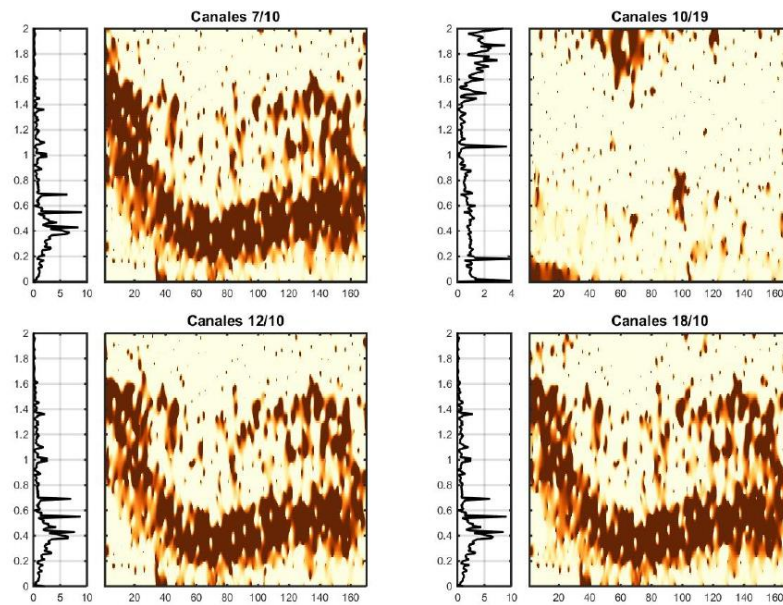


Figura 15: Función de Transferencia en ventanas de tiempo, asociada al evento del 27-02-2010

Canales Longitudinales Analizados

- Canal 1:Pie Cepa 4.
- Canal 4:Superior Cepa 4.
- Canal 7:Tablero:Cepa 4 Borde Poniente.
- Canal 10:Base Estribo Sur.
- Canal 12:Estribo Sur.
- Canal 18:Estribo Norte.
- Canal 19:Campo Libre Valle.

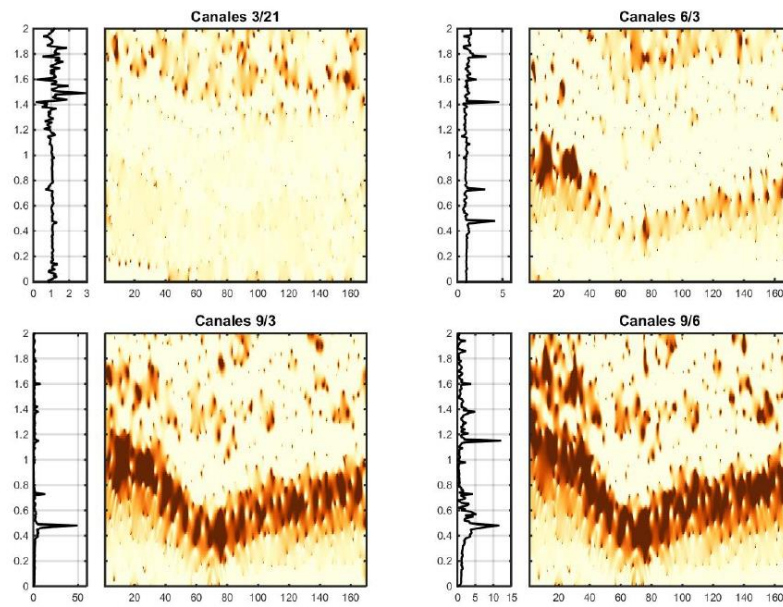


Figura 16: Función de Transferencia en ventanas de tiempo, asociada al evento del 27-02-2010

Canales Transversales Analizados

- Canal 3:Pie Cepa 4.
- Canal 6:Superior Cepa 4.
- Canal 9:Tablero Cepa 4 Borde Poniente.
- Canal 11:Base Estribo Sur.
- Canal 17:Estribo Norte.
- Canal 21:Campo Libre Valle.

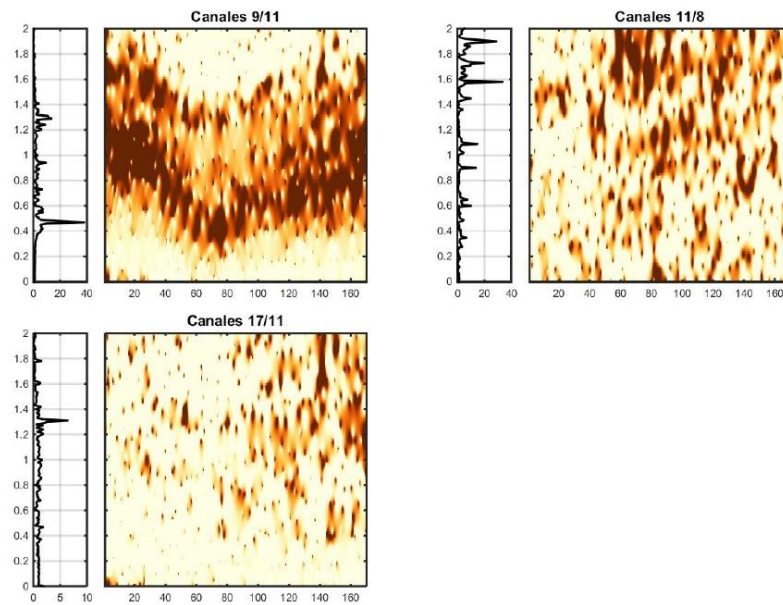


Figura 17: Función de Transferencia en ventanas de tiempo, asociada al evento del 27-02-2010

Canales Transversales Analizados

- Canal 3:Pie Cepa 4.
- Canal 6:Superior Cepa 4.
- Canal 9:Tablero Cepa 4 Borde Poniente.
- Canal 11:Base Estribo Sur.
- Canal 17:Estribo Norte.
- Canal 21:Campo Libre Valle.

4.6. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 7, 12 y 18 y como entradas los canales 4 (Combinación de canales que configura una respuesta longitudinal del puente).

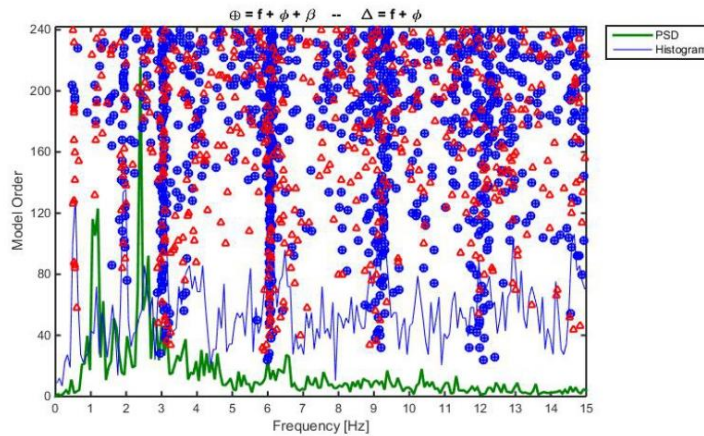


Figura 18: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 27-02-2010

Tabla 8: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
0.527	1.13	23.13	1.13	5
1.874	2.31	7.33	2.31	10
1.950	2.37	6.75	2.37	24
2.484	2.75	6.63	2.75	7
2.631	5.93	6.48	5.93	11
2.892	1.63	8.82	1.63	7
3.046	4.67	5.80	4.67	94
3.218	5.47	7.11	5.47	15

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

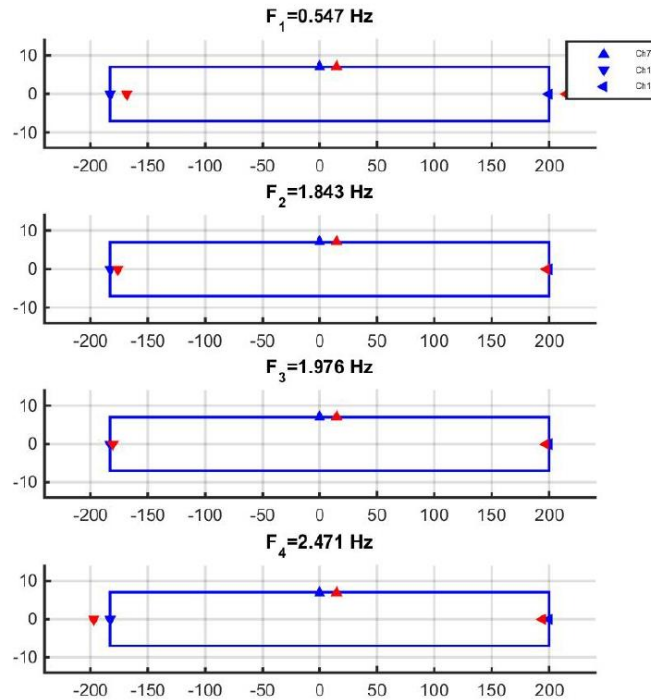


Figura 19: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 27-02-2010

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 7, 12 y 18 y como entradas los canales 4, 10 y 16 (Combinación de canales que configura una respuesta longitudinal del puente).

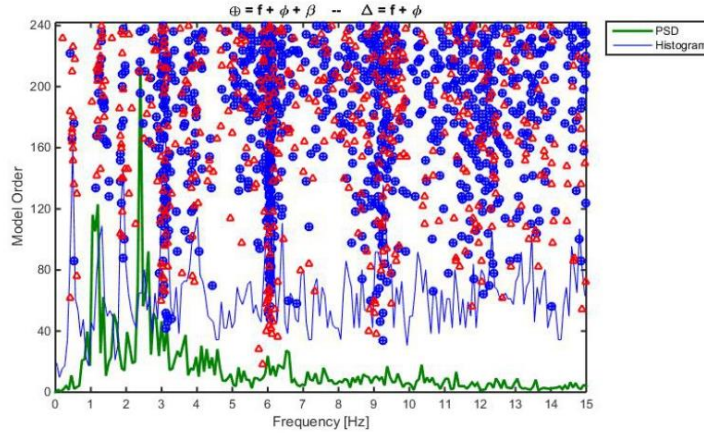


Figura 20: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 27-02-2010

Tabla 9: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
0.477	0.59	17.95	0.59	6
1.232	1.68	12.31	1.68	9
1.310	2.54	8.15	2.54	12
1.388	2.73	9.92	2.73	7
1.836	1.74	6.62	1.74	6
1.903	3.53	7.29	3.53	19
2.717	6.51	8.68	6.51	8
2.877	2.94	5.51	2.94	6

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

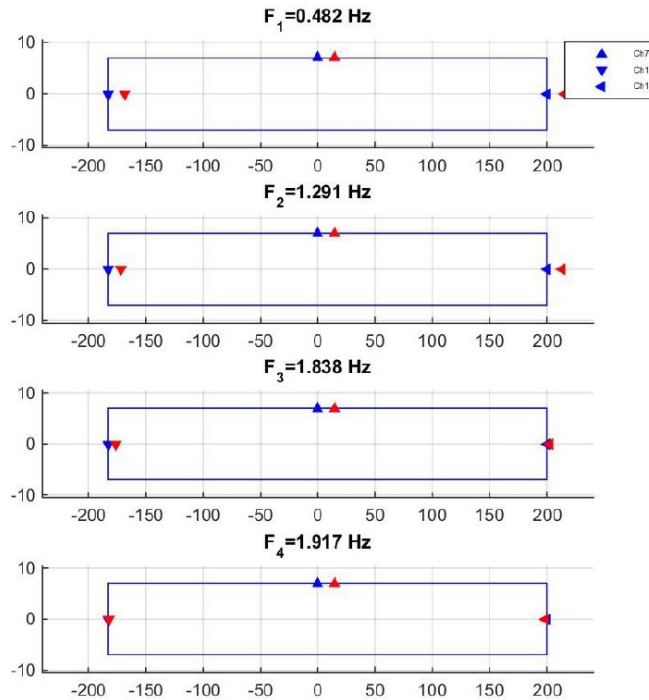


Figura 21: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 27-02-2010

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 3, 6, 9, 11, 13 y 17 y como entradas los canales 21 (Combinación de canales que configura una respuesta transversal del puente).

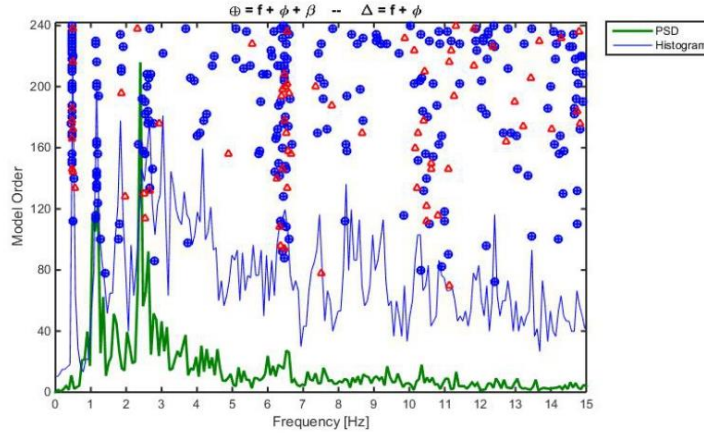


Figura 22: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 27-02-2010

Tabla 10: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
0.475	0.62	16.07	0.62	30
1.166	0.75	7.20	0.75	8
1.863	1.13	8.04	1.13	4
2.557	2.91	5.43	2.91	6
2.649	2.30	3.84	2.30	8
5.786	4.70	7.47	4.70	4
6.194	6.43	4.04	6.43	7
6.442	7.83	3.25	7.83	34

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

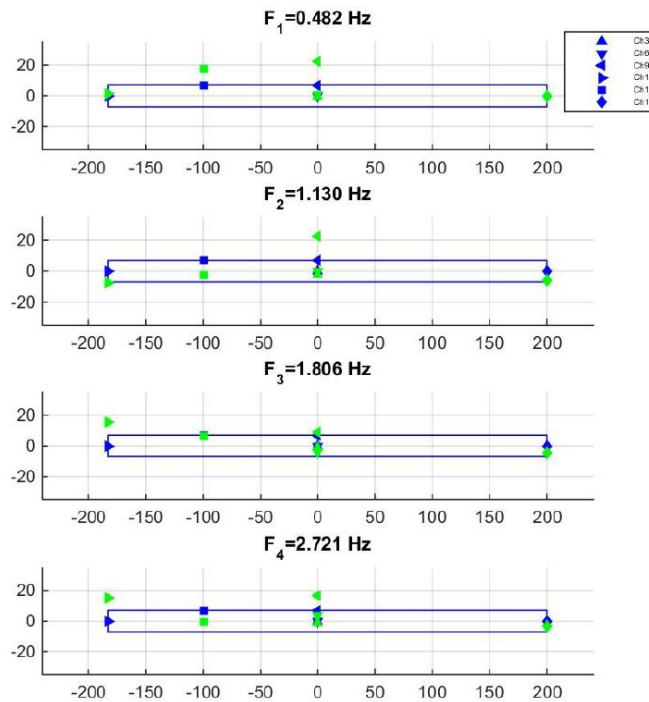


Figura 23: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 27-02-2010

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 9, 11, 13 y 17 y como entradas los canales 6 (Combinación de canales que configura una respuesta transversal del puente).

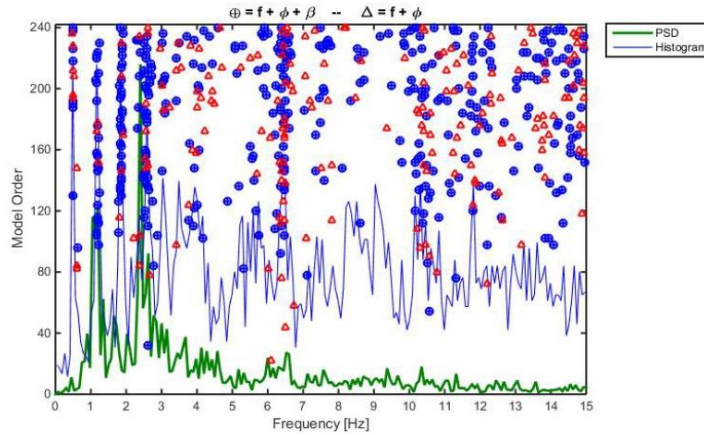


Figura 24: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 27-02-2010

Tabla 11: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
0.489	0.46	17.88	0.46	10
1.194	1.67	7.93	1.67	20
1.858	1.90	6.71	1.90	27
2.523	1.86	6.82	1.86	14
2.596	3.62	7.21	3.62	26
6.426	7.29	3.89	7.29	49
6.618	4.37	1.25	4.37	10
7.511	9.22	3.48	9.22	11

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

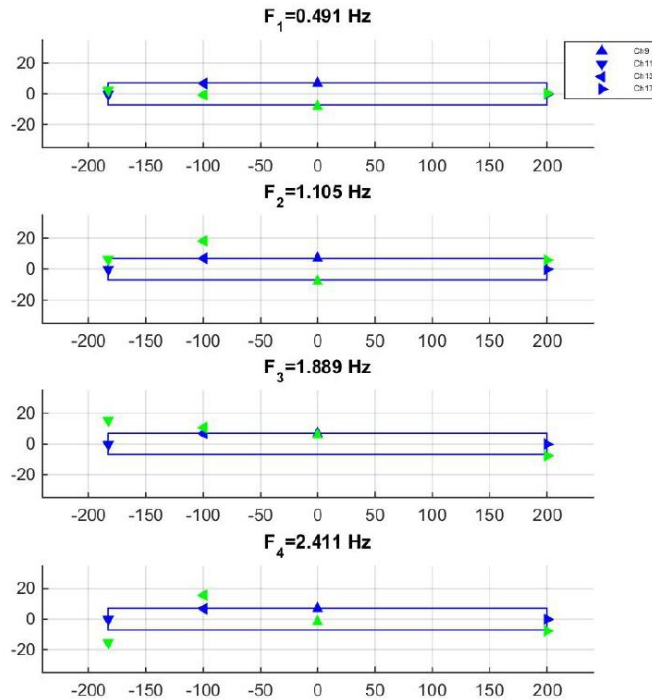


Figura 25: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 27-02-2010

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 7, 9, 11, 12, 13, 17 y 18 y como entradas los canales 4, 6, 10 y 16 (Combinación de canales que configura una respuesta longitudinal del puente).

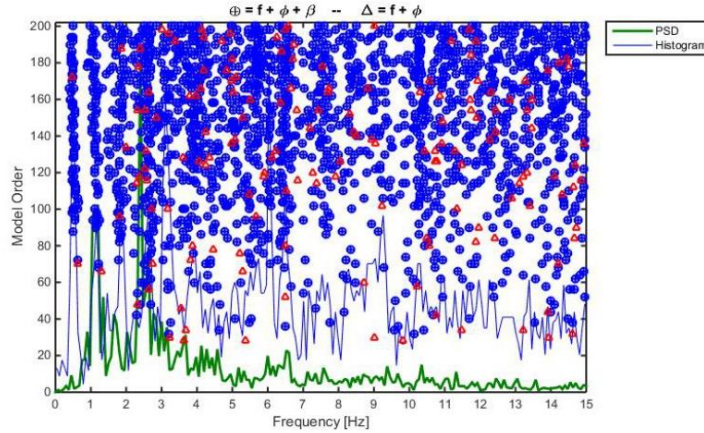


Figura 26: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 27-02-2010

Tabla 12: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
0.445	0.62	17.27	0.62	8
0.502	0.83	13.94	0.83	12
1.084	2.07	10.06	2.07	14
1.146	1.66	10.06	1.66	18
1.204	1.35	11.79	1.35	9
1.715	2.68	11.66	2.68	8
1.816	2.87	8.37	2.87	20
1.909	2.76	7.09	2.76	15

4.7. Resumen DSI en pequeñas ventanas

La identificación es realizada con el método DSI, en pequeñas ventanas (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 7, 12 y 18 y como entradas los canales 4.

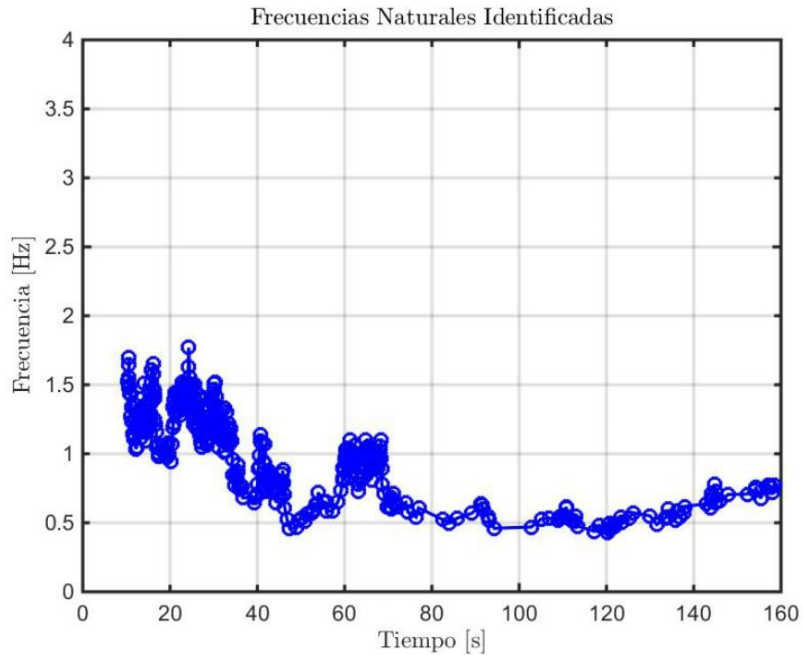


Figura 27: Frecuencia y amortiguamiento identificado durante el evento del 27-02-2010

La identificación es realizada con el método DSI, en pequeñas ventanas (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 7, 12 y 18 y como entradas los canales 4, 10 y 16.

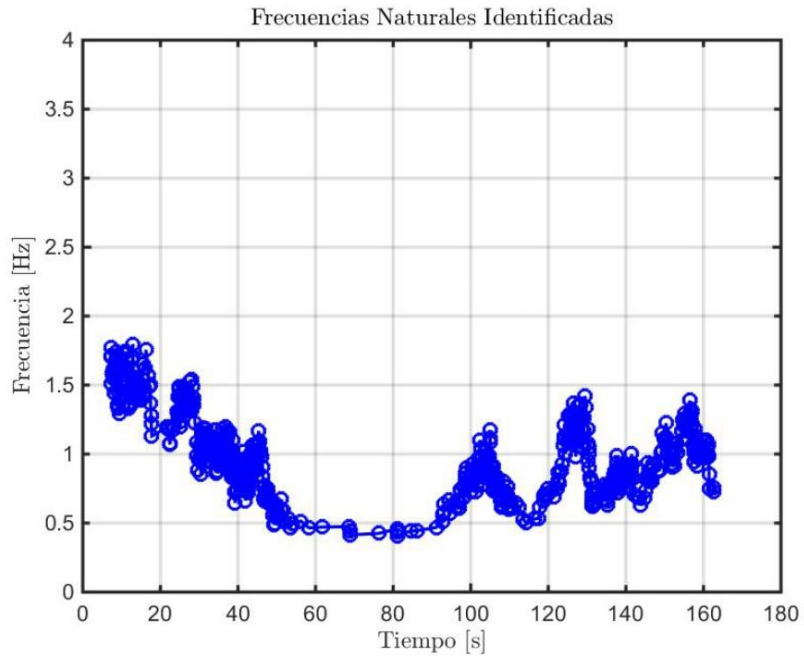


Figura 28: Frecuencia y amortiguamiento identificado durante el evento del 27-02-2010

La identificación es realizada con el método DSI, en pequeñas ventanas (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 3, 6, 9, 11, 13 y 17 y como entradas los canales 21.

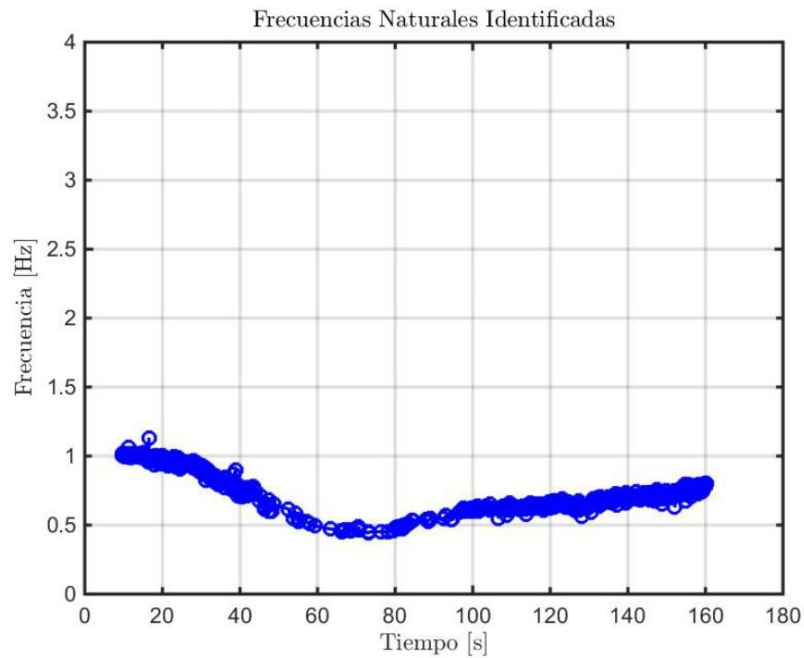


Figura 29: Frecuencia y amortiguamiento identificado durante el evento del 27-02-2010

La identificación es realizada con el método DSI, en pequeñas ventanas (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 9, 11, 13 y 17 y como entradas los canales 6.

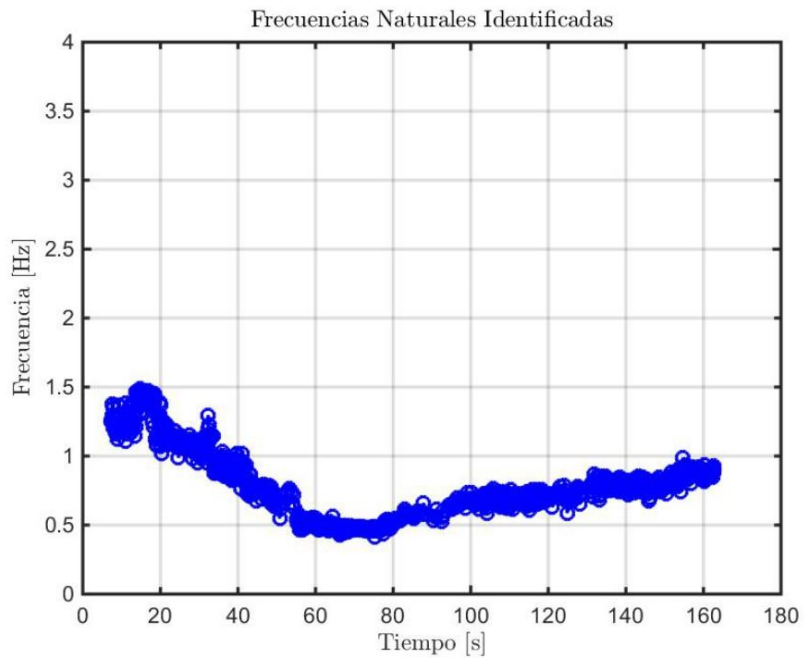


Figura 30: Frecuencia y amortiguamiento identificado durante el evento del 27-02-2010

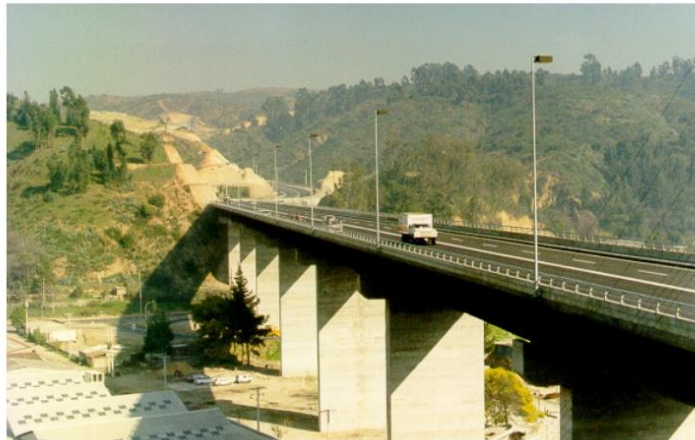
5. Referencias

1. Díaz, A. (2004). Análisis de micro vibraciones del viaducto Marga-Marga II. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Universidad de Chile.
2. Van Overschee, P., and De Moor, B. (1996). Subspace Identification for Linear Systems. Conference Proceedings of the International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Vol. 2008). Belgium. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2008.4650193>.

Anexo E

En el presente anexo, se entrega el informe enviado al MOP de la respuesta sísmica del viaducto El Salto, durante el primer semestre del 2019. En este informe se puede observar los resultados de los métodos de identificación DSI de 5 eventos sísmicos, resultados con los cuales se identificaron las frecuencias modales de la Tabla 6-9

VIADUCTO EL SALTO



29 de julio de 2019

Índice

1. Instrumentación	1
2. Resumen de Registros durante 01-01-2019 al 30-06-2019	5
3. Resumen de Respuestas Máximas Medidas	6
4. Resumen de Resultados Evento del 19-01-2019	14
4.1. Resumen de Registros Sísmicos	14
4.2. Resumen de Espectros Elásticos	16
4.3. Resumen de Espectros de Potencias	18
4.4. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)	20
4.5. Resumen de CSN	24
5. Resumen de Resultados Evento del 09-04-2019	25
5.1. Resumen de Registros Sísmicos	25
5.2. Resumen de Espectros Elásticos	27
5.3. Resumen de Espectros de Potencias	29
5.4. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)	31
5.5. Resumen de CSN	35
6. Resumen de Resultados Evento del 20-05-2019	36
6.1. Resumen de Registros Sísmicos	36
6.2. Resumen de Espectros Elásticos	38
6.3. Resumen de Espectros de Potencias	40
6.4. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)	42
7. Resumen de Resultados Evento del 03-06-2019	46
7.1. Resumen de Registros Sísmicos	46
7.2. Resumen de Espectros Elásticos	48
7.3. Resumen de Espectros de Potencias	50
7.4. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)	52
8. Referencias	56

VIADUCTO EL SALTO

Reporte de registros entre 01-01-2019 al 30-06-2019

La Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (RENADIC) ha instalado un sistema para registrar movimientos sísmicos del viaducto El Salto (Ex. Marga-Marga) localizado en la Vía Las Palmas en la comuna de Viña del Mar (LAT 33.048S LONG 71.509 W). El sistema de monitoreo sísmico se constituye por 23 acelerómetros marca Kinemetrics ubicados en diversas posiciones de la estructura (según detalla la Figura 2) conectados a 2 estaciones de monitoreo, las cuales registran y almacenan la respuesta sísmica del Viaducto cuando la aceleración de alguno de los canales supera 0.01 [g].

Este reporte presenta los eventos registrados por el sistema durante el periodo comprendido entre el 01-01-2019 al 30-06-2019, los datos recopilados son utilizados para diversos estudios entre los cuales está evaluar el estado estructural del Viaducto y llevar a cabo análisis detallados de la respuesta sísmica de puentes emplazados en una zona de alta demanda sísmica (Zona III). En particular las cepas (2, 3, 4, 5 y 6) del Viaducto El Salto se encuentran emplazadas sobre un suelo de naturaleza arenosa, mientras que sus estribos se apoyan sobre roca, bajo esta configuración se ha observado que el movimiento sísmico en los estribos es significativamente distinto al movimiento observado en la cepas (lo cual se deduce a partir de los resultados medidos al pie de la cepa 4), esto debido al efecto de amplificación de suelo que se da en la zona.

Durante el período analizado (01-01-2019 al 30-06-2019) se registraron 4 eventos sensibles resumidos en la tabla 4. En esta tabla se indica la fecha de ocurrencia del evento sísmico y las características principales reportadas por el Centro Sismológico Nacional (Magnitud, Profundidad, epicentro, etc). Mayor información relacionada a cada evento sísmico puede ser revisada en mayor detalle en la página web del CSN (www.sismologia.cl).

La revisión preliminar de los eventos, revela que el evento de Magnitud $M_w = 5.0$ del 03-06-2019 generó aceleraciones máximas en la superestructura iguales a 0.018 [g] (NS) y 0.240 [g] (EO), mientras que la estación ubicada al pie de la cepa 4 en campo libre registró máximos iguales a 0.082 [g] (NS) y 0.091 [g] (EO), además los equipos ubicados en la parte superior de la cepa 4, registraron valores máximos iguales a 0.014 [g] (NS) y 0.060 [g] (EO), durante el periodo considerado en este informe. Aceleraciones que se encuentra dentro de los niveles esperados para un evento de esas características.

1. Instrumentación

El viaducto El Salto (Ex. Marga-Marga) se encuentra instrumentado con 23 acelerómetros del tipo fuerza balanceada marca Kinemetrics, modelos FBA-11 y FBA-23, con un rango

dinámico de 135 [dB] para frecuencias entre 0.01-50 [Hz] y rango dinámico de 145 [dB] para frecuencias entre 0.01-20 [Hz], respectivamente. La mayoría de los canales consta con un ancho de banda DC a 200 [Hz], a excepción de los sensores ubicados en el pozo del estribo sur, los cuales tienen un ancho de banda de 100 [Hz], configurados a un rango medible de ± 2 [g] y configurados para que el sistema registre la respuesta sísmica cuando alguno de los sensores sobrepase el umbral de 0.01 [g].

En Julio del 2018, se realizó un cambio en las estaciones de monitoreo, pasando de tener 3 estaciones, MT. WHITNEY (17 canales), ETNA (3 canales) y QDR (3 canales), a 2 estaciones de monitoreo que registran de manera independiente, estación DOLOMITE+ (Tabla 2) y estación QDR 754 (Tabla 3). Esta transición se debió a que en el año 2016 la central Mt. Whitney presentó fallas, por lo que fue reemplazada por la nueva central Dolomite+. La transición anterior conllevó a cambios en la numeración habitual que se usaba en los sensores y a eliminar el antiguo canal 16, el cual cumplió su tiempo de vida útil.

Tabla 1: Característica de los acelerómetros Kinometrics

Canal	f_n [Hz]	β	sensibilidad (VDC/g)
1	51.0	0.70	1.250
2	50.5	0.70	1.250
3	52.4	0.70	1.258
4	51.0	0.70	1.252
5	50.3	0.70	1.254
6	50.5	0.70	1.255
7	54.3	0.70	1.254
8	52.6	0.70	1.250
9	51.8	0.70	1.254
10	51.3	0.70	1.256
11	52.1	0.70	1.253
12	51.0	0.70	1.254
13	50.3	0.70	1.251
14	52.1	0.70	1.253
15	208.3	0.70	1.251
16	51.5	0.70	1.249
17	52.1	0.70	1.252
18	53.5	0.70	1.254
19	50.5	0.70	1.252
20	54.3	0.70	1.254
QDR 1	25.6	0.70	1.250
QDR 2	25.6	0.70	1.250
QDR 3	25.6	0.70	1.250

Tabla 2: Localización de equipos Estación DOLOMITE+

CANAL	TIPO DE SENSOR	UBICACIÓN	N DE SERIE
1	FBA-23	Pie Cepa 4: Norte-Sur	46305
2	FBA-23	Pie Cepa 4: Vertical	46306
3	FBA-23	Pie Cepa 4: Este-Oeste	46307
4	FBA-23	Superior Cepa 4: Norte-Sur	46174
5	FBA-23	Superior Cepa 4: Vertical	46175
6	FBA-23	Superior Cepa 4: Este-Oeste	46176
7	FBA-23	Tablero Cepa 4 borde poniente: Norte-Sur	46116
8	FBA-23	Tablero Cepa 4 borde poniente: Vertical	46117
9	FBA-23	Tablero Cepa 4 borde poniente: Este-Oeste	46118
10	FBA-11	Base Estribo Sur: Norte-Sur	47277
11	FBA-11	Estribo Sur: Este-Oeste	46618
12	FBA-11	Estribo Sur: Norte-Sur	46620
13	FBA-11	Tablero Cepa 2: Este-Oeste	47275
14	FBA-11	Tablero Cepa 4 borde oriente: Vertical	46616
15	EPI	Tablero Cepa 6: Este-Oeste/Vertical (Julio 2003)	879
16	FBA-23	Campo Libre Valle: Norte-Sur	46617
17	FBA-23	Campo Libre Valle: Vertical	46617
18	FBA-23	Campo Libre Valle: Este-Oeste	46617
19	FBA-11	Estribo Norte: Este-Oeste	46615
20	FBA-11	Estribo Norte: Norte-Sur	46619

Tabla 3: Localización de equipos Estación QDR 754

CANAL	TIPO DE SENSOR	UBICACIÓN
1	QDR	Campo Libre Estribo Sur: Este-Oeste
2	QDR	Campo Libre Estribo Sur: Norte-Sur
3	QDR	Campo Libre Estribo Sur: Vertical

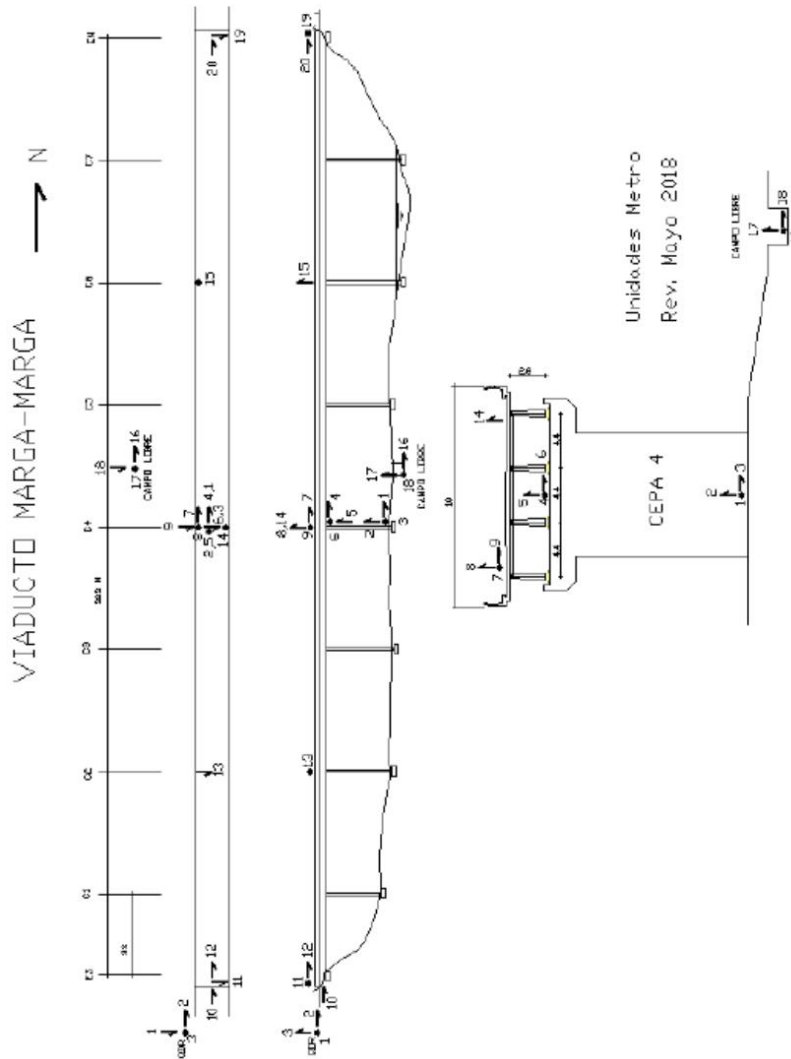


Figura 2: Ubicación de sensores

2. Resumen de Registros durante 01-01-2019 al 30-06-2019

Durante el periodo de estudio, se registran los eventos indicados en la tabla presentada a continuación, a estos eventos se les calcula la intensidad de Arias y Potencial destructivo, tomando en cuenta la suma de las componentes horizontales de los sensores ubicados en el campo libre al pie de la cepa. Asimismo, se calcula el PGA con el valor máximo entre las componentes horizontales de los equipos en campo libre.

Tabla 4: Características de Eventos sísmicos registrados

Fecha	Hora	M_w	Prof [km]	Lat	Lon	D_{epi} [km]	PGA [g]	I_a [cm/seg]	P_d [cm · seg]
19-01-2019	22:32:51	6.7	50.1	-30.276	-71.364	436.3	0.021	3.919	0.012
09-04-2019	08:29:51	3.8	36.9	-33.425	-71.955	83.4	0.013	0.065	0.000
20-05-2019	11:18:32	5.5	133.7	-31.487	-70.235	298.2	0.013	0.382	0.002
03-06-2019	00:22:25	5.0	62.8	-32.744	-71.400	49.9	0.091	5.028	0.014

A modo de complemento, se entregan las fórmulas de intensidad de Arias y potencial destructivo.

1. Intensidad de Arias

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_{t_0}^{t_0+D} a(t)^2 \cdot dt \quad (1)$$

Donde:

- g: Aceleración de gravedad.
- t_0 : Tiempo inicial del registro de aceleraciones.
- D: Duración del registro de aceleraciones.
- $a(t)$: Registro de aceleraciones.

2. Potencial destructivo

$$P_d = \frac{I_a}{v_0^2} \quad (2)$$

Donde:

- I_a : Intensidad de Arias.
- v_0 : Intensidad de cruces por cero.

3. Resumen de Respuestas Máximas Medidas

Se procesan los registros de los eventos mediante un filtro del tipo "Butterworth" de orden 8, entre un rango de frecuencias de 0 y 30 Hz, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 5: Aceleraciones máximas Evento del 19-01-2019 a las 22:32:51

Canal	Localización	Sentido	Amax(cm/seg^2)	Vmax(cm/s)	Dmax(cm)
1	Pie Cepa 4	NS	17.740	1.273	0.104
2	Pie Cepa 4	V	9.695	0.453	0.039
3	Pie Cepa 4	EW	20.880	1.333	0.137
4	Superior Cepa 4	NS	41.954	1.696	0.126
5	Superior Cepa 4	V	11.851	0.478	0.040
6	Superior Cepa 4	EW	37.543	1.651	0.147
7	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	NS	9.508	0.387	0.043
8	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	V	22.151	0.550	0.044
9	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	EW	19.797	1.573	0.247
10	Base Estribo sur	NS	19.504	0.778	0.039
11	Tablero Estribo sur	EW	38.620	1.122	0.067
12	Tablero Estribo sur	NS	8.725	0.429	0.045
13	Tablero Cepa 2	EW	23.820	2.072	0.219
14	Tablero Cepa 4 Borde Oriente	V	18.645	0.580	0.057
15	Tablero Cepa 6	EW/V	33.428	0.906	0.048
16	Campo Libre Valle	NS	19.703	1.083	0.099
17	Campo Libre Valle	V	32.207	0.544	0.044
18	Campo Libre Valle	EW	20.681	1.328	0.140
19	Tablero Estribo Norte	EW	56.951	1.206	0.054
20	Tablero Estribo Norte	NS	10.096	0.463	0.039

A partir de los datos mostrados en la tabla anterior, se utilizan las aceleraciones máximas de cada canal, con el fin de calcular las amplificaciones de registro entregadas en la tabla a continuación.

Tabla 6: Amplificaciones de registros, Evento del 19-01-2019 a las 22:32:51

Registro	Coficiente
Aceleración máxima del suelo (g)	0.033
Aceleración máxima de la superestructura (g)	0.058
Longitudinal	
Tablero Estribo Sur/Base Estribo Sur (Ch-12/Ch-10)	0.447
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-7/Ch-4)	0.227
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-4/Ch-1)	2.365
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-7/Ch-16)	0.483
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-1/Ch-16)	0.900
Transversal	
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-9/Ch-6)	0.527
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-6/Ch-3)	1.798
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-9/Ch-18)	0.957
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-3/Ch-18)	1.010
Vertical	
Tablero Cepa 4 Borde Oriente/Tablero Cepa 4 Borde Poniente (Ch-14/Ch-8)	0.842
Promedio Tablero cepa 4/Cepa 4(superior) $((Ch-14+Ch-8)/2*Ch-5)$	1.721
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-5/Ch-2)	1.222
Tablero Cepa 6/Campo Libre Valle (Ch-15/Ch-17)	1.038
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-2/Ch-17)	0.301

Se procesan los registros de los eventos mediante un filtro del tipo "Butterworth" de orden 8, entre un rango de frecuencias de 0 y 30 Hz, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 7: Aceleraciones máximas Evento del 09-04-2019 a las 08:29:51

Canal	Localización	Sentido	Amax(cm/sec^2)	Vmax(cm/s)	Dmax(cm)
1	Pie Cepa 4	NS	9.802	0.216	0.006
2	Pie Cepa 4	V	2.451	0.079	0.003
3	Pie Cepa 4	EW	6.077	0.153	0.007
4	Superior Cepa 4	NS	19.211	0.381	0.015
5	Superior Cepa 4	V	3.333	0.114	0.003
6	Superior Cepa 4	EW	14.703	0.533	0.021
7	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	NS	5.489	0.109	0.005
8	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	V	12.350	0.287	0.015
9	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	EW	6.175	0.219	0.019
10	Base Estribo sur	NS	8.331	0.192	0.008
11	Tablero Estribo sur	EW	17.056	0.575	0.020
12	Tablero Estribo sur	NS	6.763	0.109	0.005
13	Tablero Cepa 2	EW	9.313	0.279	0.015
14	Tablero Cepa 4 Borde Oriente	V	14.018	0.191	0.008
15	Tablero Cepa 6	EW/V	33.328	0.500	0.013
16	Campo Libre Valle	NS	12.449	0.265	0.006
17	Campo Libre Valle	V	6.371	0.114	0.003
18	Campo Libre Valle	EW	7.253	0.167	0.007
19	Tablero Estribo Norte	EW	12.252	0.418	0.018
20	Tablero Estribo Norte	NS	6.266	0.112	0.006

A partir de los datos mostrados en la tabla anterior, se utilizan las aceleraciones máximas de cada canal, con el fin de calcular las amplificaciones de registro entregadas en la tabla a continuación.

Tabla 8: Amplificaciones de registros, Evento del 09-04-2019 a las 08:29:51

Registro	Coefficiente
Aceleración máxima del suelo (g)	0.013
Aceleración máxima de la superestructura (g)	0.034
Longitudinal	
Tablero Estribo Sur/Base Estribo Sur (Ch-12/Ch-10)	0.812
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-7/Ch-4)	0.286
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-4/Ch-1)	1.960
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-7/Ch-16)	0.441
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-1/Ch-16)	0.787
Transversal	
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-9/Ch-6)	0.420
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-6/Ch-3)	2.419
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-9/Ch-18)	0.851
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-3/Ch-18)	0.838
Vertical	
Tablero Cepa 4 Borde Oriente/Tablero Cepa 4 Borde Poniente (Ch-14/Ch-8)	1.135
Promedio Tablero cepa 4/Cepa 4(superior) $((Ch-14+Ch-8)/2*Ch-5)$	3.956
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-5/Ch-2)	1.360
Tablero Cepa 6/Campo Libre Valle (Ch-15/Ch-17)	5.231
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-2/Ch-17)	0.385

Se procesan los registros de los eventos mediante un filtro del tipo "Butterworth" de orden 8, entre un rango de frecuencias de 0 y 30 Hz, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 9: Aceleraciones máximas Evento del 20-05-2019 a las 11:18:32

Canal	Localización	Sentido	Amax(cm/seg^2)	Vmax(cm/s)	Dmax(cm)
1	Pie Cepa 4	NS	7.254	0.243	0.015
2	Pie Cepa 4	V	4.411	0.159	0.009
3	Pie Cepa 4	EW	9.018	0.453	0.030
4	Superior Cepa 4	NS	19.315	1.020	0.051
5	Superior Cepa 4	V	5.195	0.202	0.009
6	Superior Cepa 4	EW	21.663	0.853	0.038
7	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	NS	14.115	0.138	0.008
8	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	V	50.088	0.446	0.015
9	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	EW	8.718	0.408	0.040
10	Base Estribo sur	NS	10.293	0.235	0.011
11	Tablero Estribo sur	EW	12.349	0.487	0.026
12	Tablero Estribo sur	NS	8.626	0.168	0.009
13	Tablero Cepa 2	EW	16.667	0.354	0.036
14	Tablero Cepa 4 Borde Oriente	V	18.232	0.352	0.018
15	Tablero Cepa 6	EW/V	66.360	0.760	0.017
16	Campo Libre Valle	NS	7.352	0.236	0.016
17	Campo Libre Valle	V	4.803	0.162	0.008
18	Campo Libre Valle	EW	12.645	0.539	0.028
19	Tablero Estribo Norte	EW	12.449	0.300	0.014
20	Tablero Estribo Norte	NS	11.471	0.164	0.010

A partir de los datos mostrados en la tabla anterior, se utilizan las aceleraciones máximas de cada canal, con el fin de calcular las amplificaciones de registro entregadas en la tabla a continuación.

Tabla 10: Amplificaciones de registros, Evento del 20-05-2019 a las 11:18:32

Registro	Coficiente
Aceleración máxima del suelo (g)	0.013
Aceleración máxima de la superestructura (g)	0.068
Longitudinal	
Tablero Estribo Sur/Base Estribo Sur (Ch-12/Ch-10)	0.838
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-7/Ch-4)	0.731
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-4/Ch-1)	2.663
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-7/Ch-16)	1.920
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-1/Ch-16)	0.987
Transversal	
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-9/Ch-6)	0.402
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-6/Ch-3)	2.402
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-9/Ch-18)	0.689
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-3/Ch-18)	0.713
Vertical	
Tablero Cepa 4 Borde Oriente/Tablero Cepa 4 Borde Poniente (Ch-14/Ch-8)	0.364
Promedio Tablero cepa 4/Cepa 4(superior) $((Ch-14+Ch-8)/2*Ch-5)$	6.575
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-5/Ch-2)	1.178
Tablero Cepa 6/Campo Libre Valle (Ch-15/Ch-17)	13.817
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-2/Ch-17)	0.918

Se procesan los registros de los eventos mediante un filtro del tipo "Butterworth" de orden 8, entre un rango de frecuencias de 0 y 30 Hz, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 11: Aceleraciones máximas Evento del 03-06-2019 a las 00:22:25

Canal	Localización	Sentido	Amax(cm/sec^2)	Vmax(cm/s)	Dmax(cm)
1	Pie Cepa 4	NS	29.798	1.042	0.050
2	Pie Cepa 4	V	17.742	0.488	0.016
3	Pie Cepa 4	EW	48.913	2.601	0.141
4	Superior Cepa 4	NS	62.047	1.803	0.090
5	Superior Cepa 4	V	25.877	0.501	0.016
6	Superior Cepa 4	EW	80.180	3.115	0.159
7	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	NS	11.273	0.294	0.014
8	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	V	42.737	0.651	0.026
9	Tablero Cepa 4 Borde Poniente	EW	58.616	2.126	0.147
10	Base Estribo sur	NS	33.817	0.918	0.039
11	Tablero Estribo sur	EW	235.150	2.991	0.138
12	Tablero Estribo sur	NS	18.134	0.374	0.017
13	Tablero Cepa 2	EW	110.664	2.414	0.101
14	Tablero Cepa 4 Borde Oriente	V	34.405	0.674	0.025
15	Tablero Cepa 6	EW/V	81.161	1.710	0.046
16	Campo Libre Valle	NS	80.377	1.422	0.055
17	Campo Libre Valle	V	51.755	0.868	0.028
18	Campo Libre Valle	EW	88.904	2.662	0.123
19	Tablero Estribo Norte	EW	104.587	1.721	0.089
20	Tablero Estribo Norte	NS	16.369	0.373	0.016

A partir de los datos mostrados en la tabla anterior, se utilizan las aceleraciones máximas de cada canal, con el fin de calcular las amplificaciones de registro entregadas en la tabla a continuación.

Tabla 12: Amplificaciones de registros, Evento del 03-06-2019 a las 00:22:25

Registro	Coficiente
Aceleración máxima del suelo (g)	0.091
Aceleración máxima de la superestructura (g)	0.240
Longitudinal	
Tablero Estribo Sur/Base Estribo Sur (Ch-12/Ch-10)	0.536
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-7/Ch-4)	0.182
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-4/Ch-1)	2.082
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-7/Ch-16)	0.140
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-1/Ch-16)	0.371
Transversal	
Tablero Cepa 4/Cepa 4(superior) (Ch-9/Ch-6)	0.731
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-6/Ch-3)	1.639
Tablero Cepa 4/Campo Libre Valle (Ch-9/Ch-18)	0.659
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-3/Ch-18)	0.550
Vertical	
Tablero Cepa 4 Borde Oriente/Tablero Cepa 4 Borde Poniente (Ch-14/Ch-8)	0.805
Promedio Tablero cepa 4/Cepa 4(superior) $((Ch-14+Ch-8)/2*Ch-5)$	1.491
Cepa 4(superior)/Cepa 4(Pie) (Ch-5/Ch-2)	1.459
Tablero Cepa 6/Campo Libre Valle (Ch-15/Ch-17)	1.568
Cepa 4(Pie)/Campo Libre Valle (Ch-2/Ch-17)	0.343

4. Resumen de Resultados Evento del 19-01-2019

4.1. Resumen de Registros Sísmicos

Evento del 19-01-2019, canales 1-10.

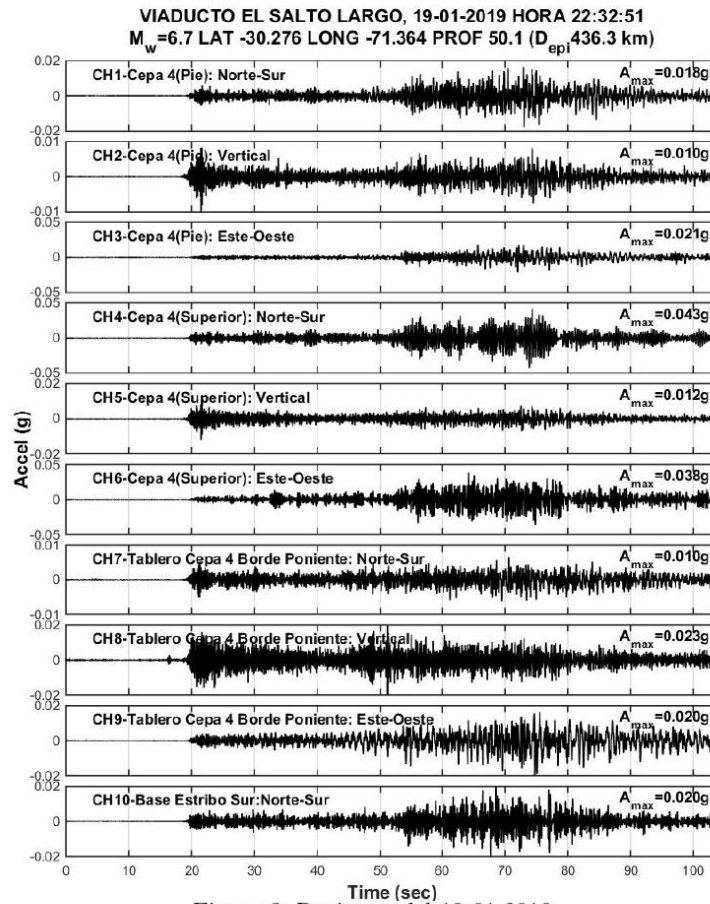


Figura 3: Registros del 19-01-2019

Evento del 19-01-2019, Canales 11-20.

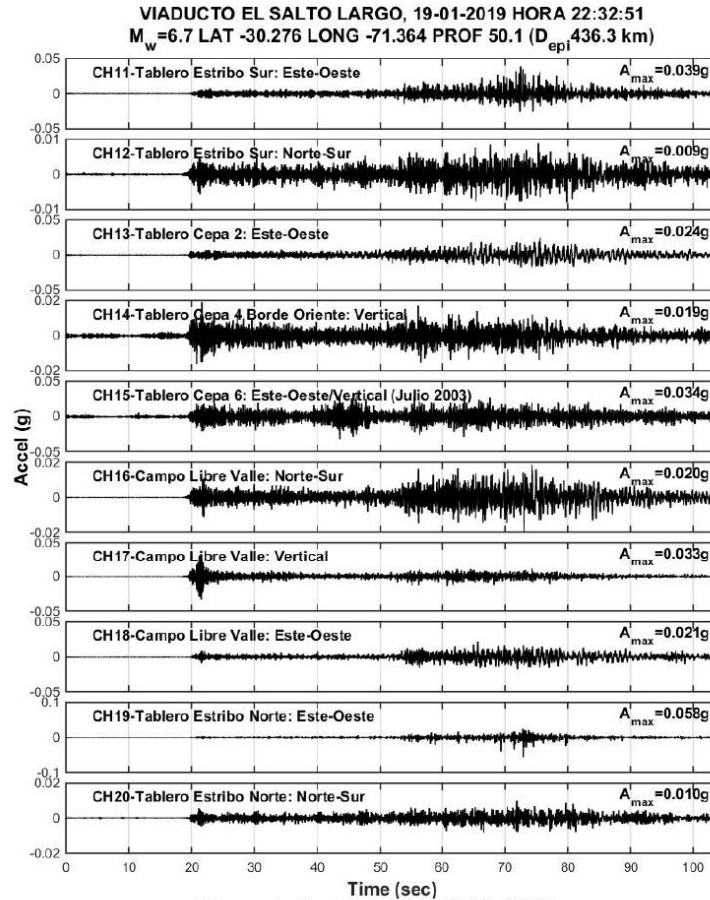


Figura 4: Registros del 19-01-2019

4.2. Resumen de Espectros Elásticos

Espectros elásticos de respuesta del evento del 19-01-2019, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5%, canales 1-10.

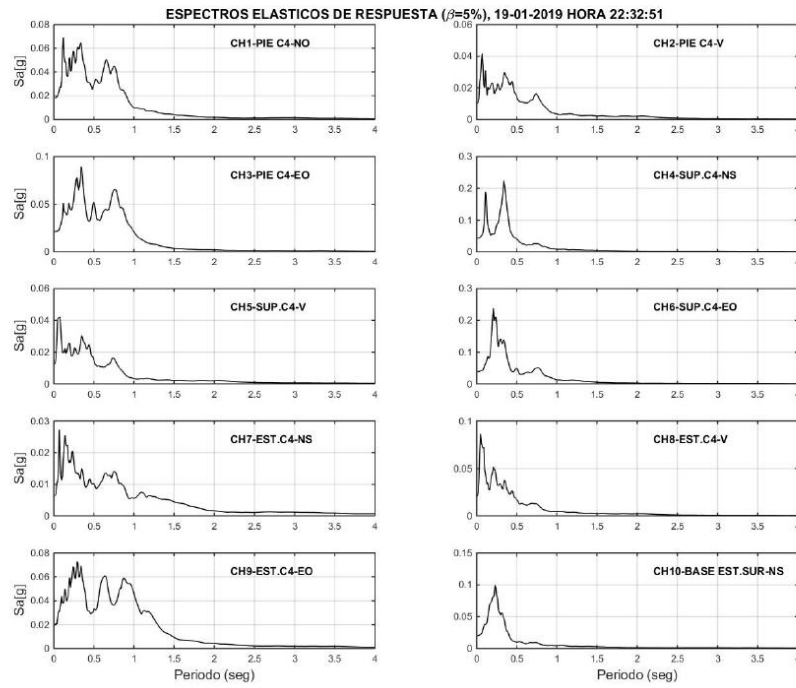


Figura 5: Espectro elástico asociado al evento del 19-01-2019

Espectros elásticos de respuesta del evento del 19-01-2019, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5%, canales 11-20.

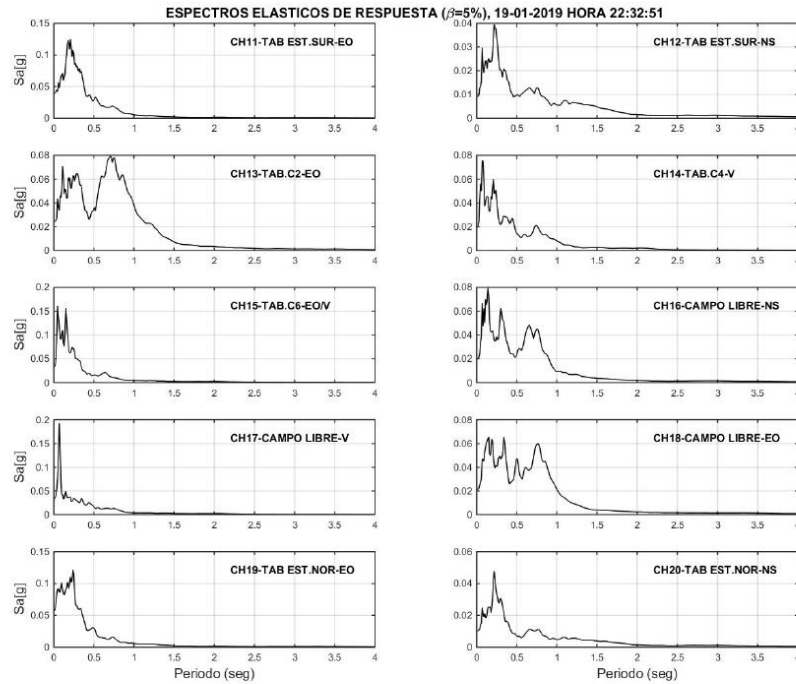


Figura 6: Espectro elástico asociado al evento del 19-01-2019

4.3. Resumen de Espectros de Potencias

Los espectros de Potencia Longitudinales (PSD) del evento del 19-01-2019, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

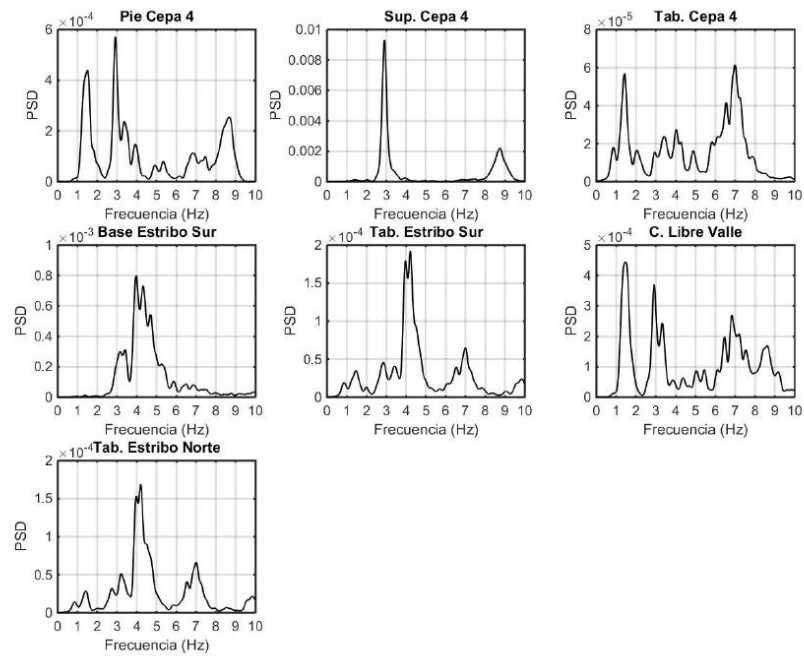


Figura 7: Espectro de Potencia asociado al evento del 19-01-2019(Longitudinal)

Los espectros de Potencia Transversales (PSD) del evento del 19-01-2019, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

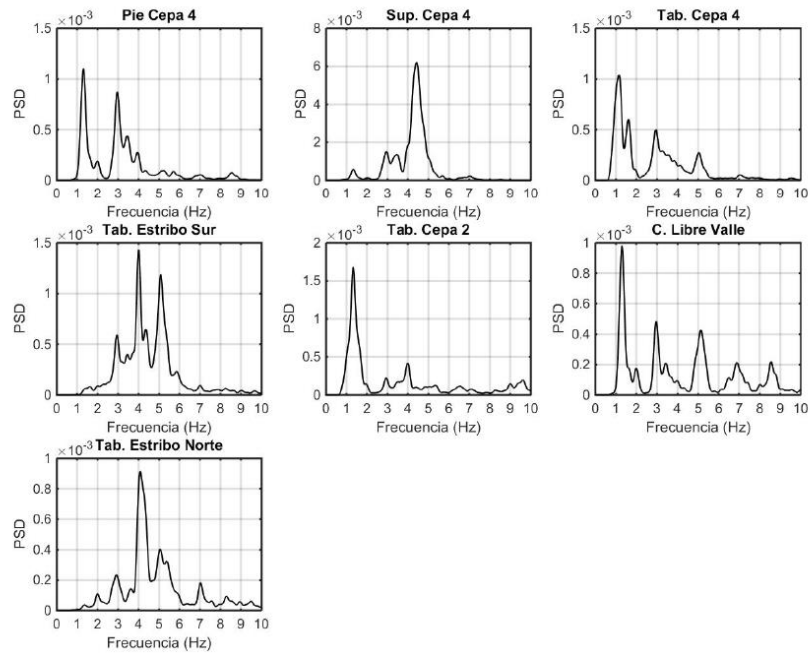


Figura 8: Espectro de Potencia asociado al evento del 19-01-2019(Transversal)

4.4. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 7, 12 y 20 y como entradas los canales 4 (Combinación de canales que configura una respuesta longitudinal del puente).

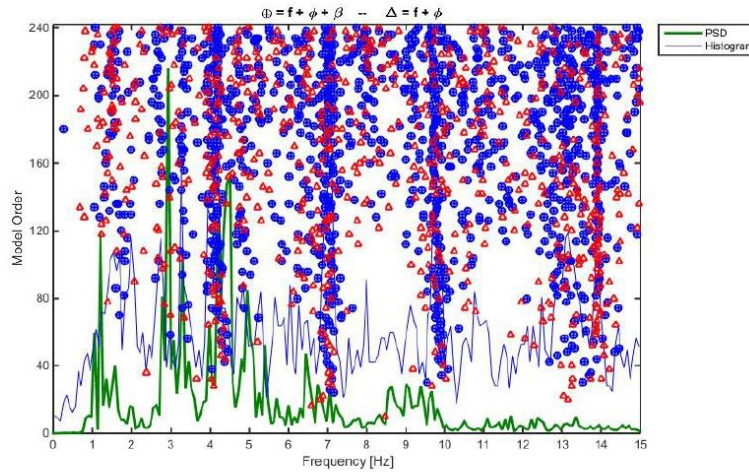


Figura 9: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 19-01-2019

Tabla 13: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.378	1.89	15.56	1.89	5
1.467	2.59	13.20	2.59	17
1.547	3.24	10.99	3.24	17
1.703	2.26	13.18	2.26	5
2.713	5.35	7.40	5.35	27
2.971	5.25	9.32	5.25	6
3.301	4.19	4.52	4.19	30
3.502	7.09	7.96	7.09	6

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

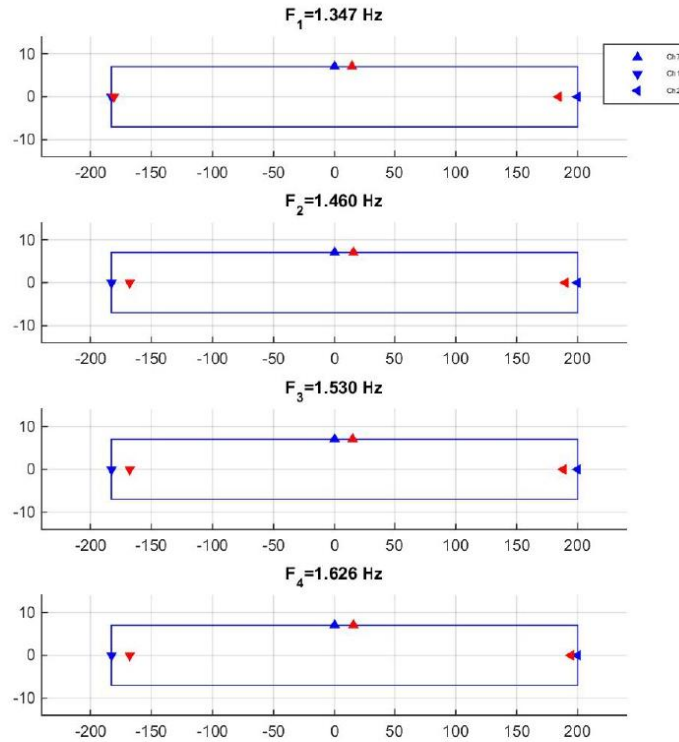


Figura 10: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 19-01-2019

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 3, 6, 9, 11, 13 y 19 y como entradas los canales 18 (Combinación de canales que configura una respuesta transversal del puente).

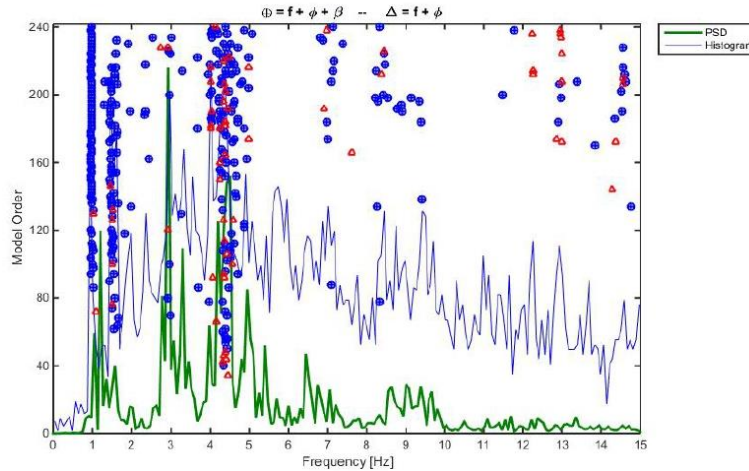


Figura 11: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 19-01-2019

Tabla 14: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
0.964	0.67	4.72	0.67	57
1.003	1.09	6.70	1.09	7
1.482	1.87	5.14	1.87	34
1.602	2.00	4.22	2.00	13
4.008	2.53	1.65	2.53	11
4.158	7.87	1.79	7.87	17
4.369	5.24	2.78	5.24	58
4.567	4.11	3.29	4.11	18

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

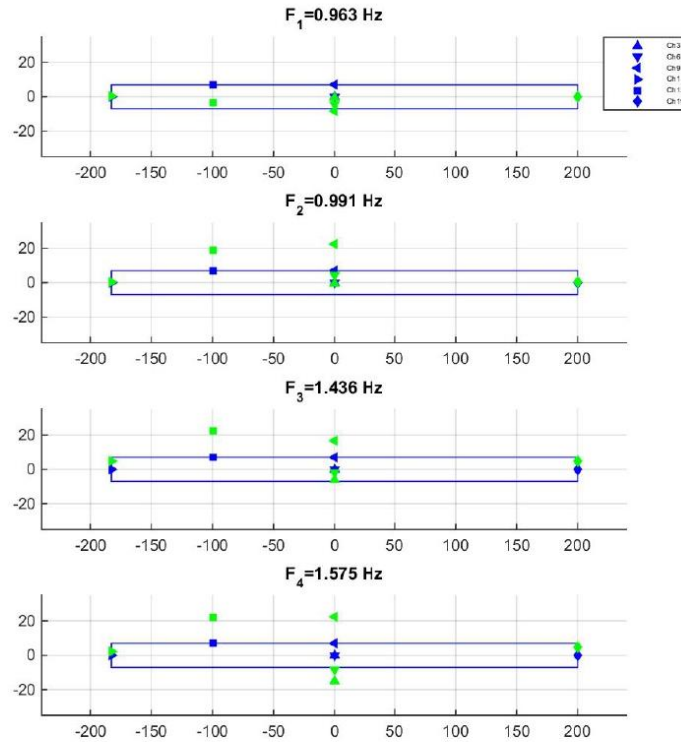


Figura 12: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 19-01-2019

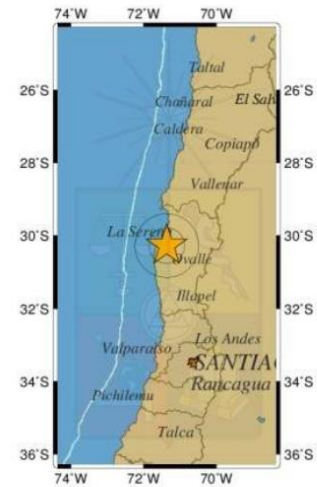
4.5. Resumen de CSN

Informe de sismo percibido

[← Volver](#)

Hipocentro

Hora Local	22:32:51 19/01/2019
Hora UTC	01:32:51 20/01/2019
Latitud	-30.276
Longitud	-71.364
Profundidad	50.1 Km
Magnitud	6.7 Mww GUC
Referencia	13 km al E de Tongoy



Reporte de intensidades (<http://www.onemi.cl/informate/sismo-de-mayor-intensidad-en-la-region-de-coquimbo-3/>)

Observaciones

Informe preparado por: Oficina de Análisis 19/01/2019 a las 22:53 hrs

5. Resumen de Resultados Evento del 09-04-2019

5.1. Resumen de Registros Sísmicos

Evento del 09-04-2019, canales 1-10.

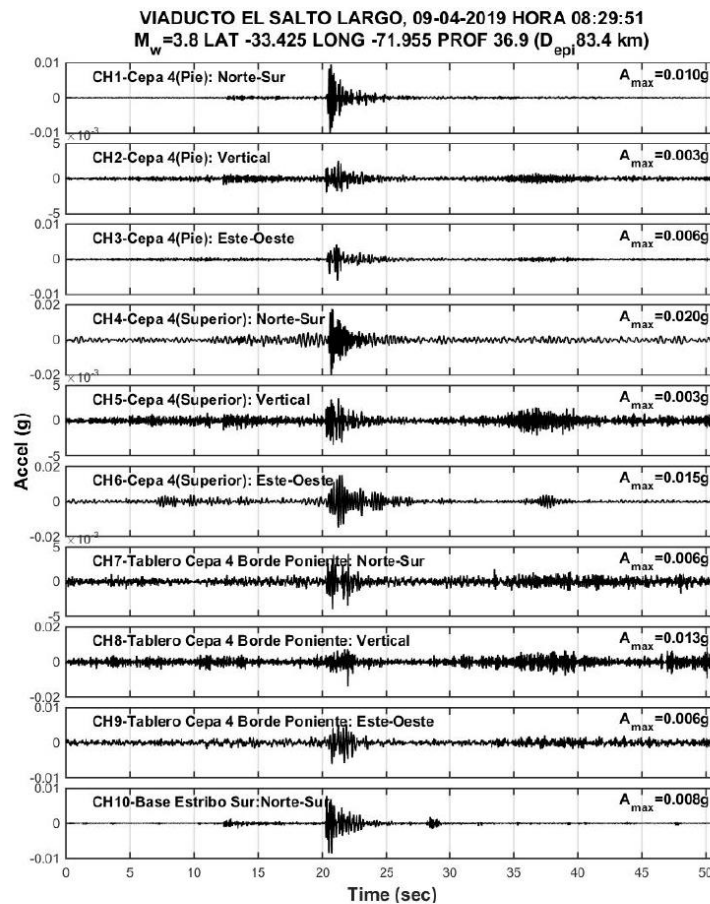


Figura 13: Registros del 09-04-2019

Evento del 09-04-2019, Canales 11-20.

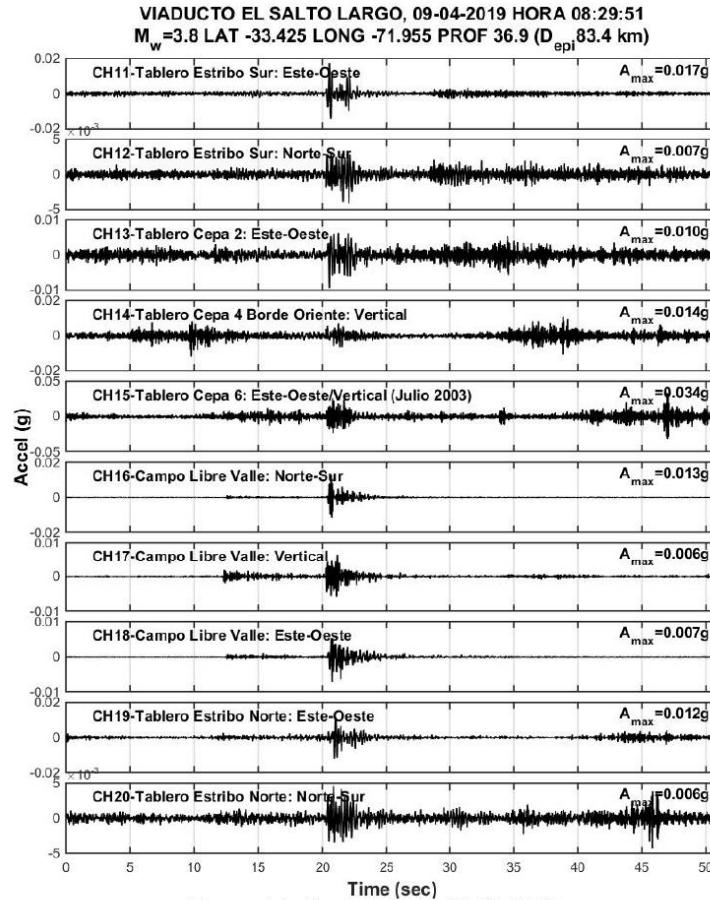


Figura 14: Registros del 09-04-2019

5.2. Resumen de Espectros Elásticos

Espectros elásticos de respuesta del evento del 09-04-2019, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5%, canales 1-10.

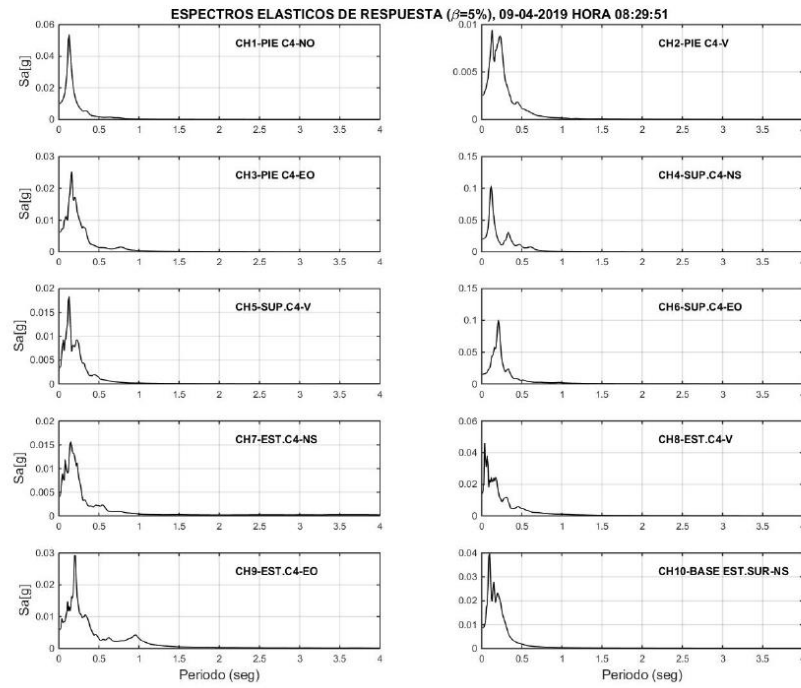


Figura 15: Espectro elástico asociado al evento del 09-04-2019

Espectros elásticos de respuesta del evento del 09-04-2019, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5%, canales 11-20.

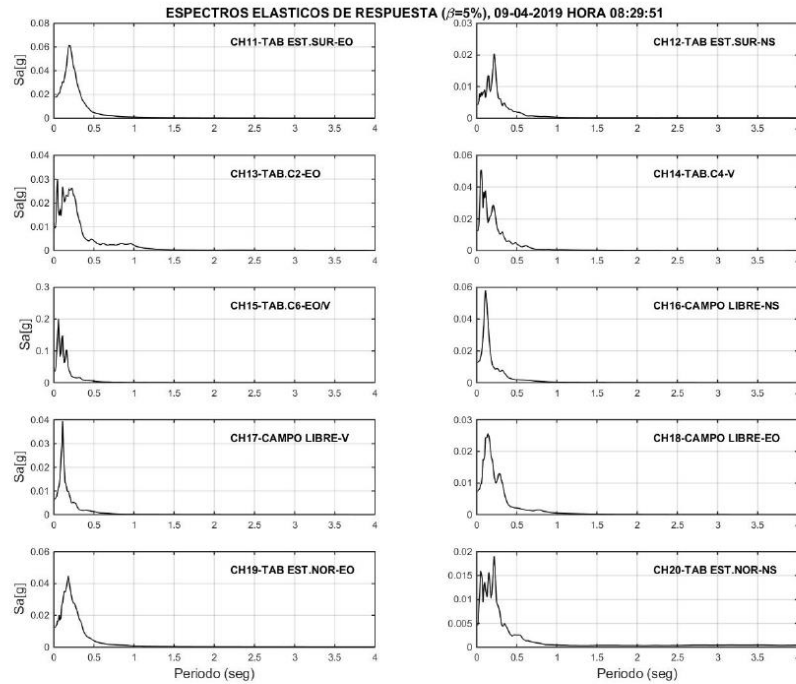


Figura 16: Espectro elástico asociado al evento del 09-04-2019

5.3. Resumen de Espectros de Potencias

Los espectros de Potencia Longitudinales (PSD) del evento del 09-04-2019, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

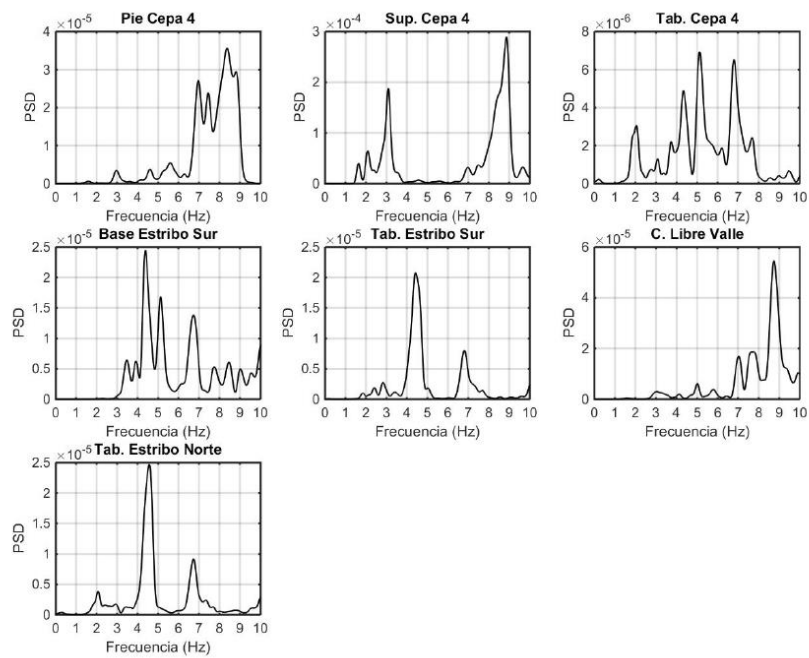


Figura 17: Espectro de Potencia asociado al evento del 09-04-2019(Longitudinal)

Los espectros de Potencia Transversales (PSD) del evento del 09-04-2019, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

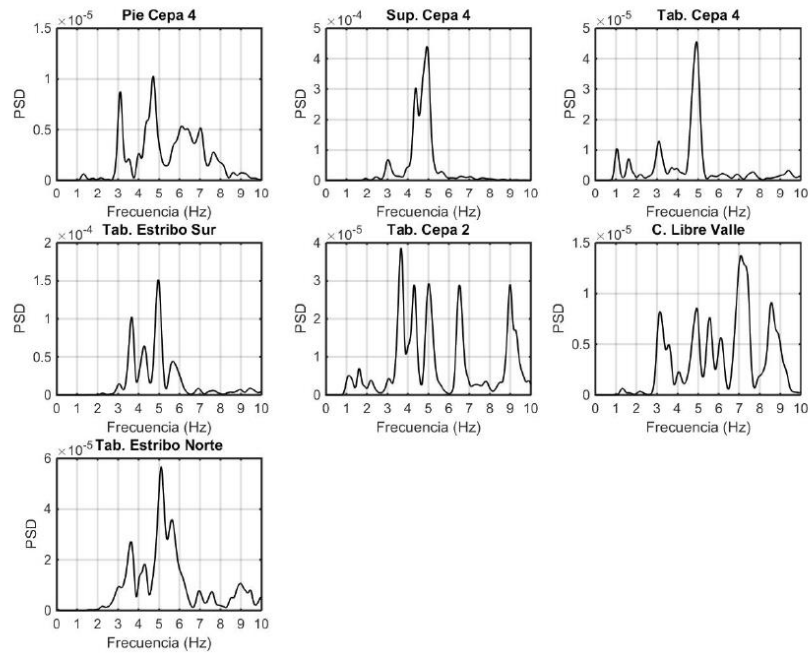


Figura 18: Espectro de Potencia asociado al evento del 09-04-2019(Transversal)

5.4. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 7, 12 y 20 y como entradas los canales 4 (Combinación de canales que configura una respuesta longitudinal del puente).

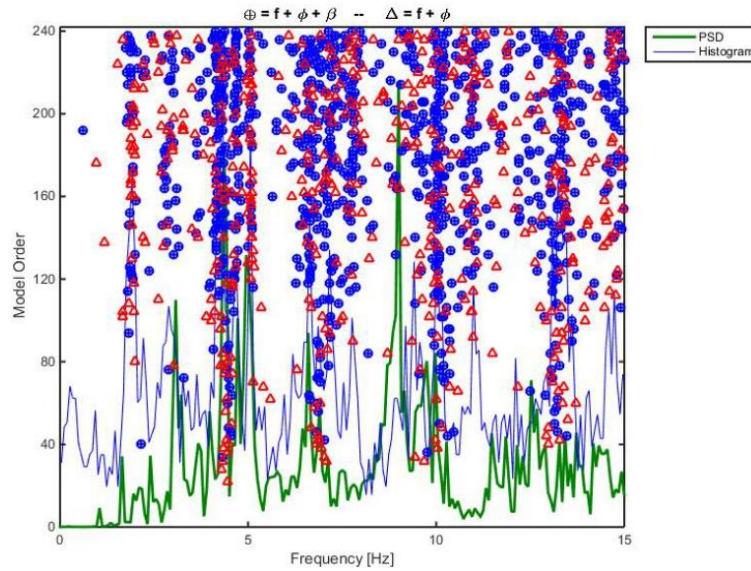


Figura 19: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 09-04-2019

Tabla 15: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
1.831	3.78	5.37	3.78	15
1.919	2.37	7.59	2.37	13
2.740	3.16	11.91	3.16	8
2.888	4.93	7.04	4.93	19
3.055	4.77	7.82	4.77	10
3.706	7.42	6.06	7.42	10
4.165	6.91	3.42	6.91	60
4.374	6.32	4.47	6.32	50

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

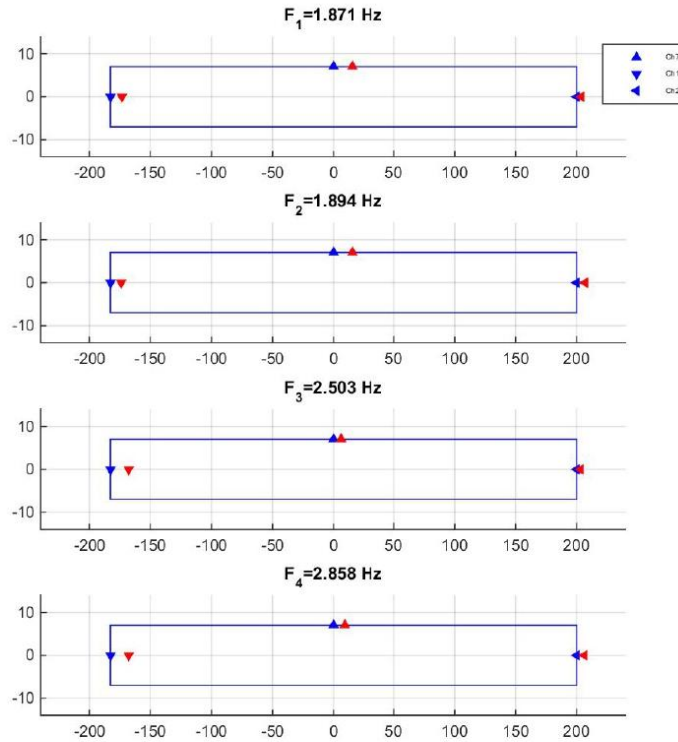


Figura 20: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 09-04-2019

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 3, 6, 9, 11, 13 y 19 y como entradas los canales 18 (Combinación de canales que configura una respuesta transversal del puente).

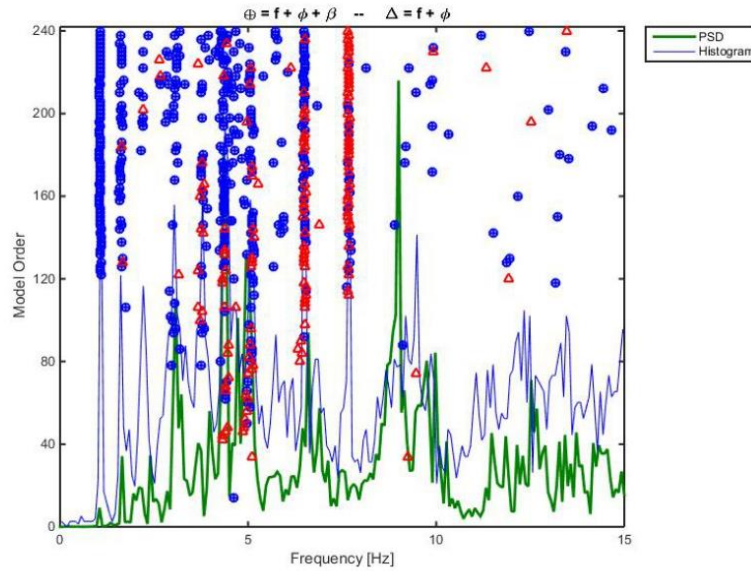


Figura 21: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 09-04-2019

Tabla 16: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
1.061	0.86	3.18	0.86	54
1.607	2.17	7.75	2.17	26
1.654	1.29	9.88	1.29	10
2.204	1.28	3.35	1.28	7
3.047	3.26	4.28	3.26	16
3.138	3.25	3.15	3.25	10
3.771	2.41	2.06	2.41	25
4.419	4.92	1.85	4.92	42

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

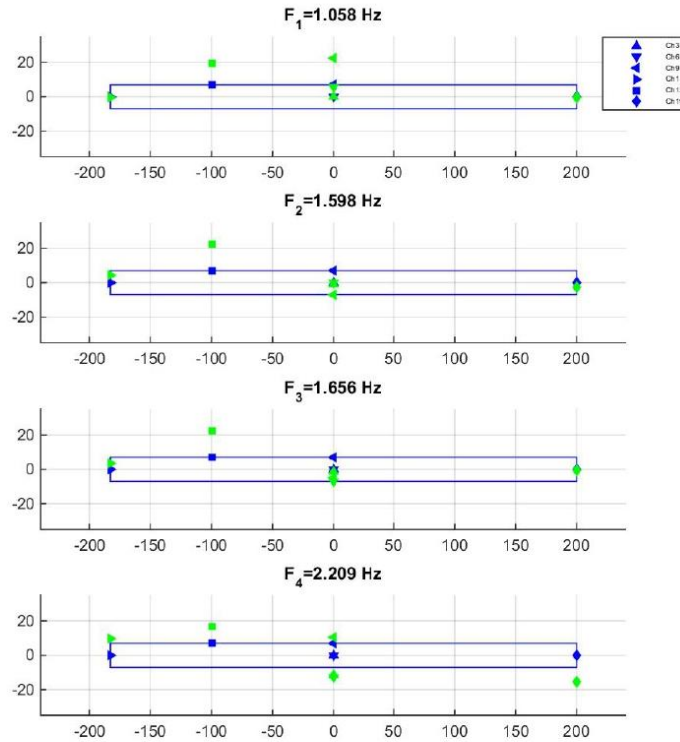


Figura 22: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 09-04-2019

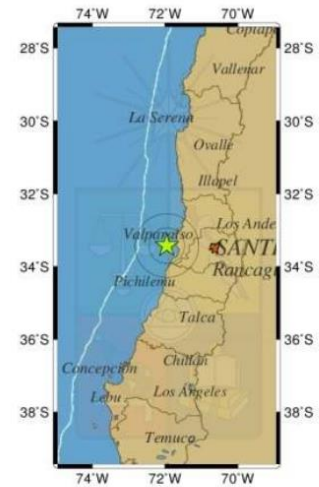
5.5. Resumen de CSN

Informe de sismo

[← Volver](#)

Hipocentro

Hora Local	08:29:51 09/04/2019
Hora UTC	12:29:51 09/04/2019
Latitud	-33.425
Longitud	-71.955
Profundidad	36.9 Km
Magnitud	3.8 MI GUC
Referencia	27 km al O de El Tabo



Observaciones

Informe preparado por: Oficina de Análisis

6. Resumen de Resultados Evento del 20-05-2019

6.1. Resumen de Registros Sísmicos

Evento del 20-05-2019, canales 1-10.

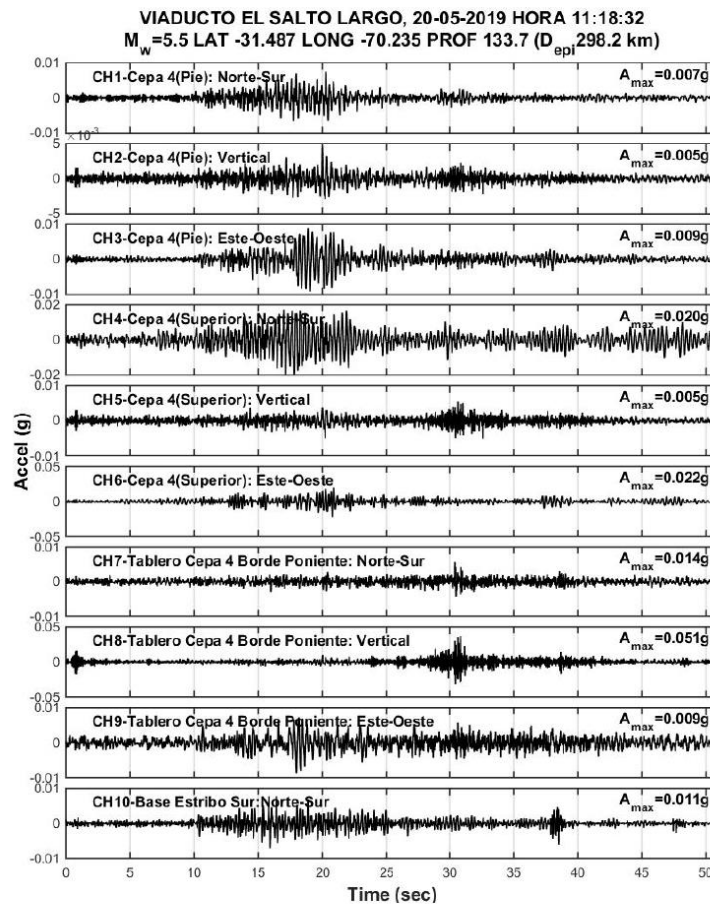


Figura 23: Registros del 20-05-2019

Evento del 20-05-2019, Canales 11-20.

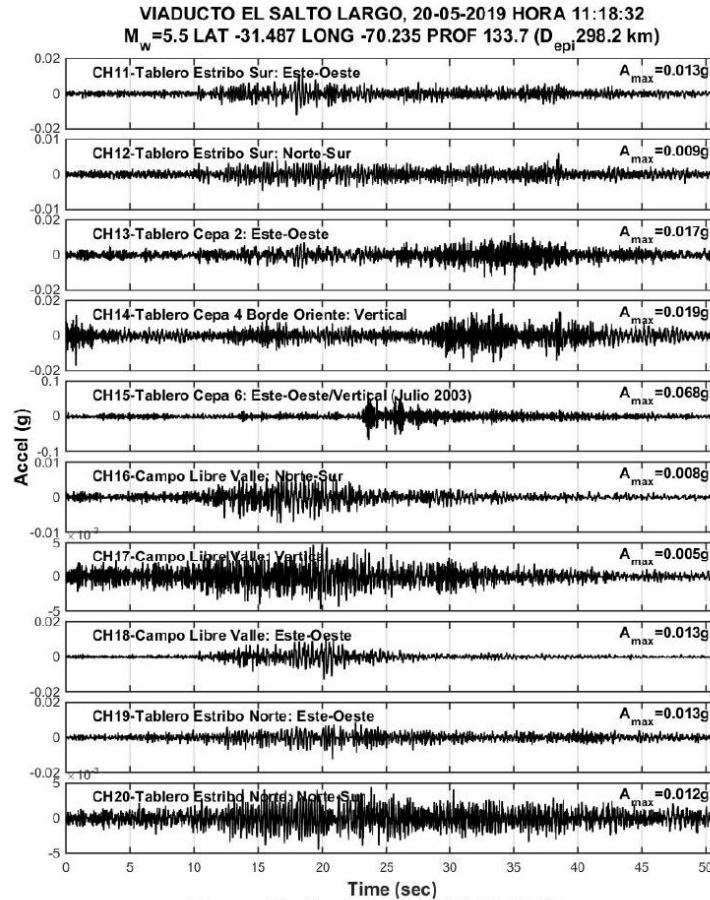


Figura 24: Registros del 20-05-2019

6.2. Resumen de Espectros Elásticos

Espectros elásticos de respuesta del evento del 20-05-2019, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5%, canales 1-10.

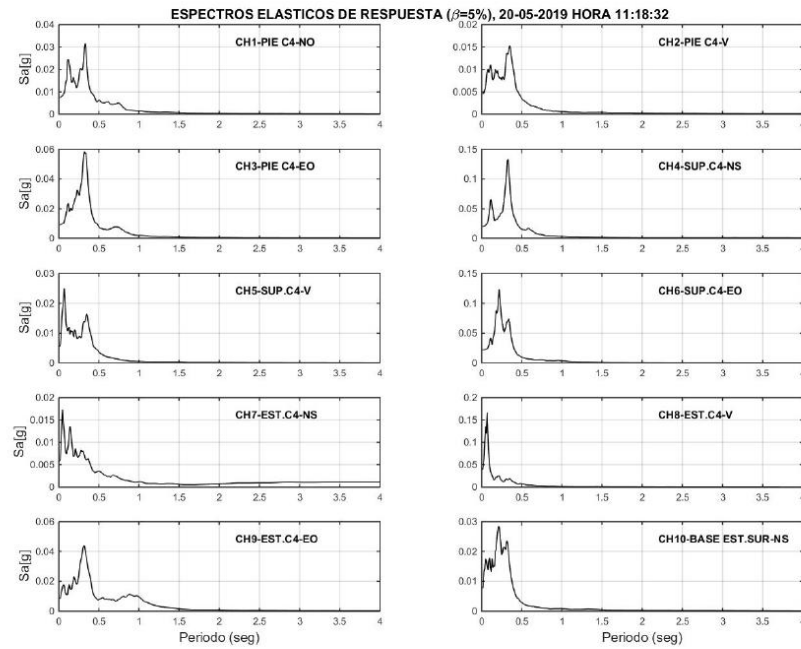


Figura 25: Espectro elástico asociado al evento del 20-05-2019

Espectros elásticos de respuesta del evento del 20-05-2019, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5 %, canales 11-20.

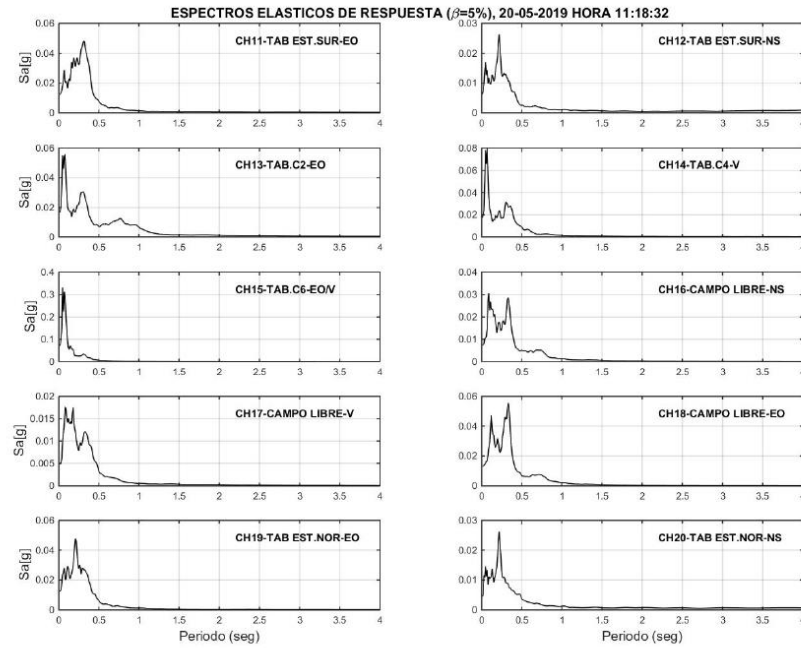


Figura 26: Espectro elástico asociado al evento del 20-05-2019

6.3. Resumen de Espectros de Potencias

Los espectros de Potencia Longitudinales (PSD) del evento del 20-05-2019, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

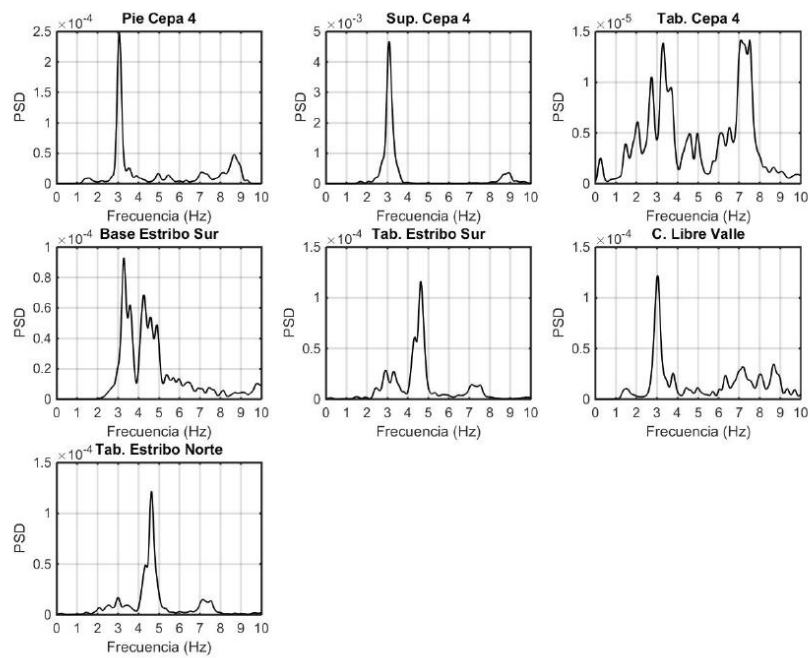


Figura 27: Espectro de Potencia asociado al evento del 20-05-2019(Longitudinal)

Los espectros de Potencia Transversales (PSD) del evento del 20-05-2019, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

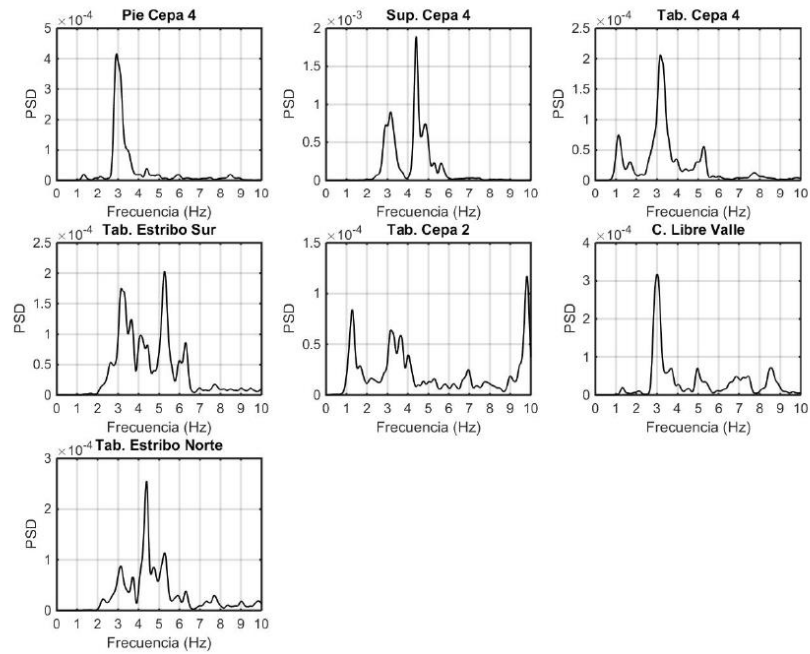


Figura 28: Espectro de Potencia asociado al evento del 20-05-2019(Transversal)

6.4. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 7, 12 y 20 y como entradas los canales 4 (Combinación de canales que configura una respuesta longitudinal del puente).

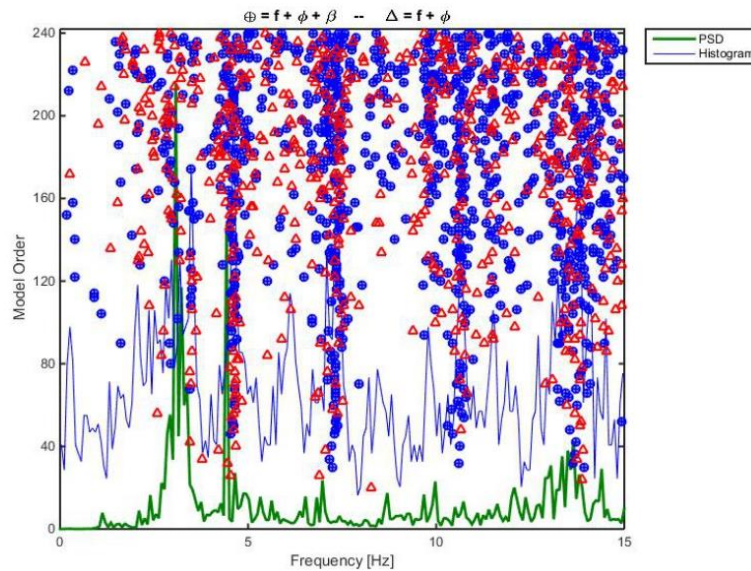


Figura 29: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 20-05-2019

Tabla 17: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
2.038	3.53	6.30	3.53	8
2.405	4.93	9.20	4.93	9
2.648	4.80	9.38	4.80	10
2.802	2.85	8.54	2.85	12
2.930	4.93	4.25	4.93	19
3.268	7.42	7.11	7.42	7
3.589	6.58	6.29	6.58	17
4.415	9.58	6.49	9.58	39

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

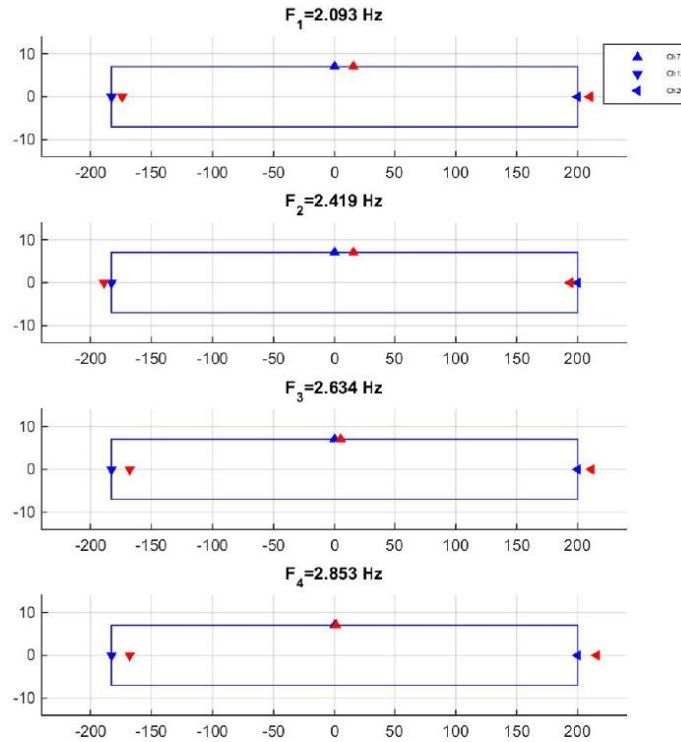


Figura 30: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 20-05-2019

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 3, 6, 9, 11, 13 y 19 y como entradas los canales 18 (Combinación de canales que configura una respuesta transversal del puente).

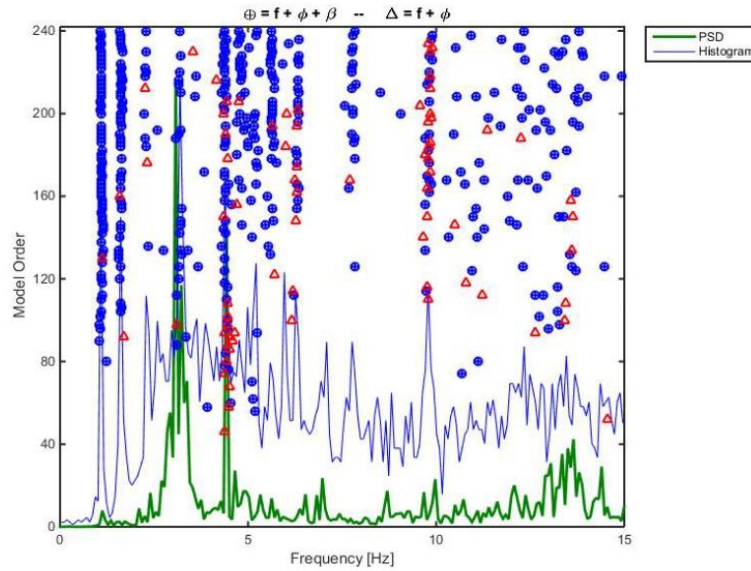


Figura 31: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 20-05-2019

Tabla 18: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
1.090	1.03	5.90	1.03	39
1.607	1.90	5.45	1.90	36
1.650	1.33	4.53	1.33	11
2.285	2.31	3.04	2.31	10
3.173	4.13	3.07	4.13	19
4.390	3.98	2.09	3.98	52
4.517	3.55	2.51	3.55	8
4.787	4.29	2.44	4.29	20

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

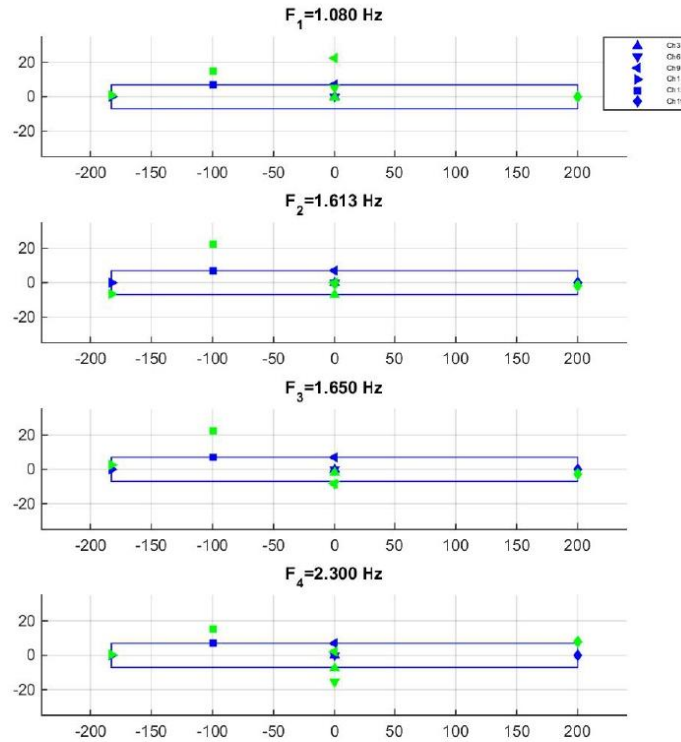


Figura 32: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 20-05-2019

7. Resumen de Resultados Evento del 03-06-2019

7.1. Resumen de Registros Sísmicos

Evento del 03-06-2019, canales 1-10.

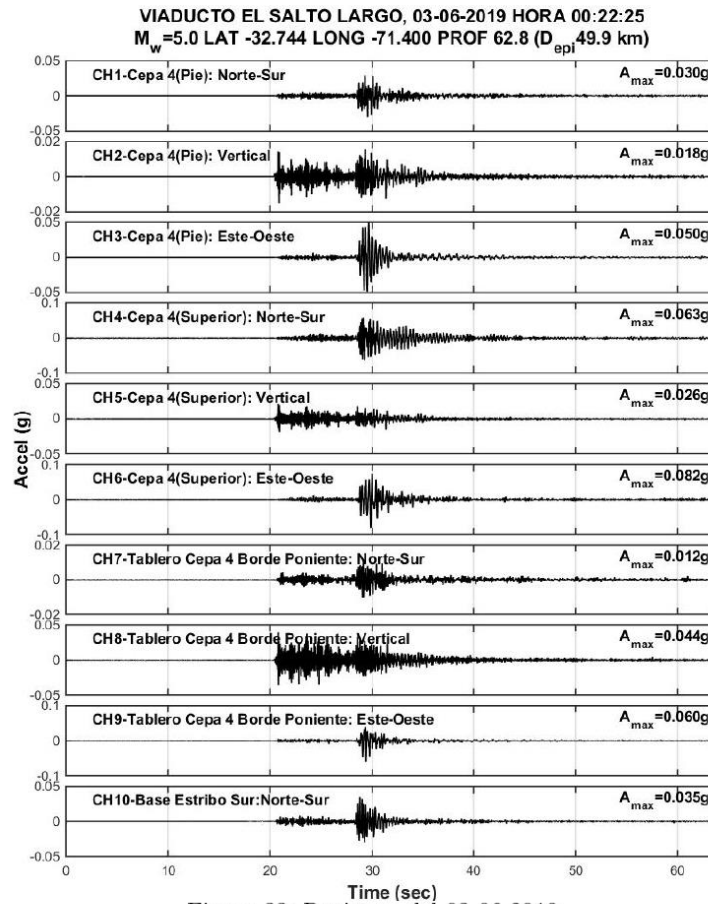


Figura 33: Registros del 03-06-2019

Evento del 03-06-2019, Canales 11-20.

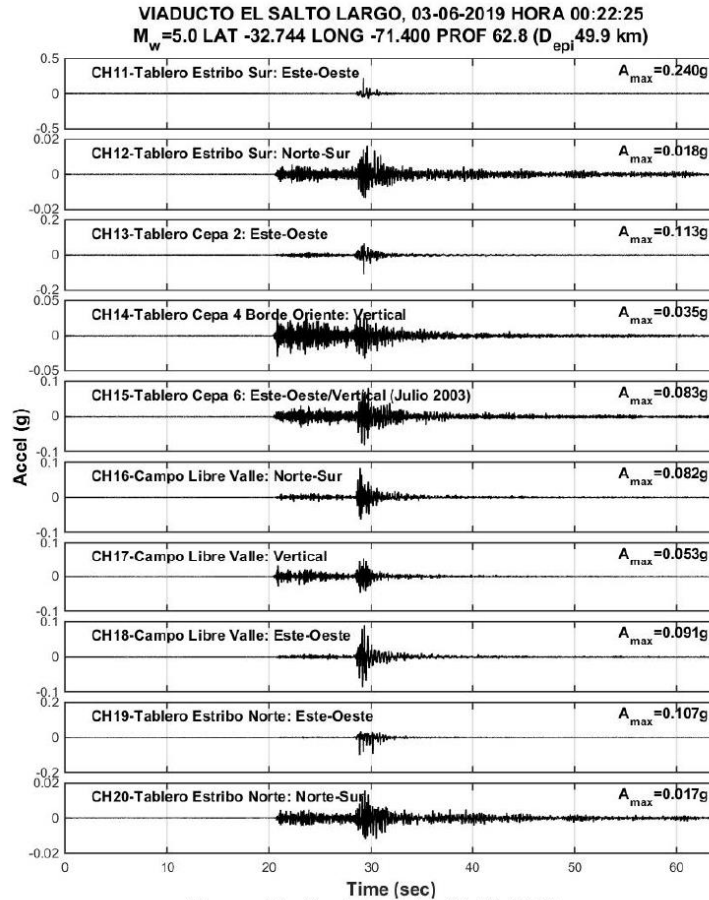


Figura 34: Registros del 03-06-2019

7.2. Resumen de Espectros Elásticos

Espectros elásticos de respuesta del evento del 03-06-2019, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5%, canales 1-10.

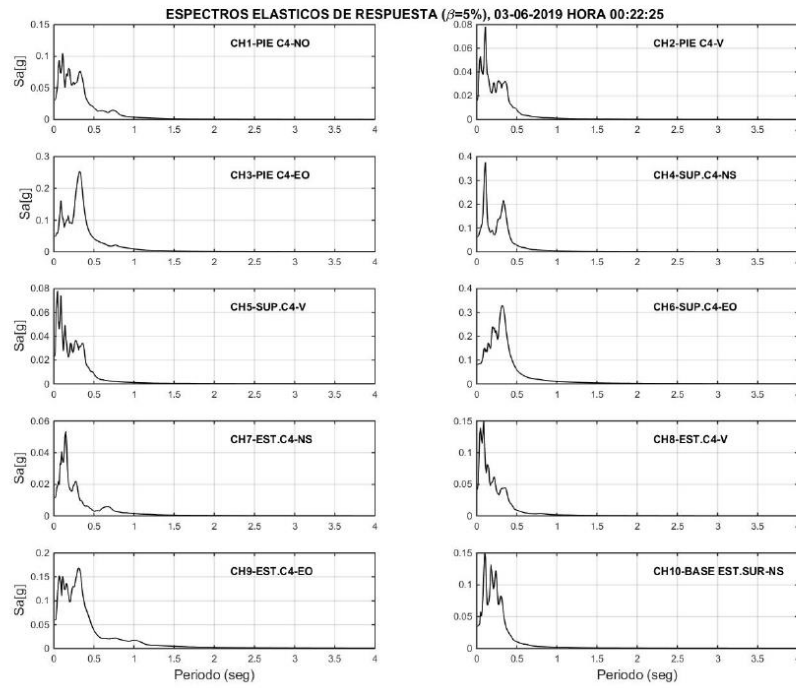


Figura 35: Espectro elástico asociado al evento del 03-06-2019

Espectros elásticos de respuesta del evento del 03-06-2019, son computados con el método de Newmark (aceleración lineal) para una tasa de amortiguamiento del 5%, canales 11-20.

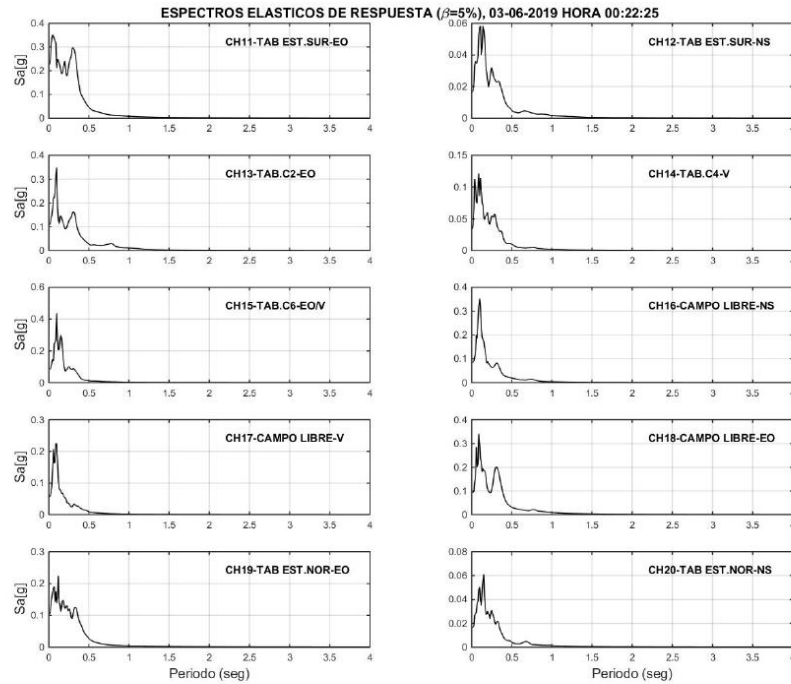


Figura 36: Espectro elástico asociado al evento del 03-06-2019

7.3. Resumen de Espectros de Potencias

Los espectros de Potencia Longitudinales (PSD) del evento del 03-06-2019, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

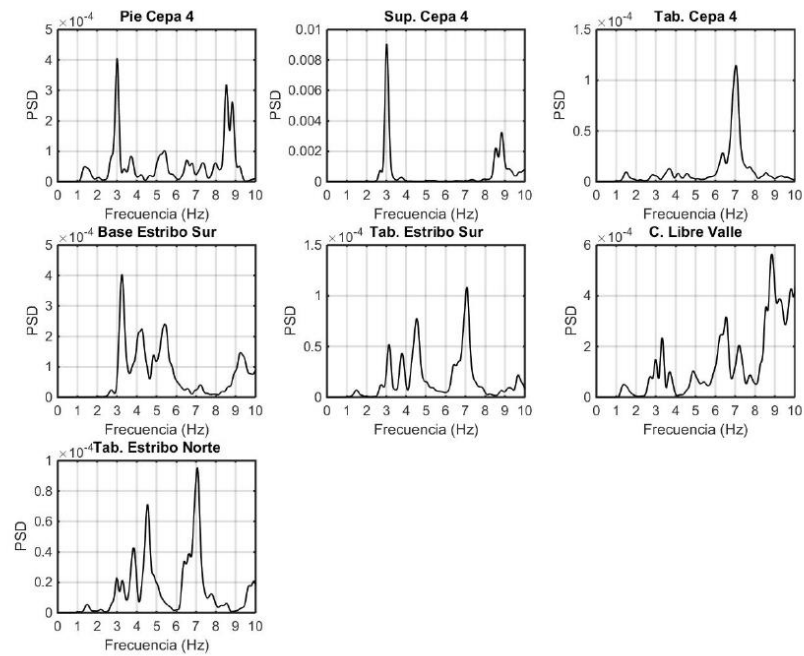


Figura 37: Espectro de Potencia asociado al evento del 03-06-2019(Longitudinal)

Los espectros de Potencia Transversales (PSD) del evento del 03-06-2019, se calculan con el método de Welch empleando ventanas Hanning de 7 seg. Los espectros de potencia indican la energía para cada frecuencia en cada canal, los peaks de energía suelen estar asociados a las frecuencias fundamentales de la estructura (Díaz, 2004) o son producto de la entrada sísmica (que puede ser la componente predominante).

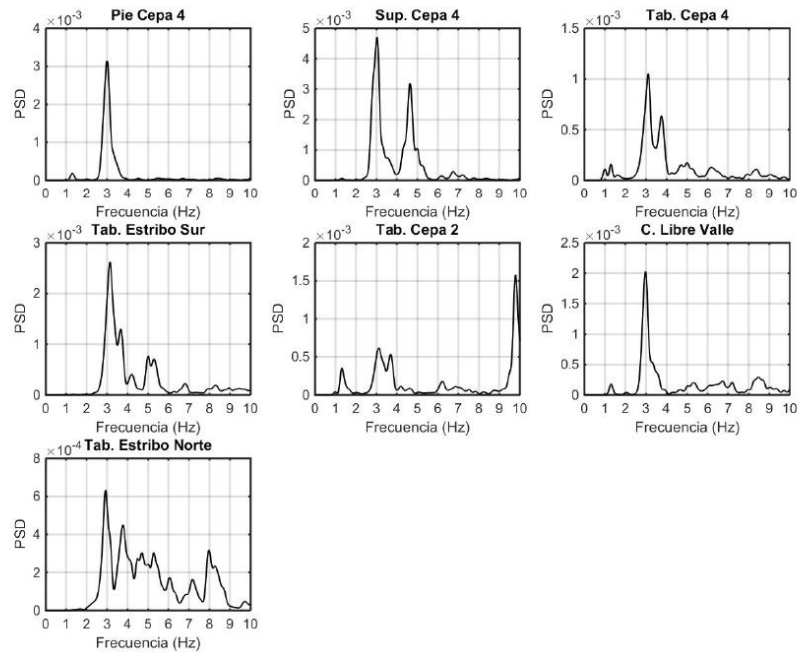


Figura 38: Espectro de Potencia asociado al evento del 03-06-2019(Transversal)

7.4. Resumen Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas (DSI)

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 7, 12 y 20 y como entradas los canales 4 (Combinación de canales que configura una respuesta longitudinal del puente).

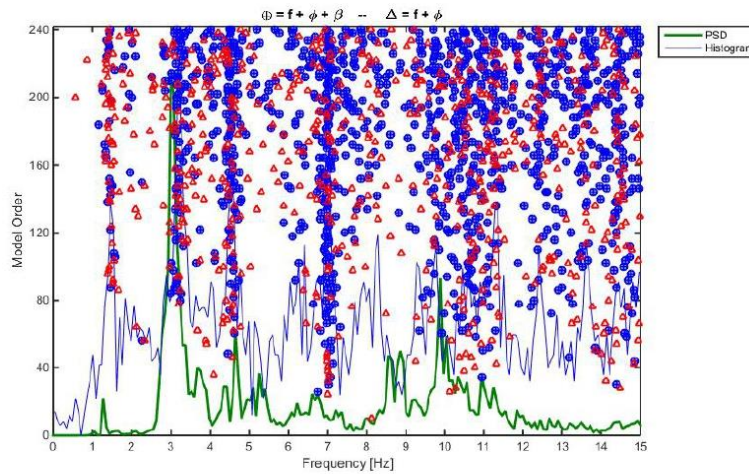


Figura 39: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 03-06-2019

Tabla 19: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	σ %	β %	σ %	N
1.362	2.01	7.97	2.01	12
1.444	2.76	7.35	2.76	25
1.534	2.08	15.49	2.08	8
1.963	3.58	10.24	3.58	5
2.849	5.37	10.12	5.37	8
2.994	2.24	9.46	2.24	5
3.168	5.68	4.52	5.68	56
3.313	2.82	3.98	2.82	14

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

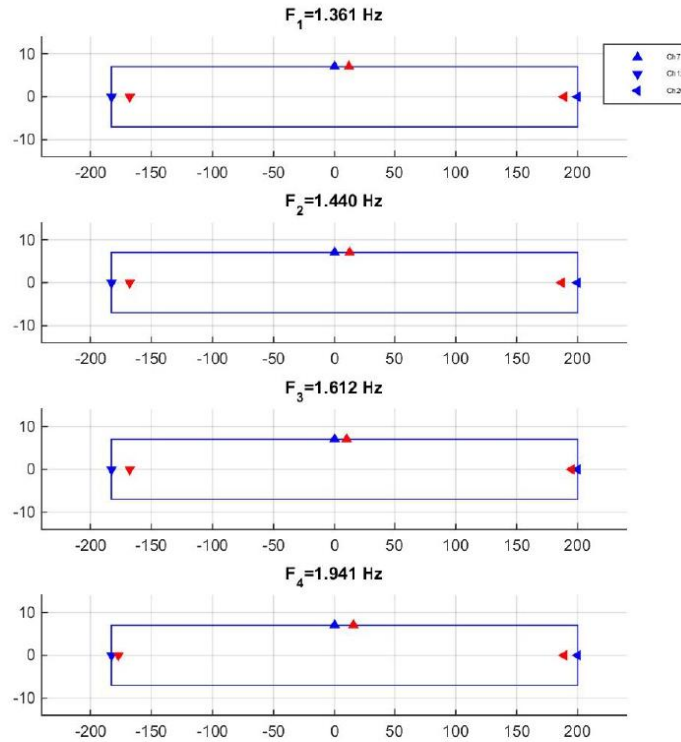


Figura 40: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 03-06-2019

La identificación es realizada con el método DSI (Deterministic Stochastic Identification), empleando matrices de peso CVA. Se utilizan como salidas los canales 3, 6, 9, 11, 13 y 19 y como entradas los canales 18 (Combinación de canales que configura una respuesta transversal del puente).

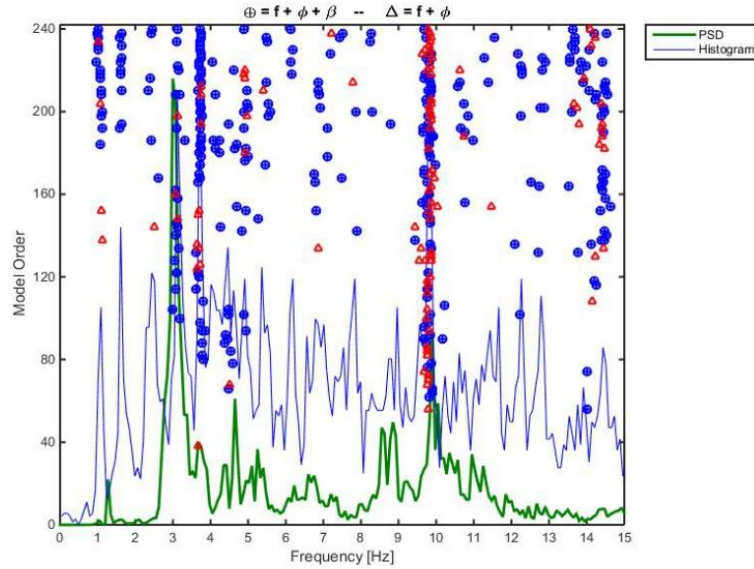


Figura 41: Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 03-06-2019

Tabla 20: Parámetros Dinámicos Identificados por método DSI

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.105	1.04	11.62	1.04	7
1.624	1.16	5.05	1.16	8
3.120	3.85	2.01	3.85	19
3.727	3.38	1.55	3.38	48
4.607	7.78	3.08	7.78	7
4.929	4.61	1.54	4.61	15
5.496	5.32	1.87	5.32	8
6.845	5.37	2.13	5.37	7

Las Formas Modales asociadas al método DSI, se calculan tomando las tres primeras frecuencias detectadas por el DSI.

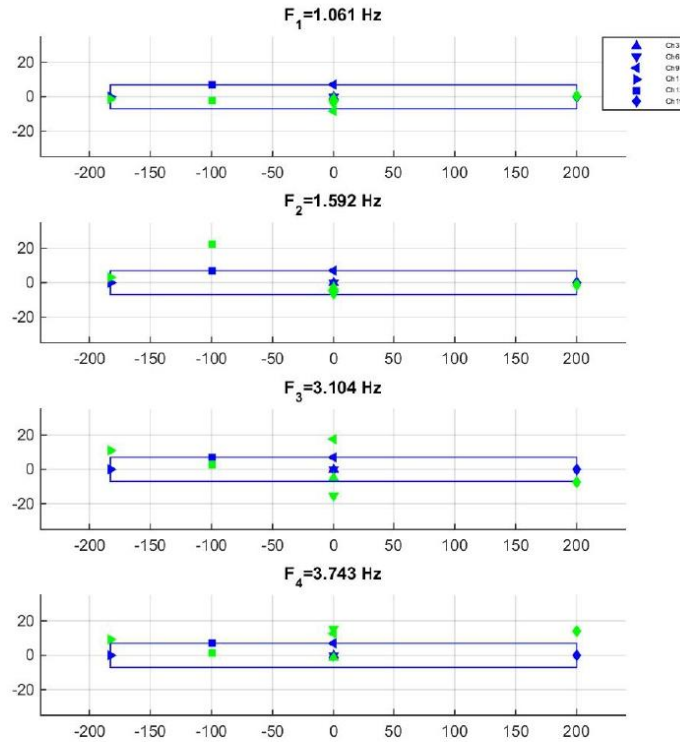


Figura 42: Formas Modales del Diagrama de Estabilidad asociado al evento del 03-06-2019

8. Referencias

1. Díaz, A. (2004). Análisis de micro vibraciones del viaducto Marga-Marga II. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Universidad de Chile.
2. Van Overschee, P., and De Moor, B. (1996). Subspace Identification for Linear Systems. Conference Proceedings of the International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Vol. 2008). Belgium. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2008.4650193>.